

## Prólogo

Quienes se sientan subyugados por la invencibilidad del espíritu humano y la incesante eficacia del método científico como herramienta útil para desentrañar las complejidades del Universo, encontrarán muy vivificador e incitante el veloz progreso de la Ciencia.

Pero, ¿qué decir de uno que pugna por elucidar cada fase del progreso científico con la específica finalidad de hacerlo inteligible para el gran público? En este caso interviene una especie de desesperación, que atenúa dicha acción vivificadora y estimulante.

La Ciencia no quiere estancarse. Ofrece un panorama lleno de sutiles cambios y esfumaciones, incluso mientras la estamos observando. Es imposible captar cada detalle en un momento concreto, sin quedarse rezagado inmediatamente.

Cuando se publicó *The Intelligent Man's Guide to Science*, allá por 1960, el progreso, científico no tardó en rebasar su contenido. Así, pues, fue preciso publicar *The New Intelligent Man's Guide to Science* en 1965 para analizar, por ejemplo, elementos tales como el cuasar y el láser, términos desconocidos en 1960 y de uso común dos años después.

Pero, entretanto, la Ciencia ha proseguido su inexorable marcha. Y ahora se plantea ya la cuestión de los pulsars, los orificios negros, la deriva de los continentes, los hombres en la Luna, el sueño REM, las oleadas gravitacionales, la holografía, el AMP cíclico..., todo ello posterior a 1965.

Por consiguiente, le ha llegado el turno a una nueva edición, la tercera. Pero, ¿cómo convendría titularla? ¿Tal vez *The New New Intelligent Man's Guide to Science*? Evidentemente, no.

Ahora bien, allá por 1965 escribí una introducción a la Biblia, en dos volúmenes, cuyo título llevaba mi propio nombre, así como una introducción a la obra de Shakespeare, también en dos volúmenes. ¿Por qué no emplear aquí el mismo

sistema? Demos, pues, entrada a esta edición de mi introducción a la Ciencia titulándola, sin más, *Asimov's Guide to Science*<sup>1</sup>.

Isaac Asimov

---

<sup>1</sup> Guía de la ciencia de Asimov"

## Capítulo 1

### ¿Qué es la Ciencia?

Y, al principio, todo fue curiosidad.

La curiosidad, el imperativo deseó de conocer, no es una característica de la materia inanimada. Tampoco lo es de algunas formas de organismos vivos, a los que, por este motivo, apenas podemos considerar vivos.

Un árbol no siente curiosidad alguna por su medio ambiente, al menos en ninguna forma que podamos reconocer; por su parte, tampoco la sienten una esponja o una ostra. El viento, la lluvia y las corrientes oceánicas les llevan lo que necesitan, y toman de ellos lo que buenamente pueden. Si el azar de los acontecimientos es tal que llega hasta ellos el fuego, el veneno, los depredadores o los parásitos, mueren tan estoica y silenciosamente como vivieron.

Sin embargo, en el esquema de la vida, algunos organismos no tardaron en desarrollar ciertos movimientos independientes. Esto significó un gran avance en el control de su medio ambiente. Con ello, un organismo móvil no tenía ya por qué esperar largo tiempo, en estólica rigidez, a que los alimentos se cruzaran en su camino, sino que podía salir a buscarlos.

Esto supuso que habían entrado en el mundo la aventura y la curiosidad. El individuo que vacilaba en la lucha competitiva por los alimentos, que se mostraba excesivamente conservador en su exploración, simplemente perecía de hambre. Tan pronto como ocurrió eso, la curiosidad sobre el medio ambiente fue el precio que se hubo de pagar por la supervivencia.

El paramecio unicelular, en sus movimientos de búsqueda, quizás no tenga voliciones ni deseos conscientes en el sentido humano, pero no cabe duda de que experimenta un impulso, aún cuando sea de tipo fisicoquímico «simple», que lo induce a comportarse como si estuviera investigando, su entorno en busca de alimentos. Y este «acto de curiosidad» es lo que nosotros más fácilmente reconocemos como inseparable de la forma de vida más afín a la nuestra.

Al hacerse más intrincados los organismos, sus órganos sensitivos se multiplicaron y adquirieron mayor complejidad y sensibilidad. Entonces empezaron a captar mayor

número de mensajes y más variados desde el medio ambiente y acerca del mismo. A la vez (y no podemos decir si, como causa o efecto) se desarrolló una creciente complejidad del sistema nervioso, el instrumento viviente que interpreta y almacena los datos captados por los órganos de los sentidos, y con esto llegamos al punto en que la capacidad para recibir, almacenar e interpretar los mensajes del mundo externo puede rebasar la pura necesidad. Un organismo puede haber saciado momentáneamente su hambre y no tener tampoco, por el momento, ningún peligro a la vista. ¿Qué hace entonces?

Tal vez dejarse caer en una especie de sopor, como la ostra. Sin embargo, al menos los organismos superiores, siguen mostrando un claro instinto para explorar el medio ambiente. Estéril curiosidad, podríamos decir. No obstante, aunque podamos burlarnos de ella, también juzgamos la inteligencia en función de esta cualidad. El perro, en sus momentos de ocio, olfatea acá y allá, elevando sus orejas al captar sonidos que nosotros no somos capaces de percibir; y precisamente por esto es por lo que lo consideramos más inteligente que el gato, el cual, en las mismas circunstancias, se entrega a su aseo, o bien se relaja, se estira a su talante y dormita. Cuanto más evolucionado es el cerebro, mayor es el impulso a explorar, mayor la «curiosidad excedente». El mono es sinónimo de curiosidad. El pequeño e inquieto cerebro de este animal debe interesarse, y se interesa en realidad, por cualquier cosa que caiga en sus manos. En este sentido, como en muchos otros, el hombre no es más que un *supermono*.

El cerebro humano es la más estupenda masa de materia organizada del Universo conocido, y su capacidad de recibir, organizar y almacenar datos supera ampliamente los requerimientos ordinarios de la vida. Se ha calculado que, durante el transcurso de su existencia, un ser humano puede llegar a recibir más de cien millones de datos de información. Algunos creen que este total es mucho más elevado aún. Precisamente este exceso de capacidad es causa de que nos ataque una enfermedad sumamente dolorosa: el aburrimiento. Un ser humano colocado en una situación en la que tiene oportunidad de utilizar su cerebro sólo para una mínima supervivencia, experimentará gradualmente una diversidad de síntomas desagradables, y puede llegar incluso hasta una grave desorganización mental.

Por tanto, lo que realmente importa es que el ser humano sienta una intensa y dominante curiosidad. Si carece de la oportunidad de satisfacerla en formas inmediatamente útiles para él, lo hará por otros conductos, incluso en formas censurables, para las cuales reservamos admoniciones tales como: «La curiosidad mató el gato», o «Métase usted en sus asuntos».

La abrumadora fuerza de la curiosidad, incluso con el dolor como castigo, viene reflejada en los mitos y leyendas. Entre los griegos corría la fábula de Pandora y su caja. Pandora, la primera mujer, había recibido una caja, que tenía prohibido abrir. Naturalmente, se apresuró a abrirla, y entonces vio en ella toda clase de espíritus de la enfermedad, el hambre, el odio y otros obsequios del Maligno, los cuales, al escapar, asolaron el mundo desde entonces.

En la historia bíblica de la tentación de Eva, no cabe duda de que la serpiente tuvo la tarea más fácil del mundo. En realidad podía haberse ahorrado sus palabras tentadoras: la curiosidad de Eva la habría conducido a probar el fruto prohibido, incluso sin tentación alguna. Si deseáramos interpretar alegóricamente este pasaje de la Biblia, podríamos representar a Eva de pie bajo el árbol, con el fruto prohibido en la mano, y la serpiente enrollada en torno a la rama podría llevar este letrero: «Curiosidad». Aunque la curiosidad, como cualquier otro impulso humano, ha sido utilizada de forma innoble, la invasión en la vida privada, que ha dado a la palabra su absorbente y peyorativo sentido, sigue siendo una de las más nobles propiedades de la mente humana. En su definición más simple y pura es «el deseo de conocer». Este deseo encuentra su primera expresión en respuestas a las necesidades prácticas de la vida humana: cómo plantar y cultivar mejor las cosechas; cómo fabricar mejores arcos y flechas; cómo tejer mejor el vestido, o sea, las «Artes Aplicadas». Pero, ¿qué ocurre una vez dominadas estas tareas, comparativamente limitadas, o satisfechas las necesidades prácticas? Inevitablemente, el deseo de conocer impulsa a realizar actividades menos limitadas y más complejas.

Parece evidente que las «Bellas Artes» (destinadas sólo a satisfacer unas necesidades de tipo espiritual) nacieron en la agonía del aburrimiento. Si nos lo proponemos, tal vez podamos hallar fácilmente unos usos más pragmáticos y más nuevas excusas para las Bellas Artes. Las pinturas y estatuillas fueron utilizadas, por ejemplo, como amuletos de fertilidad y como símbolos religiosos. Pero no se

puede evitar la sospecha de que primero existieron estos objetos, y de que luego se les dio esta aplicación.

Decir que las Bellas Artes surgieron de un sentido de la belleza, puede equivaler también a querer colocar el carro delante del caballo. Una vez que se hubieron desarrollado las Bellas Artes, su extensión y refinamiento hacia la búsqueda de la Belleza podría haber seguido como una consecuencia inevitable; pero aunque esto no hubiera ocurrido, probablemente se habrían desarrollado también las Bellas Artes. Seguramente se anticiparon a cualquier posible necesidad o uso de las mismas. Tengamos en cuenta, por ejemplo, como una posible causa de su nacimiento, la elemental necesidad de tener ocupada la mente.

Pero lo que ocupa la mente de una forma satisfactoria no es sólo la creación de una obra de arte, pues la contemplación o la apreciación de dicha obra brinda al espectador un servicio similar. Una gran obra de arte es grande precisamente porque nos ofrece una clase de estímulo que no podemos hallar en ninguna otra parte.

Contiene bastantes datos de la suficiente complejidad como para incitar al cerebro a esforzarse en algo distinto de las necesidades usuales, y, a menos que se trate de una persona desesperadamente arruinada por la estupidez o la rutina, este ejercicio es placentero.

Pero si la práctica de las Bellas Artes es una solución satisfactoria para el problema del ocio, también tiene sus desventajas: requiere, además de una mente activa y creadora, destreza física. También es interesante cultivar actividades que impliquen sólo a la mente, sin el suplemento de un trabajo manual especializado, y, por supuesto, tal actividad es provechosa. Consiste en el cultivo del conocimiento por sí mismo, no con objeto de hacer algo con él, sino por el propio placer que causa.

Así, pues, el deseo de conocer parece conducir a una serie de sucesivos reinos cada vez más etéreos y a una más eficiente ocupación de la mente, desde la facultad de adquirir lo simplemente útil, hasta el conocimiento de lo estético, o sea, hasta el conocimiento «puro».

Por sí mismo, el conocimiento busca sólo resolver cuestiones tales como: ¿A qué altura está el firmamento?», o «¿Por qué cae una piedra?». Esto es la curiosidad pura, la curiosidad en su aspecto más estéril y, tal vez por ello, el más perentorio.

Después de todo, no sirve más que al aparente propósito de saber la altura a que está el cielo y por qué caen las piedras. El sublime firmamento no acostumbra interferirse en los asuntos corrientes de la vida, y, por lo que se refiere a la piedra, el saber por qué cae no nos ayuda a esquivarla más diestramente o a suavizar su impacto en el caso de que se nos venga encima. No obstante, siempre ha habido personas que se han interesado por preguntas tan aparentemente inútiles y han tratado de contestarlas sólo por el puro deseo de conocer, por la absoluta necesidad de mantener el cerebro trabajando.

El mejor método para enfrentarse con tales interrogantes consiste en elaborar una respuesta estéticamente satisfactoria, respuesta que debe tener las suficientes analogías con lo que ya se conoce como para ser comprensible y plausible. La expresión «elaborar» es más bien gris y poco romántica. Los antiguos gustaban de considerar el proceso del descubrimiento como la inspiración de las musas o la revelación del cielo. En todo caso, fuese inspiración, o revelación, o bien se tratara de la clase de actividad creadora que desembocaba en el relato de leyendas, sus explicaciones dependían, en gran medida, de la analogía. El rayo, destructivo y terrorífico, sería lanzado, a fin de cuentas, como un arma, y a juzgar por el daño que causa parece como si se tratara realmente de un arma arrojadiza, de inusitada violencia. Semejante arma debe de ser lanzada por un ente proporcionado a la potencia de la misma, y por eso el trueno se transforma en el martillo de Thor, y el rayo, en la centelleante lanza de Zeus. El arma sobrenatural es manejada siempre por un hombre sobrenatural.

Así nació el mito. Las fuerzas de la Naturaleza fueron personificadas y deificadas. Los mitos se inter influyeron a lo largo de la Historia, y las sucesivas generaciones de relatores los aumentaron y corrigieron, hasta que su origen quedó oscurecido. Algunos degeneraron en agradables historietas (o en sus contrarias), en tanto que otros ganaron un contenido ético lo suficientemente importante, como para hacerlas significativas dentro de la estructura de una religión mayor.

Con la mitología ocurre lo mismo que con el Arte, que puede ser pura o aplicada. Los mitos se mantuvieron por su encanto estético, o bien se emplearon para usos físicos. Por ejemplo, los primeros campesinos sintieronse muy preocupados por el fenómeno de la lluvia y por qué caía tan caprichosamente. La fertilizante lluvia

representaba, obviamente, una analogía con el acto sexual, y, personificando a ambas (cielo y tierra), el hombre halló una fácil interpretación acerca del por qué llueve o no. Las diosas terrenas, o el dios del cielo, podían estar halagados u ofendidos, según las circunstancias. Una vez aceptado este mito, los campesinos encontraron una base plausible para producir la lluvia. Literalmente, aplacando, con los ritos adecuados, al dios enfurecido. Estos ritos pudieron muy bien ser de naturaleza orgiástica, en un intento de influir con el ejemplo sobre el cielo y la tierra.

Los mitos griegos figuran entre los más bellos y sofisticados de nuestra herencia literaria y cultural. Pero se da el caso de que los griegos fueron también quienes, a su debido tiempo, introdujeron el camino opuesto de la observación del Universo, a saber, la contemplación de éste como impersonal e inanimado. Para los creadores de mitos, cada aspecto de la Naturaleza era esencialmente humano en su imprevisibilidad. A pesar de la fuerza y la majestad de su personificación y de los poderes que pudieran tener Zeus o Marduk, u Odín, éstos se mostraban, también como simples hombres, frívolos, caprichosos, emotivos, capaces de adoptar una conducta violenta por razones fútiles, y susceptibles a los halagos infantiles. Mientras el Universo estuviera bajo el control de unas deidades tan arbitrarias y de reacciones tan imprevisibles, no había posibilidades de comprenderlo; sólo existía la remota esperanza de aplacarlo. Pero, desde el nuevo punto de vista de los pensadores griegos más tardíos, el Universo era una máquina gobernada por leyes inflexibles. Así, pues, los filósofos griegos se entregaron desde entonces al excitante ejercicio intelectual de tratar de descubrir hasta qué punto existían realmente leyes en la Naturaleza.

El primero en afrontar este empeño, según la tradición griega, fue Tales de Mileto hacia el 600 a. de J.C. Aunque sea dudoso el enorme número de descubrimientos que le atribuyó la posteridad, es muy posible que fuese el primero en llevar al mundo helénico el abandonado conocimiento babilónico. Su hazaña más espectacular consistió en predecir un eclipse para el año 585 a. de J.C., fenómeno que se produjo en la fecha prevista.

Comprometidos en su ejercicio intelectual, los griegos presumieron, por supuesto, que la Naturaleza jugaría limpio; ésta, si era investigada en la forma adecuada,

mostraría sus secretos, sin cambiar la posición o la actitud en mitad del juego. (Miles de años más tarde, Albert Einstein expresó, también esta creencia al afirmar: «Dios puede ser sutil, pero no malicioso») Por otra parte, creíase que las leyes naturales, cuando son halladas, pueden ser comprensibles. Este optimismo de los griegos no ha abandonado nunca a la raza humana.

Con la confianza en el juego limpio de la Naturaleza el hombre necesitaba conseguir un sistema ordenado para aprender la forma de determinar, a partir de los datos observados, las leyes subyacentes. Progresar desde un punto basta otro, estableciendo líneas de argumentación, supone utilizar la «razón». Un individuo que razona puede utilizar la «intuición» para guiarse en su búsqueda de respuestas, mas para apoyar su teoría deberá confiar, al fin, en una lógica estricta. Para tomar un ejemplo simple: si el coñac con agua, el whisky con agua, la vodka con agua o el ron con agua son brebajes intoxicantes, puede uno llegar a la conclusión que el factor intoxicante debe ser el ingrediente que estas bebidas tienen en común, o sea, el agua. Aunque existe cierto error en este razonamiento, el fallo en la lógica no es inmediatamente obvio, y, en casos más sutiles, el error puede ser, de hecho, muy difícil de descubrir.

El descubrimiento de los errores o falacias en el razonamiento ha ocupado a los pensadores desde los tiempos griegos hasta la actualidad, y por supuesto que debemos los primeros fundamentos de la lógica sistemática a Aristóteles de Estalira, el cual, en el siglo IV a. de J.C., fue el primero en resumir las reglas de un razonamiento riguroso.

En el juego intelectual hombre-Naturaleza se dan tres premisas: La primera, recoger las informaciones acerca de alguna faceta de la Naturaleza; la segunda, organizar estas observaciones en un orden preestablecido. (La organización no las altera, sino que se limita a colocarlas para hacerlas aprehensibles más fácilmente. Esto se ve claro, por ejemplo, en el juego del bridge, en el que, disponiendo la mano por palos y por orden de valores, no se cambian las cartas ni se pone de manifiesto cuál será la mejor forma de jugarlo, pero sí se facilita un juego lógico.) Y, finalmente, tenemos la tercera, que consiste en deducir, de su orden preestablecido de observaciones, algunos principios que las resuman.

Por ejemplo, podemos observar que el mármol se hunde en el agua, que la madera flota, que el hierro se hunde, que una pluma flota, que el mercurio se hunde, que el aceite de oliva flota, etc. Si ponemos en una lista todos los objetos que se hunden y en otra todos los que flotan, y buscamos una característica que distinga a todos los objetos de un grupo de los del otro, llegaremos a la conclusión de que los objetos pesados se hunden en el agua, mientras que los ligeros flotan.

Esta nueva forma de estudiar el Universo fue denominada por los griegos *Philosophia* (Filosofía), voz que significa «amor al conocimiento» o, en una traducción libre, «deseo de conocer».

Los griegos consiguieron en Geometría sus éxitos más brillantes, éxitos que pueden atribuirse, principalmente, a su desarrollo en dos técnicas: la abstracción y la generalización.

Veamos un ejemplo: Los agrimensores egipcios habían hallado un sistema práctico de obtener un ángulo: dividían una cuerda en 12 partes iguales y formaban un triángulo, en el cual, tres partes de la cuerda constituían un lado; cuatro partes, otro, y cinco partes, el tercero (el ángulo recto se constituía cuando el lado de tres unidades se unía con el de cuatro). No existe ninguna información acerca de cómo descubrieron este método los egipcios, y, aparentemente, su interés no fue más allá de esta utilización. Pero los curiosos griegos siguieron esta senda e investigaron por qué tal triángulo debía contener un ángulo recto. En el curso de sus análisis llegaron a descubrir que, en sí misma, la construcción física era solamente incidental; no importaba que el triángulo estuviera hecho de cuerda, o de lino, o de tablillas de madera. Era simplemente una propiedad de las «líneas rectas», que se cortaban formando ángulos. Al concebir líneas rectas ideales independientes de toda comprobación física y que pudiera existir sólo en la mente, dieron origen al método llamado *abstracción*, que consiste en despreciar los aspectos no esenciales de un problema y considerar sólo las propiedades necesarias para la solución del mismo.

Los geómetras griegos dieron otro paso adelante al buscar soluciones generales para las distintas clases de problemas, en lugar de tratar por separado cada uno de ellos. Por ejemplo, se pudo descubrir, gracias a la experiencia, que un ángulo recto aparece no sólo en los triángulos que tienen, lados de 3, 4 y 5 m de longitud, sino también en los de 5, 12 y 13 y en los de 7, 24 y 25 m. Pero, éstos eran sólo

números, sin ningún significado. ¿Podría hallarse alguna propiedad común que describieran todos los triángulos rectángulos? Mediante detenidos razonamientos, los griegos demostraron que un triángulo es rectángulo únicamente en el caso de que las longitudes de los lados estuvieran en la relación de  $x^2 + y^2 = z^2$ , donde  $z$  es la longitud del lado más largo. El ángulo recto se formaba al unirse los lados de longitud  $x$  e  $y$ . Por este motivo, para el triángulo con lados de 3, 4 y 5 m, al elevar al cuadrado su longitud daba por resultado  $9 + 16 = 25$ , y al hacer lo mismo con los de 5, 12 y 13, se tenía  $25 + 144 = 169$ , y, por último, procediendo de idéntica forma con los de 7, 24 y 25, se obtenía  $49 + 576 = 625$ . Éstos son únicamente tres casos de entre una infinita posibilidad de ellos, y, como tales, intrascendentes. Lo que intrigaba a los griegos era el descubrimiento de una prueba de que la relación debía satisfacerse en todos los casos, y prosiguieron el estudio de la Geometría como un medio útil para descubrir y formular generalizaciones.

Varios matemáticos griegos aportaron pruebas de las estrechas relaciones que existían entre las líneas y los puntos de las figuras geométricas. La que se refería al triángulo rectángulo fue, según la opinión general, elaborada por Pitágoras de Samos hacia el 525 a. de J.C., por lo que aún se llama, en su honor, *teorema de Pitágoras*.

Aproximadamente el año 300 a. de J.C., Euclides recopiló los teoremas matemáticos conocidos en su tiempo y los dispuso en un orden razonable, de forma que cada uno pudiera demostrarse utilizando teoremas previamente demostrados. Como es natural, este sistema se remontaba siempre a algo indemostrable: si cada teorema tenía que ser probado con ayuda de otro ya demostrado, ¿cómo podría demostrarse el teorema número 1? La solución consistió en empezar por establecer unas verdades tan obvias y aceptables por todos, que no necesitaran su demostración. Tal afirmación fue llamada «axioma». Euclides procuró reducir a unas cuantas afirmaciones simples los axiomas aceptados hasta entonces. Sólo con estos axiomas pudo construir el intrincado y maravilloso sistema de la *geometría euclídea*. Nunca con tan poco se construyó tanto y tan correctamente, por lo que, como recompensa, el libro de texto de Euclides ha permanecido en uso, apenas con la menor modificación, durante más de 2.000 años.

Elaborar un cuerpo doctrinal como consecuencia inevitable de una serie de axiomas («deducción») es un juego atractivo. Los griegos, alentados por los éxitos de su Geometría, se entusiasmaron con él hasta el punto de cometer dos serios errores. En primer lugar, llegaron a considerar la deducción como el único medio respetable de alcanzar el conocimiento. Tenían plena conciencia de que, para ciertos tipos de conocimiento, la deducción resultaba inadecuada por ejemplo, la distancia desde Corinto a Atenas no podía ser deducida a partir de principios abstractos, sino que forzosamente tenía que ser medida. Los griegos no tenían inconveniente en observar la Naturaleza cuando era necesario. No obstante, siempre se avergonzaron de esta necesidad, y consideraban que el conocimiento más exelso era simplemente el elaborado por la actividad mental. Tendieron a subestimar aquel conocimiento que estaba demasiado directamente implicado en la vida diaria. Según se dice, un alumno de Platón, mientras recibía instrucción matemática de su maestro, preguntó al final, impacientemente:

-Más, ¿para qué sirve todo esto?

Platón, muy ofendido, llamó a un esclavo y le ordenó que entregara una moneda al estudiante.

-Ahora, dijo, no podrás decir que tu instrucción no ha servido en realidad para nada. Y, con ello, el estudiante fue despedido.

Existe la creencia general de que este sublime punto de vista surgió como consecuencia de la cultura esclavista de los griegos, en la cual todos los asuntos prácticos quedaban confiados a los sirvientes. Tal vez sea cierto, pero yo me inclino por el punto de vista según el cual los griegos sentían y practicaban la Filosofía como un deporte, un juego intelectual. Consideramos al aficionado a los deportes como a un caballero, socialmente superior al profesional que vive de ellos. Dentro de este concepto de la pureza, tomamos precauciones casi ridículas para asegurarnos de que los participantes en los Juegos Olímpicos están libres de toda mácula de profesionalismo. De forma similar, la racionalización griega por el «culto a lo inútil» puede haberse basado en la impresión de que el hecho de admitir que el conocimiento mundano, tal como la distancia desde Atenas a Corinto, nos introduce en el conocimiento abstracto, era como aceptar que la imperfección nos lleva al Edén de la verdadera Filosofía. No obstante la racionalización, los pensadores

griegos se vieron seriamente limitados por esta actitud. Grecia no fue estéril por lo que se refiere a contribuciones prácticas a la civilización, pese a lo cual, hasta su máximo ingeniero, Arquímedes de Siracusa, rehusó escribir acerca de sus investigaciones prácticas y descubrimientos; para mantener su *status* de aficionado, transmitió sus hallazgos sólo en forma de Matemáticas puras. Y la carencia de interés por las cosas terrenas, en la invención, en el experimento y en el estudio de la Naturaleza, fue sólo uno de los factores que limitó el pensamiento griego. El énfasis puesto por los griegos sobre el estudio puramente abstracto y formal, en realidad, sus éxitos en Geometría, les condujo a su segundo gran error y, eventualmente, a la desaparición final.

Seducedos por el éxito de los axiomas en el desarrollo de un sistema geométrico, los griegos llegaron a considerarlos como «verdades absolutas» y a suponer que otras ramas del conocimiento podrían desarrollarse a partir de similares «verdades absolutas». Por este motivo, en la Astronomía tomaron como axiomas las nociones de que:

1. La Tierra era inmóvil y, al mismo tiempo, el centro del Universo.
2. En tanto que la Tierra era corrupta e imperfecta, los cielos eran eternos, inmutables y perfectos.

Dado que los griegos consideraban el círculo como la curva perfecta, y teniendo en cuenta que los cielos eran también perfectos, dedujeron que todos los cuerpos celestes debían moverse formando círculos alrededor de la Tierra. Con el tiempo, sus observaciones (procedentes de la navegación y del calendario) mostraron que los planetas no se movían en círculos perfectos y, por tanto, se vieron obligados a considerar que realizaban tales movimientos en combinaciones cada vez más complicadas de círculos; lo cual fue formulado, como un sistema excesivamente complejo, por Claudio Ptolomeo, en Alejandría, hacia el 150 de nuestra Era. De forma similar, Aristóteles elaboró caprichosas teorías acerca del movimiento a partir de axiomas «evidentes por sí mismos», tales como la afirmación de que la velocidad de caída de un objeto era proporcional a su peso. (Cualquiera podía ver que una piedra caía más rápidamente que una pluma.)

Así, con este culto a la deducción partiendo de los axiomas evidentes por sí mismos,

se corría el peligro de llegar a un callejón sin salida. Una vez los griegos hubieron hecho todas las posibles deducciones a partir de los axiomas, parecieron quedar fuera de toda duda ulteriores descubrimientos importantes en Matemáticas o Astronomía. El conocimiento filosófico se mostraba completo y perfecto, y, durante cerca de 2.000 años después de la Edad de Oro de los griegos, cuando se planteaban cuestiones referentes al Universo material, tendíase a zanjar los asuntos a satisfacción de todo el mundo mediante la fórmula: «Aristóteles dice...», o «Euclides afirma...»

Una vez resueltos los problemas de las Matemáticas y la Astronomía, los griegos irrumpieron en campos más sutiles y desafiantes del conocimiento. Uno de ellos fue el referente al alma humana.

Platón sintióse más profundamente interesado por cuestiones tales como: «¿Qué es la justicia?», o «¿Qué es la virtud?», antes que por los relativos al hecho de por qué caía la lluvia o cómo se movían los planetas. Como supremo filósofo moral de Grecia, superó a Aristóteles, el supremo filósofo natural. Los pensadores griegos del período romano se sintieron también atraídos, con creciente intensidad, hacia las sutiles delicadezas de la Filosofía moral, y alejados de la aparente esterilidad de la Filosofía natural. El último desarrollo en la Filosofía antigua fue excesivamente místico «neoplatonismo», formulado por Plotino hacia el 250 de nuestra Era.

El cristianismo, al centrar la atención sobre la naturaleza de Dios y su relación con el hombre, introdujo una dimensión completamente nueva en la materia objeto de la Filosofía moral, e incrementó su superioridad sobre la Filosofía natural, al conferirle un rango intelectual. Desde el año 200 hasta el 1200 de nuestra Era, los europeos se rigieron casi exclusivamente por la Filosofía moral, en particular, por la Teología. La Filosofía natural fue casi literalmente olvidada.

No obstante, los árabes consiguieron preservar a Aristóteles y Ptolomeo a través de la Edad Media, y, gracias a ellos, la Filosofía natural griega, eventualmente filtrada, volvió a la Europa Occidental. En el año 1200 fue redescubierto Aristóteles. Adicionales inspiraciones llegaron del agonizante imperio bizantino, el cual fue la última región europea que mantuvo una continua tradición cultural desde los tiempos de esplendor de Grecia.

La primera y más natural consecuencia del redescubrimiento de Aristóteles fue la aplicación de su sistema de lógica y razón a la Teología. Alrededor del 1250, el teólogo italiano Tomás de Aquino estableció el sistema llamado «tomismo», basado en los principios aristotélicos, el cual representa aún la Teología básica de la Iglesia Romana. Pero los hombres empezaron también pronto a aplicar el resurgimiento del pensamiento griego a campos más pragmáticos.

Debido a que los maestros del Renacimiento trasladaron el centro de atención de los temas teológicos a los logros de la Humanidad, fueron llamados «humanistas», y el estudio de la Literatura, el Arte y la Historia es todavía conocido con el nombre conjunto de «Humanidades».

Los pensadores del Renacimiento aportaron una perspectiva nueva a la Filosofía natural de los griegos, perspectiva no demasiado satisfactoria para los viejos puntos de vista. En 1543, el astrónomo polaco Nicolás Copérnico publicó un libro en el que fue tan lejos que llegó incluso a rechazar un axioma básico de la Astronomía. Afirmó que el Sol, y no la Tierra, debía de ser considerado como el centro del Universo. (Sin embargo, mantenía aún la noción de las órbitas circulares para la Tierra y los demás planetas.) Este nuevo axioma permitía una explicación mucho más simple de los movimientos observados en los cuerpos celestes. Ya que el axioma de Copérnico referente a una Tierra en movimiento era mucho menos «evidente por sí mismo» que el axioma griego de una Tierra inmóvil, no es sorprendente que transcurriera casi un siglo antes de que fuera aceptada la teoría de Copérnico.

En cierto sentido, el sistema copernicano no representaba un cambio crucial. Copérnico se había limitado a cambiar axiomas; y Aristarco de Samos había anticipado ya este cambio, referente al Sol como centro, 2.000 años antes. Pero téngase en cuenta que cambiar un axioma no es algo sin importancia. Cuando los matemáticos del siglo XIX cambiaron los axiomas de Euclides y desarrollaron «geometrías no euclídeas» basadas en otras premisas, influyeron más profundamente el pensamiento en muchos aspectos. Hoy, la verdadera historia y forma del Universo sigue más las directrices de una geometría no euclídea (la de Riemann) que las de la «evidente» geometría de Euclides. Pero la revolución iniciada por Copérnico suponía no sólo un cambio de los axiomas, sino que representaba también un enfoque totalmente nuevo de la Naturaleza. Paladín en

esta revolución fue el italiano Galileo Galilei.

Por muchas razones los griegos se habían sentido satisfechos al aceptar los hechos «obvios» de la Naturaleza como puntos de partida para su razonamiento. No existe ninguna noticia relativa a que Aristóteles dejara caer dos piedras de distinto peso para demostrar su teoría de que la velocidad de caída de un objeto era proporcional a su peso. A los griegos les pareció irrelevante este experimento. Se interfería en la belleza de la pura deducción y se alejaba de ella. Por otra parte, si un experimento no estaba de acuerdo con una deducción, ¿podía uno estar cierto de que el experimento se había realizado correctamente? Era plausible que el imperfecto mundo de la realidad hubiese de encajar completamente en el mundo perfecto de las ideas abstractas, y si ello no ocurría, ¿debía ajustarse lo perfecto a las exigencias de lo imperfecto? Demostrar una teoría perfecta con instrumentos imperfectos no interesó a los filósofos griegos como una forma válida de adquirir el conocimiento.

La experimentación empezó a hacerse filosóficamente respetable en Europa con la aportación de filósofos tales como Roger Bacon (un contemporáneo de Tomás de Aquino) y su ulterior homónimo Francis Bacon. Pero fue Galileo quien acabó con la teoría de los griegos y efectuó la revolución. Era un lógico convincente y genial publicista. Describía sus experimentos y sus puntos de vista de forma tan clara y espectacular, que conquistó a la comunidad erudita europea. Y sus métodos fueron aceptados, junto con sus resultados.

Según las historias más conocidas acerca de su persona, Galileo puso a prueba las teorías aristotélicas de la caída de los cuerpos consultando la cuestión directamente a partir de la Naturaleza y de una forma cuya respuesta pudo escuchar toda Europa. Se afirma que subió a la cima de la torre inclinada de Pisa y dejó caer una esfera de 5 kilos de peso, junto con otra esfera de medio kilo; el impacto de las dos bolas al golpear la tierra a la vez terminó con los físicos aristotélicos.

Galileo no realizaría probablemente hoy este singular experimento, pero el hecho es tan propio de sus espectaculares métodos, que no debe extrañar que fuese creído a través de los siglos.

Galileo debió, sin duda, de echar a rodar las bolas hacia abajo sobre planos inclinados, para medir la distancia que cubrían aquéllas en unos tiempos dados. Fue

el primero en realizar experimentos cronometrados y en utilizar la medición de una forma sistemática.

Su revolución consistió en situar la «inducción» por encima de la deducción, como el método lógico de la Ciencia. En lugar de deducir conclusiones a partir de una supuesta serie de generalizaciones, el método inductivo toma como punto de partida las observaciones, de las que deriva generalizaciones (axiomas, si lo preferimos así). Por supuesto que hasta los griegos obtuvieron sus axiomas a partir de la observación; el axioma de Euclides según el cual la línea recta es la distancia más corta entre dos puntos, fue juicio intuitivo basado en la experiencia. Pero en tanto que el filósofo griego minimizó el papel desempeñado por la inducción, el científico moderno considera ésta como el proceso esencial en la adquisición del conocimiento, como la única forma de justificar las generalizaciones. Además, concluye que no puede sostenerse ninguna generalización, a menos que sea comprobada una y otra vez por nuevos y más nuevos experimentos, él decir, si resiste los embates de un proceso de inducción siempre renovada.

Este punto de vista general es exactamente lo opuesto al de los griegos. Lejos de ver el mundo real como una representación imperfecta de la verdad ideal, nosotros consideramos las generalizaciones sólo como representaciones imperfectas del mundo real. Sea cual fuere el número de pruebas inductivas de una generalización, ésta podrá ser completa y absolutamente válida. Y aunque millones de observadores tiendan a afirmar una generalización, una sola observación que la contradijera o mostrase su inconsistencia, debería inducir a modificarla. Y sin que importe las veces que una teoría haya resistido las pruebas de forma satisfactoria, no puede existir ninguna certeza de que no será destruida por la observación siguiente.

Por tanto, ésta es la piedra angular de la moderna Filosofía de la Naturaleza. Significa que no hay que enorgullecerse de haber alcanzado la última verdad. De hecho, la frase «última verdad» se transforma en una expresión carente de significado, ya que no existe por ahora ninguna forma que permita realizar suficientes observaciones como para alcanzar la verdad cierta, y, por tanto, «última». Los filósofos griegos no habían reconocido tal limitación. Además, afirmaban que no existía dificultad alguna en aplicar exactamente el mismo método

de razonamiento a la cuestión: « ¿Qué es la justicia?», que a la pregunta: « ¿Qué es la materia?» Por su parte, la Ciencia moderna establece una clara distinción entre ambos tipos de interrogantes. El método inductivo no puede hacer generalizaciones acerca de lo que no puede observar, y, dado que la naturaleza del alma humana, por ejemplo, no es observable todavía por ningún método directo, el asunto queda fuera de la esfera del método inductivo.

La victoria de la Ciencia moderna no fue completa hasta que estableció un principio más esencial, o sea, el intercambio de información libre y cooperador entre todos los científicos. A pesar de que esta necesidad nos parece ahora evidente, no lo era tanto para los filósofos de la Antigüedad y para los de los tiempos medievales. Los pitagóricos de la Grecia clásica formaban una sociedad secreta, que guardaba celosamente para sí sus descubrimientos matemáticos. Los alquimistas de la Edad Media hacían deliberadamente oscuros sus escritos para mantener sus llamados «hallazgos» en el interior de un círculo lo más pequeño y reducido posible. En el siglo XVI, el matemático italiano Nicolo Tartaglia, quien descubrió un método para resolver ecuaciones de tercer grado, no consideró inconveniente tratar de mantener su secreto. Cuando Geronimo Cardano, un joven matemático, descubrió el secreto de Tartaglia y lo publicó como propio, Tartaglia, naturalmente, sintióse ultrajado, pero, aparte la traición de Cardano al reclamar el éxito para él mismo, en realidad mostróse correcto al manifestar que un descubrimiento de este tipo tenía que ser publicado.

Hoy no se considera como tal ningún descubrimiento científico si se mantiene en secreto. El químico inglés Robert Boyle, un siglo después de Tartaglia y Cardano, subrayó la importancia de publicar con el máximo detalle todas las observaciones científicas. Además, una observación o un descubrimiento nuevo no tiene realmente validez, aunque se haya publicado, hasta que por lo menos otro investigador haya repetido y «confirmado» la observación. Hoy la Ciencia no es el producto de los individuos aislados, sino de la «comunidad científica».

Uno de los primeros grupos, y, sin duda, el más famoso, en representar tal comunidad científica fue la «*Royal Society of London for Improving Natural Knowledge*» (Real Sociedad de Londres para el Desarrollo del Conocimiento Natural), conocida en todo el mundo, simplemente, por «Royal Society». Nació,

hacia 1645, a partir de reuniones informales de un grupo de caballeros interesados en los nuevos métodos científicos introducidos por Galileo. En 1660, la «Society» fue reconocida formalmente por el rey Carlos II de Inglaterra.

Los miembros de la «Royal Society» se reunían para discutir abiertamente sus hallazgos y descubrimientos, escribían artículos, más en inglés que en latín, y proseguían animosamente sus experimentos. Sin embargo, se mantuvieron a la defensiva hasta bien superado el siglo XVII. La actitud de muchos de sus contemporáneos eruditos podría ser representada con un dibujo, en cierto modo de factura moderna, que mostrase las sublimes figuras de Pitágoras, Euclides y Aristóteles mirando altivamente hacia abajo, a unos niños jugando a las canicas y cuyo título fuera: «*La Royal Society.*»

Esta mentalidad cambió gracias a la obra de Isaac Newton, el cual fue nombrado miembro de la «Society». A partir de las observaciones y conclusiones de Galileo, del astrónomo danés Tycho Brahe y del astrónomo alemán Johannes Kepler, quien había descrito la naturaleza elíptica de las órbitas de los planetas, Newton llegó, por inducción, a sus tres leyes simples del movimiento y a su mayor generalización fundamental: ley de la gravitación universal. El mundo erudito quedó tan impresionado por este descubrimiento, que Newton fue idolatrado, casi deificado, ya en vida. Este nuevo y majestuoso Universo, construido sobre la base de unas pocas y simples presunciones, hacía aparecer ahora a los filósofos griegos como muchachos jugando con canicas. La revolución que iniciara Galileo a principios del siglo XVII, fue completada, espectacularmente, por Newton, a finales del mismo siglo.

Sería agradable poder afirmar que la Ciencia y el hombre han vivido felizmente juntos desde entonces. Pero la verdad es que las dificultades que oponían a ambos estaban sólo en sus comienzos. Mientras la Ciencia fue deductiva, la Filosofía natural pudo formar parte de la cultura general de todo hombre educado. Pero la Ciencia inductiva representaba una labor inmensa, de observación, estudio y análisis, y dejó de ser un juego para aficionados. Así, la complejidad de la Ciencia se intensificó con las décadas. Durante el siglo posterior a Newton, era posible todavía, para un hombre de grandes dotes, dominar todos los campos del conocimiento científico. Pero esto resultó algo enteramente impracticable a partir de 1800. A

medida que avanzó el tiempo, cada vez fue más necesario para el científico limitarse a una parte del saber, si deseaba profundizar intensamente en él. Se impuso la especialización en la Ciencia, debido a su propio e inexorable crecimiento, y, con cada generación de científicos, esta especialización fue creciendo e intensificándose cada vez más.

Las comunicaciones de los científicos referentes a su trabajo individual nunca han sido tan copiosas ni tan incomprensibles para los profanos. Se ha establecido un léxico de entendimiento válido sólo para los especialistas. Esto ha supuesto un grave obstáculo para la propia Ciencia, para los adelantos básicos en el conocimiento científico, que, a menudo, son producto de la mutua fertilización de los conocimientos de las diferentes especialidades. Y, lo cual es más lamentable aún, la Ciencia ha perdido progresivamente contacto con los profanos. En tales circunstancias, los científicos han llegado a ser contemplados casi como magos y temidos, en lugar de admirados. Y la impresión de que la Ciencia es algo mágico e incomprensible, alcanzable sólo por unos cuantos elegidos, sospechosamente distintos de la especie humana corriente, ha llevado a muchos jóvenes a apartarse del camino científico.

Más aún, durante la década 1960-1970 se hizo perceptible entre los jóvenes, incluidos los de formación universitaria, una intensa reacción, abiertamente hostil, contra la Ciencia. Nuestra sociedad industrializada se funda en los descubrimientos científicos de los dos últimos siglos, y esta misma sociedad descubre que la están perturbando ciertas repercusiones indeseables de su propio éxito.

Las técnicas médicas, cada vez más perfectas, comportan un excesivo incremento de la población; las industrias químicas y los motores de combustión interna están envenenando nuestra atmósfera y nuestra agua, y la creciente demanda de materias primas y energía empobrece y destruye la corteza terrestre. Si el conocimiento crea problemas, es evidente que no podremos resolverlos mediante la ignorancia, lo cual no acaban de comprender quienes optan por la cómoda solución de achacar todo a la «Ciencia» y los «científicos».

Sin embargo, la ciencia moderna no debe ser necesariamente un misterio tan cerrado para los no científicos. Podría hacerse mucho para salvar el abismo si los científicos aceptaran la responsabilidad de la comunicación», explicando lo realizado

en sus propios campos de trabajo, de una forma tan simple y extensa como fuera posible y si, por su parte, los no científicos aceptaran la responsabilidad de prestar atención. Para apreciar satisfactoriamente los logros en un determinado campo de la Ciencia no es preciso tener un conocimiento total de la misma. A fin de cuentas, no se ha de ser capaz de escribir una gran obra literaria para poder apreciar a Shakespeare. Escuchar con placer una sinfonía de Beethoven no requiere, por parte del oyente, la capacidad de componer una pieza equivalente. Por el mismo motivo, se puede incluso sentir placer en los hallazgos de la Ciencia, aunque no se haya tenido ninguna inclinación a sumergirse en el trabajo científico creador.

Pero, podríamos preguntarnos, ¿qué se puede hacer en este sentido? La primera respuesta es la de que uno no puede realmente sentirse a gusto en el mundo moderno, a menos que tenga alguna noción inteligente de lo que trata de conseguir la Ciencia. Pero, además, la iniciación en el maravilloso mundo de la Ciencia causa gran placer estético, inspira a la juventud, satisface el deseo de conocer y permite apreciar las magníficas potencialidades y logros de la mente humana.

Sólo teniendo esto presente, emprendí la redacción de este libro.

## Capítulo 2

### El Universo

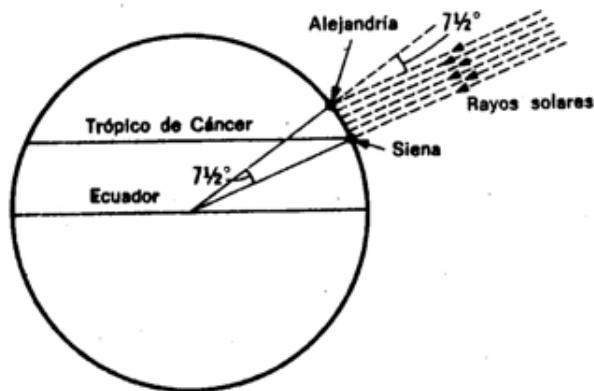
#### Tamaño Del Universo

No existe ninguna indicación en el cielo que permita a un observador casual descubrir su particular lejanía. Los niños no tienen grandes dificultades para aceptar la fantasía que «la vaca saltó por encima de la luna», o que «saltó tan alto, que tocó el cielo». Los antiguos griegos, en su estadio mítico, no consideraban ridículo admitir que el cielo descansaba sobre los hombros de Atlas. Según esto, Atlas tendría que haber sido astronómicamente alto, aunque otro mito sugiere lo contrario. Atlas había sido reclutado por Hércules para que le ayudara a realizar el decimoprimerº de sus doce famosos trabajos: ir en busca *de* las manzanas de oro (¿naranjas?) al Jardín de las Hespérides (¿«el lejano oeste» [España]?). Mientras Atlas realizaba la parte de su trabajo, marchando en busca de las manzanas. Hércules ascendió a la cumbre de una montaña y sostuvo el cielo. Aún suponiendo que Hércules fuese un ser de notables dimensiones, no era, sin embargo, un gigante. De esto se deduce que los antiguos griegos admitían con toda naturalidad la idea que el cielo distaba sólo algunos metros de la cima de las montañas.

Para empezar, no podemos ver como algo ilógica la suposición, en aquellos tiempos, que el cielo era un toldo rígido en el que los brillantes cuerpos celestes estaban engarzados como diamantes. (Así, la Biblia se refiere al cielo como al «firmamento», voz que tiene la misma raíz latina que «firme».) Ya hacia el siglo VI a. de J.C., los astrónomos griegos se percataron que debían de existir varios toldos, pues, mientras las estrellas «fijas» se movían alrededor de la Tierra como si formaran un solo cuerpo, sin modificar aparentemente sus posiciones relativas, esto no ocurría con el Sol, la Luna y los cinco brillantes objetos similares a las estrellas (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno), cada uno de los cuales describía una órbita distinta. Estos siete cuerpos fueron denominados planetas (voz tomada de una palabra griega que significa «errante»), y parecía evidente que no podían estar unidos a la bóveda estrellada.

Los griegos supusieron que cada planeta estaba situado en una bóveda invisible propia, que dichas bóvedas se hallaban dispuestas concéntricamente, y que la más cercana pertenecía al planeta que se movía más rápidamente. El movimiento más rápido era el de la Luna, que recorría el firmamento en 29 días y medio aproximadamente. Más allá se encontraban, ordenadamente alineados (según suponían los griegos), Mercurio, Venus, el Sol, Marte, Júpiter y Saturno.

La primera medición científica de una distancia cósmica fue realizada, hacia el año 240 a. de J.C., por Eratóstenes de Cirene, director de la Biblioteca de Alejandría, por aquel entonces la institución científica más avanzada del mundo, quien apreció el hecho que el 21 de junio, cuando el Sol, al mediodía, se hallaba exactamente en su cenit en la ciudad de Siena (Egipto), no lo estaba también a la misma hora, en Alejandría, unos 750 km al norte de Siena.



*Eratóstenes midió el tamaño de la Tierra a partir de su curvatura. Al mediodía del 21 de junio, el sol se halla exactamente en su cenit en Siena, que se encuentra en el Trópico de Cáncer. Pero, en el mismo instante, los rayos solares caen sobre Alejandría, algo más al Norte, formando un ángulo de 7,5° con la vertical y, por lo tanto, determina la expansión de sombra. Eratóstenes efectuó sus cálculos al conocer la distancia entre las dos ciudades y la longitud de la sombra en Alejandría*

Eratóstenes concluyó que la explicación debía de residir en que la superficie de la Tierra, al ser redonda, estaba siempre más lejos del Sol en unos puntos que en otros. Tomando por base la longitud de la sombra de Alejandría, el mediodía en el solsticio, la ya avanzada Geometría pudo responder a la pregunta relativa a la magnitud en que la superficie de la Tierra se curvaba en el trayecto de los 750 km entre Siena y Alejandría. A partir de este valor pudo calcularse la circunferencia y el

diámetro de la Tierra, suponiendo que ésta tenía una forma esférica, hecho que los astrónomos griegos de entonces aceptaban sin vacilación.

Eratóstenes hizo los correspondientes cálculos (en unidades griegas) y, por lo que podemos juzgar, sus cifras fueron, aproximadamente, de 12.000 km para el diámetro y unos 40.000 para la circunferencia de la Tierra. Así, pues, aunque quizás por casualidad, el cálculo fue bastante correcto. Por desgracia, no prevaleció este valor para el tamaño de la Tierra. Aproximadamente 100 años a. de J.C., otro astrónomo griego, Posidonio de Apamea, repitió la experiencia de Eratóstenes, llegando a la muy distinta conclusión que la Tierra tenía una circunferencia aproximada de 29.000 km.

Este valor más pequeño fue el que aceptó Ptolomeo y, por tanto, el que se consideró válido durante los tiempos medievales. Colón aceptó también esta cifra y, así, creyó que un viaje de 3.000 millas hacia Occidente lo conduciría al Asia. Si hubiera conocido el tamaño real de la Tierra, tal vez no se habría aventurado. Finalmente, en 1521-1523, la flota de Magallanes, o, mejor dicho, el único barco que quedaba de ella- circunnavegó por primera vez la Tierra, lo cual permitió restablecer el valor correcto, calculado por Eratóstenes.

Basándose en el diámetro de la Tierra, Hiparco de Nicea, aproximadamente 150 años a. de J.C., calculó la distancia Tierra-Luna. Utilizó un método sugerido un siglo antes por Aristarco de Samos, el más osado de los astrónomos griegos, los cuales habían supuesto ya que los eclipses lunares eran debidos a que la Tierra se interponía entre el Sol y la Luna. Aristarco descubrió que la curva de la sombra de la Tierra al cruzar por delante de la Luna indicaba los tamaños relativos de la Tierra y la Luna. A partir de esto, los métodos geométricos ofrecían una forma para calcular la distancia a que se hallaba la Luna, en función del diámetro de la Tierra. Hiparco, repitiendo este trabajo, calculó que la distancia de la Luna a la Tierra era 30 veces el diámetro de ésta. Tomando la cifra de Eratóstenes, o sea, 12.000 km, para el diámetro de la Tierra, esto significa que la Luna debía de hallarse a unos 384.000 km de la Tierra. Como vemos, este cálculo es también bastante correcto.

Pero hallar la distancia que nos separa de la Luna fue todo cuanto pudo conseguir la Astronomía griega para resolver el problema de las dimensiones del Universo, por lo menos correctamente. Aristarco realizó también un heroico intento por determinar

la distancia Tierra-Sol. El método geométrico que usó era absolutamente correcto en teoría, pero implicaba la medida de diferencias tan pequeñas en los ángulos que, sin el uso de los instrumentos modernos, resultó ineficaz para proporcionar un valor aceptable. Según esta medición, el Sol se hallaba unas 20 veces más alejado de nosotros que la Luna (cuando, en realidad, lo está unas 400 veces más). En lo tocante al tamaño del Sol, Aristarco dedujo, aunque sus cifras fueron también erróneas- que dicho tamaño debía de ser, por lo menos, unas 7 veces mayor que el de la Tierra, señalando a continuación que era ilógico suponer que el Sol, de tan grandes dimensiones, girase en tomo a nuestra pequeña Tierra, por lo cual decidió, al fin, que nuestro planeta giraba en tomo al Sol.

Por desgracia, nadie aceptó sus ideas. Posteriores astrónomos, empezando por Hiparco y acabando por Claudio Ptolomeo, emitieron toda clase de hipótesis acerca de los movimientos celestes, basándose siempre en la noción de una Tierra inmóvil en el centro del Universo, con la Luna a 384.000 km de distancia y otros cuerpos situados más allá de ésta, a una distancia indeterminada. Este esquema se mantuvo hasta 1543, año en que Nicolás Copérnico publicó su libro, el cual volvió a dar vigencia al punto de vista de Aristarco y destronó para siempre a la Tierra de su posición como centro de Universo.

El simple hecho que el Sol estuviera situado en el centro del Sistema Solar no ayudaba, por sí solo, a determinar la distancia a que se hallaban los planetas. Copérnico adoptó el valor griego aplicado a la distancia Tierra-Luna, pero no tenía la menor idea acerca de la distancia que nos separa del Sol. En 1650, el astrónomo belga Godefroy Wendelin, repitiendo las observaciones de Aristarco con instrumentos más exactos, llegó a la conclusión que el Sol no se encontraba a una distancia 20 veces superior a la de la Luna (lo cual equivaldría a unos 8 millones de kilómetros), sino 240 veces más alejado (esto es, unos 97 millones de kilómetros). Este valor era aún demasiado pequeño, aunque a fin de cuentas, se aproximaba más al correcto que el anterior.

Entretanto, en 1609, el astrónomo alemán Johannes Kepler abría el camino hacia las determinaciones exactas de las distancias con su descubrimiento que las órbitas de los planetas eran elípticas, no circulares. Por vez primera era posible calcular con precisión órbitas planetarias y, además, trazar un mapa, a escala, del Sistema

Solar. Es decir, podían representarse las distancias relativas y las formas de las órbitas de todos los cuerpos conocidos en el Sistema. Esto significaba que si podía determinarse la distancia, en kilómetros, entre dos cuerpos cualesquiera del Sistema, también podrían serlo las otras distancias. Por tanto, la distancia al Sol no precisaba ser calculada de forma directa, como habían intentado hacerlo Aristarco y Wendelin. Se podía conseguir mediante la determinación de la distancia de un cuerpo más próximo, como Marte o Venus, fuera del sistema Tierra-Luna.

Un método que permite calcular las distancias cósmicas implica el uso del paralaje. Es fácil ilustrar lo que significa este término. Mantengamos un dedo a unos 8 cm de nuestros ojos, y observémoslo primero con el ojo izquierdo y luego con el derecho. Con el izquierdo lo veremos en una posición, y con el derecho, en otra. El dedo se habrá desplazado de su posición respecto al fondo y al ojo con que se mire, porque habremos modificado nuestro punto de vista. Y si se repite este procedimiento colocando el dedo algo más lejos, digamos con el brazo extendido, el dedo volverá a desplazarse sobre el fondo, aunque ahora no tanto. Así, la magnitud del desplazamiento puede aplicarse en cada caso para determinar la distancia dedo-ojo. Por supuesto que para un objeto colocado a 15 m, el desplazamiento en la posición, según se observe con un ojo u otro, empezará ya a ser demasiado pequeño como para poderlo medir; entonces necesitamos una «línea de referencia» más amplia que la distancia existente entre ambos ojos. Pero todo cuanto hemos de hacer para ampliar el cambio en el punto de vista es mirar el objeto desde un lugar determinado, luego mover éste unos 6 m hacia la derecha y volver a mirar el objeto. Entonces el paralaje será lo suficientemente grande como para poderse medir fácilmente y determinar la distancia. Los agrimensores recurren precisamente a este método para determinar la distancia a través de una corriente de agua o de un barranco.

El mismo método puede utilizarse para medir la distancia Tierra-Luna, y aquí las estrellas desempeñan el papel de fondo. Vista desde un observatorio en California, por ejemplo, la Luna se hallará en una determinada posición respecto a las estrellas. Pero si la vemos en el mismo momento desde un observatorio en Inglaterra, ocupará una posición ligeramente distinta. Este cambio en la posición, así como la distancia conocida entre los dos observatorios, una línea recta a través

de la Tierra- permite calcular los kilómetros que nos separan de la Luna. Por supuesto que podemos aumentar la línea base haciendo observaciones en puntos totalmente opuestos de la Tierra; en este caso, la longitud de la línea base es de unos 12.000 km. El ángulo resultante de paralaje, dividido por 2, se denomina «paralaje egocéntrico».

El desplazamiento en la posición de un cuerpo celeste se mide en grados o subunidades de grado, minutos o segundos. Un grado es la 1/360 parte del círculo celeste; cada grado se divide en 60 minutos de arco, y cada minuto, en 60 segundos de arco. Por tanto, un minuto de arco es  $1/(360 \times 60)$  o 1/21.600 de la circunferencia celeste, mientras que un segundo de arco es  $1/(21.600 \times 60)$  o 1/1.296.000 de la misma circunferencia.

Con ayuda de la Trigonometría, Claudio Ptolomeo fue capaz de medir la distancia que separa a la Tierra de la Luna a partir de su paralaje, y su resultado concuerda con el valor obtenido previamente por Hiparco. Dedujo que el paralaje geocéntrico de la Luna es de 57 minutos de arco (aproximadamente, 1 grado); el desplazamiento es casi igual al espesor de una moneda de 10 céntimos vista a la distancia de 1,5 m. Éste es fácil de medir, incluso a simple vista. Pero cuando medía el paralaje del Sol o de un planeta, los ángulos implicados eran demasiado pequeños. En tales circunstancias sólo podía llegar a la conclusión que los otros cuerpos celestes se hallaban situados mucho más lejos que la Luna. Pero nadie podía decir cuánto.

Por sí sola, la Trigonometría no podía dar la respuesta, pese al gran impulso que le habían dado los árabes durante la Edad Media y los matemáticos europeos durante el siglo XVI. Pero la medición de ángulos de paralaje pequeños fue posible gracias a la invención del telescopio, que Galileo fue el primero en construir y que apuntó hacia el cielo en 1609, después de haber tenido noticias de la existencia de un tubo amplificador que había sido construido unos meses antes por un holandés fabricante de lentes.

En 1673, el método del paralaje dejó de aplicarse exclusivamente a la Luna, cuando el astrónomo francés, de origen italiano, Jean-Dominique Cassini, obtuvo el paralaje de Marte. En el mismo momento en que determinaba la posición de este planeta respecto a las estrellas, el astrónomo francés Jean Richer, en la Guinea francesa,

hacía idéntica observación. Combinando ambas informaciones, Cassini determinó el paralaje y calculó la escala del Sistema Solar. Así obtuvo un valor de 136 millones de kilómetros para la distancia del Sol a la Tierra, valor que, como vemos, era, en números redondos, un 7 % menor que el actualmente admitido.

Desde entonces se han medido, con creciente exactitud, diversos paralajes en el Sistema Solar. En 1931 se elaboró un vasto proyecto internacional cuyo objeto era el de obtener el paralaje de un pequeño planeta llamado Eros, que en aquel tiempo estaba más próximo a la Tierra que cualquier otro cuerpo celeste, salvo la Luna. En aquella ocasión, Eros mostraba un gran paralaje, que pudo ser medido con notable precisión, y, con ello, la escala del Sistema Solar se determinó con mayor exactitud de lo que lo había sido hasta entonces.

Gracias a estos cálculos, y con ayuda de métodos más exactos aún que los del paralaje, hoy sabemos la distancia que hay del Sol a la Tierra, la cual es de 150.000.000 de kilómetros, distancia que varía más o menos, teniendo en cuenta que la órbita de la Tierra es elíptica.

Esta distancia media se denomina «unidad astronómica» (U.A.), que se aplica también a otras distancias dentro del Sistema Solar. Por ejemplo, Saturno parece hallarse, por término medio, a unos 1.427 millones de kilómetros del sol, 6,15 U.A. A medida que se descubrieron los planetas más lejanos, Urano, Neptuno y Plutón, aumentaron sucesivamente los límites del Sistema Solar. El diámetro extremo de la órbita de Plutón es de 11.745 millones de kilómetros, o 120 U.A. y se conocen algunos cometas que se alejan a mayores distancias aún del Sol.

Hacia 1830 se sabía ya que el Sistema Solar se extendía miles de millones de kilómetros en el espacio, aunque, por supuesto, éste no era el tamaño total del Universo. Quedaban aún las estrellas.

Los astrónomos consideraban como un hecho cierto que las estrellas se hallaban diseminadas por el espacio, y que algunas estaban más próximas que otras, lo cual deducían del simple hecho que algunas de ellas eran más brillantes que otras. Esto significaría que las estrellas más cercanas mostrarían cierto paralaje al ser comparadas con las más remotas. Sin embargo, no pudo obtenerse tal paralaje. Aún cuando los astrónomos utilizaron como línea de referencia el diámetro completo de la órbita terrestre alrededor del Sol (299 millones de kilómetros), observando las

estrellas desde los extremos opuestos de dicha órbita a intervalos de medio año, no pudieron encontrar paralaje alguno. Como es natural, esto significaba que aún las estrellas más próximas se hallaban a enormes distancias. Cuando se fue descubriendo que los telescopios, pese a su progresiva perfección, no lograban mostrar ningún paralaje estelar, la distancia estimada de las estrellas tuvo que aumentarse cada vez más. El hecho que fueran bien visibles, aún a las inmensas distancias a las que debían de hallarse, indicaba, obviamente, que debían de ser enormes esferas de llamas, similares a nuestro Sol.

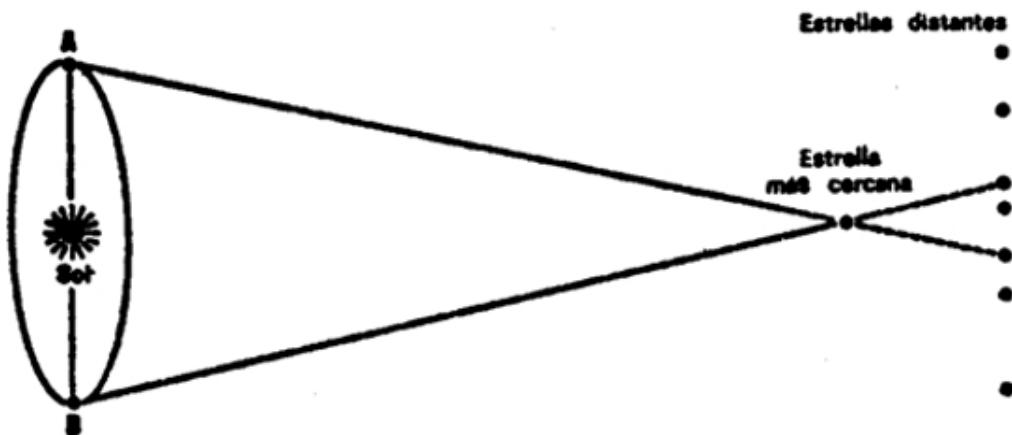
Pero los telescopios y otros instrumentos siguieron perfeccionándose. En 1830, el astrónomo alemán Friedrich Wilhelm Bessel empleó un aparato recientemente inventado, al que se dio el nombre de «heliómetro» («medidor del Sol») por haber sido ideado para medir con gran precisión el diámetro del Sol. Por supuesto que podía utilizarse también para medir otras distancias en el firmamento, y Bessel lo empleó para calcular la distancia entre dos estrellas. Anotando cada mes los cambios producidos en esta distancia, logró finalmente medir el paralaje de una estrella. Eligió una pequeña de la constelación del Cisne, llamada 61 del Cisne, y la escogió porque mostraba, con los años, un desplazamiento inusitadamente grande en su posición, comparada con el fondo de las otras estrellas, lo cual podía significar sólo que se hallaba más cerca que las otras. (Este movimiento constante, aunque muy lento- a través del firmamento, llamado «movimiento propio», no debe confundirse con el desplazamiento, hacia delante y atrás, respecto al fondo, que indica el paralaje.) Bessel estableció las sucesivas posiciones de la 61 del Cisne contra las estrellas vecinas «fijas» (seguramente, mucho más distantes) y prosiguió sus observaciones durante más de un año. En 1838 informó que la 61 del Cisne tenía un paralaje de 0,31 segundos de arco, el espesor de una moneda de 2 reales vista a una distancia de 16 km!-. Este paralaje, observado con el diámetro de la órbita de la Tierra como línea de base, significaba que la 61 del Cisne se hallaba alejada de nuestro planeta 103 billones de km (103.000.000.000.000). Es decir, 9.000 veces la anchura de nuestro Sistema Solar. Así, comparado con la distancia que nos separa incluso de las estrellas más próximas, nuestro Sistema Solar se empequeñece hasta reducirse a un punto insignificante en el espacio.

Debido a que las distancias en billones de kilómetros son inadecuadas para trabajar con ellas, los astrónomos redujeron las cifras, expresando las distancias en términos de la velocidad de la luz (300.000 km/seg). En un año, la luz recorre más de 9 billones de kilómetros. Por tanto esta distancia se denomina «año luz». Expresada en esta unidad, la 61 del Cisne se hallaría, aproximadamente, a 11 años luz de distancia.

Dos meses después del éxito de Bessel, imargin tristemente corto para perder el honor de haber sido el primero!, el astrónomo británico Thomas Henderson informó sobre la distancia que nos separa de la estrella Alfa de Centauro. Esta estrella, situada en los cielos del Sur y no visible desde los Estados Unidos ni desde Europa, es la tercera del firmamento por su brillo. Se puso de manifiesto que la Alfa de Centauro tenía un paralaje de 0,75 segundos de arco, o sea, más de dos veces el de la 61 del Cisne. Por tanto, Alfa de Centauro se hallaba mucho más cerca de nosotros. En realidad, dista sólo 4,3 años luz del Sistema Solar y es nuestro vecino estelar más próximo. Actualmente no es una estrella simple, sino un conjunto de tres.

En 1840, el astrónomo ruso, de origen alemán, Friedrich Wilhelm von Struve comunicó haber obtenido el paralaje de Vega, la cuarta estrella más brillante del firmamento. Su determinación fue, en parte, errónea, lo cual es totalmente comprensible dado que el paralaje de Vega es muy pequeño y se hallaba mucho más lejos (27 años luz).

Hacia 1900 se había determinado ya la distancia de unas 70 estrellas por el método del paralaje (y, hacia 1950, de unas 6.000). Unos 100 años luz es, aproximadamente, el límite de la distancia que puede medirse con exactitud, incluso con los mejores instrumentos. Y, sin embargo, más allá existen aún incontables estrellas, a distancias increíblemente mayores.



*Paralaje de una estrella, medido a partir de puntos opuestos en la órbita de la Tierra alrededor del Sol.*

A simple vista podemos distinguir unas 6.000 estrellas. La invención del telescopio puso claramente de manifiesto que tal cantidad era sólo una visión fragmentaria del Universo. Cuando Galileo, en 1609, enfocó su telescopio hacia los cielos, no sólo descubrió nuevas estrellas antes invisibles, sino que, al observar la Vía Láctea, recibió una profunda impresión. A simple vista, la Vía Láctea es, sencillamente, una banda nebulosa de luz. El telescopio de Galileo reveló que esta banda nebulosa estaba formada por miríadas de estrellas, tan numerosas como los granos de polvo en el talco.

El primer hombre que intentó sacar alguna conclusión lógica de este descubrimiento fue el astrónomo inglés, de origen alemán William Herschel. En 1785, Herschel sugirió que las estrellas se hallaban dispuestas de forma lenticular en el firmamento. Si contemplamos la Vía Láctea, vemos un enorme número de estrellas; pero cuando miramos el cielo en ángulos rectos a esta rueda, divisamos relativamente menor número de ellas. Herschel dedujo de ello que los cuerpos celestes formaban un sistema achataido, con el eje longitudinal en dirección a la Vía Láctea. Hoy sabemos que, dentro de ciertos límites, esta idea es correcta, y llamamos a nuestro sistema estelar Galaxia, otro término utilizado para designar la Vía Láctea (*galaxia*, en griego, significa «leche»).

Herschel intentó valorar el tamaño de la Galaxia. Empezó por suponer que todas las estrellas tenían, aproximadamente, el mismo brillo intrínseco, por lo cual podría deducirse la distancia relativa de cada una a partir de su brillo. (De acuerdo con una

ley bien conocida, la intensidad del brillo disminuye con el cuadrado de la distancia, de tal modo que si la estrella *A* tiene la novena parte del brillo de la estrella *B*, debe hallarse tres veces más lejos que la *B*.)

El recuento de muestras de estrellas en diferentes puntos de la Vía Láctea permitió a Herschel estimar que debían de existir unos 100 millones de estrellas en toda la Galaxia. Y por los valores de su brillo decidió que el diámetro de la Galaxia era de unas 850 veces la distancia a la brillante estrella Sirio, mientras que su espesor correspondía a 155 veces aquella distancia.

Hoy sabemos que la distancia que nos separa de Sirio es de 8,8 años luz, de tal modo que, según los cálculos de Herschel, la Galaxia tendría unos 7.500 años luz de diámetro y 1.300 años luz de espesor. Esto resultó ser demasiado conservador. Sin embargo, al igual que la medida súper conservadora de Aristarco de la distancia que nos separa del Sol, supuso un paso dado en la dirección correcta. (Además, Herschel utilizó sus estadísticas para demostrar que el Sol se movía a una velocidad de 19 km/seg hacia la constelación de Hércules. Después de todo, el Sol se movía, pero no como habían supuesto los griegos.)

A partir de 1906, el astrónomo holandés Jacobo Cornelio Kapteyn efectuó otro estudio de la Vía Láctea. Tenía a su disposición fotografías y conocía la verdadera distancia de las estrellas más próximas, de modo que podía hacer un cálculo más exacto que Herschel. Kapteyn decidió que las dimensiones de la Galaxia eran de 2.000 años luz por 6.000. Así, el modelo de Kapteyn de la Galaxia era 4 veces más ancho y 5 veces más denso que el de Herschel. Sin embargo, aún resultaba demasiado conservador.

En resumen, hacia 1900 la situación respecto a las distancias estelares era la misma que, respecto a las planetarias, en 1700. En este último año se sabía ya la distancia que nos separa de la Luna, pero sólo podían sospecharse las distancias hasta los planetas más lejanos. En 1900 se conocía la distancia de las estrellas más próximas, pero sólo podía conjeturarse la que existía hasta las estrellas más remotas.

El siguiente paso importante hacia delante fue el descubrimiento de un nuevo patrón de medida, ciertas estrellas variables cuyo brillo oscilaba. Esta parte de la Historia empieza con una estrella, muy brillante, llamada Delta de Cefeo, en la constelación de Cefeo. Un detenido estudio reveló que el brillo de dicha estrella

variaba en forma cíclica: se iniciaba con una fase de menor brillo, el cual se duplicaba rápidamente, para atenuarse luego de nuevo lentamente, hasta llegar a su punto menor. Esto ocurría una y otra vez con gran regularidad. Los astrónomos descubrieron luego otra serie de estrellas en las que se observaba el mismo brillo cíclico, por lo cual, en honor de la Delta de Cefeo, fueron bautizadas con el nombre de «cefeidas variables» o, simplemente, «cefeidas».

Los períodos de las cefeidas, o sea, los intervalos de tiempo transcurridos entre los momentos de menor brillo- oscilan entre menos de un día y unos dos meses como máximo. Las más cercanas a nuestro Sol parecen tener un período de una semana aproximadamente. El período de la Delta de Cefeo es de 5,3 días, mientras que el de la cefeida más próxima (nada menos que la Estrella Polar) es de 4 días. Sin embargo, la Estrella Polar varía sólo muy ligeramente en su luminosidad; no lo hace con la suficiente intensidad como para que pueda apreciarse a simple vista.

La importancia de las cefeidas para los astrónomos radica en su brillo, punto éste que requiere cierta digresión.

Desde Hiparco, el mayor o menor brillo de las estrellas se llama «magnitud». Cuanto más brillante es un astro, menor es su magnitud. Se dice que las 20 estrellas más brillantes son de «primera magnitud». Otras menos brillantes son de «segunda magnitud». Siguen luego las de tercera, cuarta y quinta magnitud, hasta llegar a las de menor brillo, que apenas son visibles, y que se llaman de «sexta magnitud».

En tiempos modernos, en 1856, para ser exactos, la noción de Hiparco fue cuantificada por el astrónomo inglés Norman Robert Pogson, el cual demostró que la estrella media de primera magnitud era, aproximadamente, unas 100 veces más brillante que la estrella media de sexta magnitud. Si se considera este intervalo de 5 magnitudes como un coeficiente de la centésima parte de brillo, el coeficiente para una magnitud sería de 2,512. Una estrella de magnitud 4 es de 2,512 veces más brillante que una de magnitud 5, y  $2,512 \times 2,512$ , o sea, aproximadamente 6,3 veces más brillante que una estrella de sexta magnitud.

Entre las estrellas, la 61 del Cisne tiene escaso brillo, y su magnitud es de 5,0 (los métodos astronómicos modernos permiten fijar las magnitudes hasta la décima e incluso hasta la centésima en algunos casos). Capella es una estrella brillante, de

magnitud 0,9; Alta de Centauro, más brillante, tiene una magnitud de 0,1. Los brillos todavía mayores se llaman de magnitud 0, e incluso se recurre a los números negativos para representar brillos extremos. Por ejemplo, Sirio, la estrella más brillante del cielo, tiene una magnitud de, 1,6. La del planeta Venus es de, 6; la de la Luna llena, de, 12; la del Sol, de, 26.

Éstas son las «magnitudes aparentes» de las estrellas, tal como las vemos, no sus luminosidades absolutas, independientes de la distancia-. Pero si conocemos la distancia de una estrella y su magnitud aparente, podemos calcular su verdadera luminosidad. Los astrónomos basaron la escala de las «magnitudes absolutas» en el brillo a una distancia tipo, que ha sido establecido en 10 «pársecs», o 32,6 años luz. (El «pársec» es la distancia a la que una estrella mostraría un paralaje de menos de 1 segundo de arco; corresponde a algo más de 28 billones de kilómetros, o 3,26 años luz.)

Aunque el brillo de Capella es menor que el de la Alfa de Centauro y Sirio, en realidad es un emisor mucho más poderoso de luz que cualquiera de ellas. Simplemente ocurre que está situada mucho más lejos. Si todas ellas estuvieran a la distancia tipo, Capella sería la más brillante de las tres. En efecto, ésta tiene una magnitud absoluta de -0,1; Sirio, de 1,3, y Alfa de Centauro, de 4,8. Nuestro Sol es tan brillante como la Alfa de Centauro, con una magnitud absoluta de 4,86. Es una estrella corriente de tamaño mediano.

Pero volvamos a las cefeidas. En 1912, Miss Henrietta Leavitt, astrónomo del Observatorio de Harvard, estudió la más pequeña de las Nubes de Magallanes, dos inmensos sistemas estelares del hemisferio Sur, llamadas así en honor de Fernando de Magallanes, que fue el primero en observarlas durante su viaje alrededor del mundo-. Entre las estrellas de la Nube de Magallanes Menor, Miss Leavitt detectó un total de 25 cefeidas. Registró el período de variación de cada una y, con gran sorpresa, comprobó que cuanto mayor era el período, más brillante era la estrella.

Esto no se observaba en las cefeidas variables más próximas a nosotros. ¿Por qué ocurría en la Nube de Magallanes Menor? En nuestras cercanías conocemos sólo las magnitudes aparentes de las cefeidas, pero no sabemos las distancias a que se hallan ni su brillo absoluto, y, por tanto, no disponemos de una escala para relacionar el período de una estrella con su brillo. Pero en la Nube de Magallanes

Menor ocurre como si todas las estrellas estuvieran aproximadamente a la misma distancia de nosotros, debido a que la propia nebulosa se halla muy distante. Esto puede compararse con el caso de una persona que, en Nueva York, intentara calcular su distancia respecto a cada una de las personas que se hallan en Chicago; llegaría a la conclusión que todos los habitantes de Chicago se hallan, aproximadamente, a la misma distancia de él, pues ¿qué importancia puede tener una diferencia de unos cuantos kilómetros en una distancia total de millares? De manera semejante, una estrella observada en el extremo más lejano de la nebulosa, no se halla significativamente más lejos de nosotros que otra vista en el extremo más próximo.

Podríamos tomar la magnitud aparente de todas las estrellas de la Nube de Magallanes Menor que se hallan aproximadamente a la misma distancia de nosotros, como una medida de su magnitud absoluta comparativa. Así, Miss Leavitt pudo considerar verdadera la relación que había apreciado, o sea, que el período de las cefeidas variables aumentaba progresivamente al hacerlo su magnitud absoluta. De esta manera logró establecer una «curva de período-luminosidad», gráfica que mostraba el período que debía tener una cefeida de cualquier magnitud absoluta y, a la inversa, qué magnitud absoluta debía tener una cefeida de un período dado.

Si las cefeidas se comportaban en cualquier lugar del Universo como lo hacían en la Nube de Magallanes Menor (suposición razonable), los astrónomos podrían disponer de una escala relativa para medir las distancias, siempre que las cefeidas pudieran ser detectadas con los telescopios más potentes. Si se descubrían dos cefeidas que tuvieran idénticos períodos, podría suponerse que ambas tenían la misma magnitud absoluta. Si la cefeida *A* se mostraba 4 veces más brillante que la *B*, esto significaría que esta última se hallaba dos veces más lejos de nosotros. De este modo podrían señalarse, sobre un mapa a escala, las distancias relativas de todas las cefeidas observables. Ahora bien, si pudiera determinarse la distancia real de una tan sólo de las cefeidas, podrían calcularse las distancias de todas las restantes.

Por desgracia, incluso la cefeida más próxima, la Estrella Polar, dista de nosotros cientos de años luz, es decir, se encuentra a una distancia demasiado grande como para ser medida por paralaje. Pero los astrónomos han utilizado también métodos menos directos. Un dato de bastante utilidad era el movimiento propio: por término

medio, cuanto más lejos de nosotros está una estrella, tanto menor es su movimiento propio. (Recuérdese que Bessel indicó que la 61 del Cisne se hallaba relativamente cercana, debido a su considerable movimiento propio.) Se recurrió a una serie de métodos para determinar los movimientos propios de grupos de estrellas y se aplicaron métodos estadísticos. El procedimiento era complicado, pero los resultados proporcionaron las distancias aproximadas de diversos grupos de estrellas que contenían cefeidas. A partir de las distancias y magnitudes aparentes de estas cefeidas, se determinaron sus magnitudes absolutas, y éstas pudieron compararse con los períodos.

En 1913, el astrónomo danés Ejnar Hertzsprung comprobó que una cefeida de magnitud absoluta, 2.3 tenía un periodo de 6.6 días. A partir de este dato, y utilizando la curva de luminosidad-período de Miss Leavitt, pudo determinarse la magnitud absoluta de cualquier cefeida. (Incidentalmente se puso de manifiesto que las cefeidas solían ser estrellas grandes, brillantes, mucho más luminosas que nuestro Sol, Las variaciones en su brillo probablemente eran el resultado de su titileo. En efecto, las estrellas parecían expansionarse y contraerse de una manera incesante, como si estuvieran inspirando y espirando poderosamente. )

Pocos años más tarde, el astrónomo americano Harlow Shapley repitió el trabajo y llegó a la conclusión que una cefeida de magnitud absoluta, 2.3 tenía un período de 5.96 días. Los valores concordaban lo suficiente como para permitir que los astrónomos siguieran adelante. Ya tenían su patrón de medida.

En 1918, Shapley empezó a observar las cefeidas de nuestra Galaxia, al objeto de determinar con su nuevo método el tamaño de ésta. Concentró su atención en las cefeidas descubiertas en los grupos de estrellas llamados «cúmulos globulares», agregados esféricos, muy densos, de decenas de miles a decenas de millones de estrellas, con diámetros del orden de los 100 años luz.

Estos agregados, cuya naturaleza descubrió por vez primera Herschel un siglo antes- presentaban un medio ambiente astronómico distinto por completo del que existía en nuestra vecindad en el espacio. En el centro de los cúmulos más grandes, las estrellas se hallaban apretadamente dispuestas, con una densidad de 500/10 pársecs, a diferencia de la densidad observada en nuestra vecindad, que es de 1/10 pársec. En tales condiciones, la luz de las estrellas representa una intensidad

luminosa mucho mayor que la luz de la Luna sobre la Tierra, y, así, un planeta situado en el centro de un cúmulo de este tipo no conocería la noche.

Hay aproximadamente un centenar de cúmulos globulares conocidos en nuestra galaxia, y tal vez haya otros tantos que aún no han sido detectados. Shapley calculó la distancia a que se hallaban de nosotros los diversos cúmulos globulares, y sus resultados fueron de 20.000 a 200.000 años luz. (El cúmulo más cercano, al igual que la estrella más próxima, se halla en la constelación de Centauro. Es observable a simple vista como un objeto similar a una estrella, el Omega de Centauro. El más distante, el NGC 2419, se halla tan lejos de nosotros que apenas puede considerarse como un miembro de la Galaxia.)

Shapley observó que los cúmulos estaban distribuidos en el interior de una gran esfera, que el plano de la Vía Láctea cortaba por la mitad; rodeaban una porción del cuerpo principal de la Galaxia, formando un halo. Shapley llegó a la suposición natural que rodeaban el centro de la Galaxia. Sus cálculos situaron el punto central de este halo de agregados globulares en el seno de la Vía Láctea, hacia la constelación de Sagitario, y a unos 50.000 años luz de nosotros. Esto significaba que nuestro Sistema Solar, en vez de hallarse en el centro de la Galaxia, como habían supuesto Herschel y Kapteyn, estaba situado a considerable distancia de éste, en uno de sus márgenes.

El modelo de Shapley imaginaba la Galaxia como una lente gigantesca de unos 300.000 años luz de diámetro. Esta vez se había valorado en exceso su tamaño, como se demostró poco después con otro método de medida.

Partiendo del hecho que la Galaxia tiene una forma lenticular, los astrónomos, desde William Herschel en adelante- supusieron que giraba en el espacio. En 1926, el astrónomo holandés Jan Oort intentó medir esta rotación. Ya que la Galaxia no es un objeto sólido, sino que está compuesto por numerosas estrellas individuales, no es de esperar que gire como lo haría una rueda. Por el contrario, las estrellas cercanas al centro gravitatorio del disco girarán en torno a él con mayor rapidez que las que estén más alejadas (al igual que los planetas más próximos al Sol describen unas órbitas más rápidas). Esto significaría que las estrellas situadas hacia el centro de la Galaxia (es decir, en dirección a Sagitario) girarían por delante de nuestro Sol, mientras que las más alejadas del centro (En dirección a la constelación de Géminis)

se situarían detrás de nosotros en su movimiento giratorio. Y cuanto más alejada estuviera una estrella de nosotros, mayor sería esta diferencia de velocidad.

Basándose en estas suposiciones fue posible calcular la velocidad de rotación, alrededor del centro galáctico, a partir de los movimientos relativos de las estrellas. Se puso de manifiesto que el Sol y las estrellas próximas viajan a unos 225 km por segundo respecto al centro de la Galaxia y llevan a cabo una revolución completa en torno a dicho centro en unos 200 millones de años. (El Sol describe una órbita casi circular, mientras que algunas estrellas, tales como Arturo, lo hacen más bien de forma elíptica. El hecho que las diversas estrellas no describan órbitas perfectamente paralelas, explica el desplazamiento relativo del Sol hacia la constelación de Hércules.)

Una vez obtenido un valor para la velocidad de rotación, los astrónomos estuvieron en condiciones de calcular la intensidad del campo gravitatorio del centro de la Galaxia, y, por tanto, su masa. El centro de la Galaxia (que encierra la mayor parte de la masa de ésta) resultó tener una masa 100 mil millones de veces mayor que nuestro Sol. Ya que éste es una estrella de masa media, nuestra Galaxia contendría, por tanto, unos 100 a 200 mil millones de estrellas (o sea, más de 2.000 veces el valor calculado por Herschel).

También era posible, a partir de la curvatura de las órbitas de las estrellas en movimiento rotatorio, situar la posición del centro en torno al cual giran. De este modo se ha confirmado que el centro de la Galaxia está localizado en dirección a Sagitario, tal como comprobó Shapley, pero sólo a 27.000 años luz de nosotros, y el diámetro total de la Galaxia resulta ser de 100.000 años luz, en vez de los 300.000 calculados por dicho astrónomo. En este nuevo modelo, que ahora se considera como correcto, el espesor del disco es de unos 2.000 años luz en el centro, espesor que se reduce notablemente en los márgenes: a nivel de nuestro Sol, que está situado a los dos tercios de la distancia hasta el margen extremo, el espesor del disco aparece, aproximadamente, como de 3.000 años luz. Pero esto sólo pueden ser cifras aproximadas, debido a que la Galaxia no tiene límites claramente definidos.

Si el Sol está situado tan cerca del borde de la Galaxia, ¿por qué la Vía Láctea no nos parece mucho más brillante en su parte central que en la dirección opuesta,

hacia los bordes? Mirando hacia Sagitario, es decir, observando el cuerpo principal de la Galaxia, contemplamos unos 100 mil millones de estrellas, en tanto que en el margen se encuentran sólo unos cuantos millones de ellas, ampliamente distribuidas. Sin embargo, en cualquiera de ambas direcciones, la Vía Láctea parece tener casi el mismo brillo. La respuesta a esta contradicción parece estar en el hecho que inmensas nubes de polvo nos ocultan gran parte del centro de la Galaxia. Aproximadamente la mitad de la masa de los márgenes puede estar compuesta por tales nubes de polvo y gas. Quizá no veamos más de la 1/10.000 parte, como máximo, de la luz del centro de la Galaxia.

Esto explica por qué Herschel y otros, entre los primeros astrónomos que la estudiaron, cayeron en el error de considerar que nuestro Sistema Solar se hallaba en el centro de la Galaxia, y parece explicar también por qué Shapley sobrevaloró inicialmente su tamaño. Algunos de los agregados que estudió estaban oscurecidos por el polvo interpuesto entre ellos y el observador, por lo cual las cefeidas contenidas en los agregados aparecían amortiguadas y, en consecuencia, daban la sensación de hallarse más lejos de lo que estaban en realidad.

Ya antes que se hubieran determinado las dimensiones y la masa de nuestra Galaxia, las cefeidas variables de las Nubes de Magallanes (en las cuales Miss Leavitt realizó el crucial descubrimiento de la curva de luminosidad-período) fueron utilizadas para determinar la distancia que nos separaba de tales Nubes. Resultaron hallarse a más de 100.000 años luz de nosotros. Las cifras modernas más exactas sitúan a la Nube de Magallanes Mayor a unos 150.000 años luz de distancia, y la Menor, a unos 170.000 años luz. La Nube Mayor tiene un diámetro no superior a la mitad del tamaño de nuestra Galaxia, mientras que el de la Menor es la quinta parte de dicha Galaxia. Además, parecen tener una menor densidad de estrellas. La Mayor tiene cinco mil millones de estrellas (sólo la 1/20 parte o menos de las contenidas en nuestra Galaxia), mientras que la Menor tiene sólo 1,5 miles de millones.

Éste era el estado de nuestros conocimientos hacia los comienzos de 1920. El Universo conocido tenía un diámetro inferior a 200.000 años luz y constaba de nuestra Galaxia y sus dos vecinos. Luego surgió la cuestión de si existía algo más allá.

Resultaban sospechosas ciertas pequeñas manchas de niebla luminosa, llamadas nebulosas (de la voz griega para designar la «nube»), que desde hacía tiempo habían observado los astrónomos. Hacia el 1800, el astrónomo francés Charles Messier había catalogado 103 de ellas (muchas se conocen todavía por los números que él les asignó, precedidas por la letra «M», de Messier).

Estas manchas nebulosas, ¿eran simplemente nubes, como indicaba su apariencia? Algunas, tales como la nebulosa de Orión (descubierta en 1656 por el astrónomo holandés Christian Huygens), parecían en realidad ser sólo eso. Una nube de gas o polvo, de masa igual a unos 500 soles del tamaño del nuestro, e iluminada por estrellas nebulosas que se movían en su interior. Otras resultaron ser cúmulos globulares, enormes agregados- de estrellas.

Pero seguía habiendo manchas nebulosas brillantes que parecían no contener ninguna estrella. En tal caso, ¿por qué eran luminosas? En 1845, el astrónomo británico William Parsons (tercer conde de Rosse), utilizando un telescopio de 72 pulgadas, a cuya construcción dedicó buena parte de su vida, comprobó que algunas de tales nebulosas tenían una estructura en espiral, por lo que se denominaron «nebulosas espirales». Sin embargo, esto no ayudaba a explicar la fuente de su luminosidad.

La más espectacular de estas nebulosas, llamada M-31, o Nebulosa de Andrómeda (debido a que se encuentra en la constelación homónima), la estudió por vez primera, en 1612, el astrónomo alemán Simon Marius. Es un cuerpo luminoso tenue, ovalado y alargado, que tiene aproximadamente la mitad del tamaño de la Luna llena. ¿Estaría constituida por estrellas tan distantes, que no se pudieran llegar a identificar, ni siquiera con los telescopios más potentes? Si fuera así, la Nebulosa de Andrómeda debería de hallarse a una distancia increíble y, al mismo tiempo, tener enormes dimensiones para ser visible a tal distancia. (Ya en 1755, el filósofo alemán Immanuel Kant había especulado sobre la existencia de tales acumulaciones de estrellas lejanas, que denominó «universos-islas».)

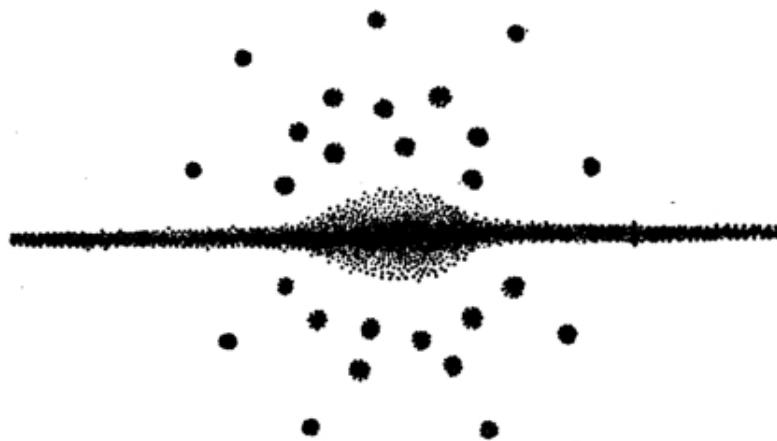
En 1924, el astrónomo americano Edwin Powell Hubble dirigió hacia la Nebulosa de Andrómeda el nuevo telescopio de 100 pulgadas instalado en el Monte Wilson, California. El nuevo y poderoso instrumento permitió comprobar que porciones del borde externo de la nebulosa eran estrellas individuales. Esto reveló definitivamente

que la Nebulosa de Andrómeda, o al menos parte de ella, se asemejaba a la Vía Láctea, y que quizá pudiera haber algo de cierto en la idea kantiana de los «universos-islas».

Entre las estrellas situadas en el borde de la Nebulosa de Andrómeda había cefeidas variables. Con estos patrones de medida se determinó que la Nebulosa se hallaba, aproximadamente, a un millón de años luz de distancia. Así, pues, la Nebulosa de Andrómeda se encontraba lejos, muy lejos de nuestra Galaxia. A partir de su distancia, su tamaño aparente reveló que debía de ser un gigantesco conglomerado de estrellas, el cual rivalizaba casi con nuestra propia Galaxia.

Otras nebulosas resultaron ser también agrupaciones de estrellas, más distantes aún que la Nebulosa de Andrómeda. Estas «nebulosas extragalácticas» fueron reconocidas en su totalidad como galaxias, nuevos universos que reducen el nuestro a uno de los muchos en el espacio. De nuevo se había dilatado el Universo. Era más grande que nunca. Se trataba no sólo de cientos de miles de años luz, sino, quizás, de centenares de millones.

Hacia la década iniciada con el 1930, los astrónomos se vieron enfrentados con varios problemas, al parecer insolubles, relativos a estas galaxias. Por un lado, y partiendo de las distancias supuestas, todas las galaxias parecían ser mucho más pequeñas que la nuestra. Así, vivíamos en la galaxia mayor del Universo. Por otro lado, las acumulaciones globulares que rodeaban a la galaxia de Andrómeda parecían ser sólo la mitad o un tercio menos luminosas que las de nuestra Galaxia. (Andrómeda es, poco más o menos, tan rica como nuestra Galaxia en agregados globulares, y éstos se hallan dispuestos esféricamente en torno al centro de la misma. Esto parece demostrar que era razonable la suposición de Shapley, según la cual las acumulaciones de nuestra galaxia estaban colocadas de la misma manera. Algunas galaxias son sorprendentemente ricas en acumulaciones globulares. La M-87, de Virgo, posee, al menos, un millar.)



*Un modelo de nuestra Galaxia, visto de lado. En torno a la porción central de la Galaxia se encuentran conglomerados globulares. Se indica la posición de nuestro Sol con un signo +.*

El hecho más incongruente era que las distancias de las galaxias parecían implicar que el Universo tenía una antigüedad de sólo unos 2 mil millones de años (por razones que veremos más adelante, en este mismo capítulo). Esto era sorprendente, ya que los geólogos consideraban que la Tierra era aún más vieja, basándose en lo que se consideraba como una prueba incontrovertible.

La posibilidad de una respuesta se perfiló durante la Segunda Guerra Mundial, cuando el astrónomo americano, de origen alemán, Walter Baade, descubrió que era erróneo el patrón con el que se medían las distancias de las Galaxias.

En 1942 fue provechoso para Baade el hecho que se apagaron las luces de Los Ángeles durante la guerra, lo cual hizo más nítido el cielo nocturno en el Monte Wilson y permitió un detenido estudio de la galaxia de Andrómeda con el telescopio Hooker de 100 pulgadas, (llamado así en honor de John B. Hooker, quien financió su construcción.) Al mejorar la visibilidad pudo distinguir algunas de las estrellas en las regiones más internas de la galaxia. Inmediatamente apreció algunas diferencias llamativas entre estas estrellas y las que se hallaban en las capas externas de la galaxia. Las estrellas más luminosas del interior eran rojas, mientras que las de las capas externas eran azuladas. Además, los gigantes rojos del interior no eran tan brillantes como los gigantes azules de las capas externas; estos últimos tenían hasta 100.000 veces la luminosidad de nuestro Sol, mientras que los del interior

poseían sólo unas 1.000 veces aquella luminosidad. Finalmente, las capas externas, donde se hallaban las estrellas azules brillantes, estaban cargadas de polvo, mientras que el interior, con sus estrellas rojas, algo menos brillantes- estaba libre de polvo.

Para Baade parecían existir dos clases de estrellas, de diferentes estructura e historia. Denominó a las estrellas azuladas de las capas externas Población I, y a las rojizas del interior, Población II. Se puso de manifiesto que las estrellas de la Población I eran relativamente jóvenes, tenían un elevado contenido en metal y seguían órbitas casi circulares en torno al centro galáctico, en el plano medio de la galaxia. Por el contrario, las estrellas de la Población II eran relativamente antiguas, poseían un bajo contenido metálico, y sus órbitas, sensiblemente elípticas, mostraban una notable inclinación al plano medio de la galaxia. Desde el descubrimiento de Baade, ambas Poblaciones han sido divididas en subgrupos más precisos.

Cuando, después de la guerra, se instaló el nuevo telescopio Hale, de 200 pulgadas (así llamado en honor del astrónomo americano George Ellery Hale, quien supervisó su construcción), en el Monte Palomar, Baade prosiguió sus investigaciones. Halló ciertas irregularidades en la distribución de las dos Poblaciones, irregularidades que dependían de la naturaleza de las galaxias implicadas. Las galaxias de la clase «elíptica», sistemas en forma de elipse y estructura interna más bien uniforme- estaban aparentemente constituidas, sobre todo, por estrellas de la Población II, como los agregados globulares en cualquier galaxia. Por otra parte, en las «galaxias espirales», los brazos de la espiral estaban formados por estrellas de la Población I, con una Población II en el fondo.

Se estima que sólo un 2 % de las estrellas en el Universo son del tipo de la Población I. Nuestro Sol y las estrellas familiares en nuestra vecindad pertenecen a esta clase. Y a partir de este hecho, podemos deducir que la nuestra es una galaxia espiral y que nos encontramos en uno de sus brazos. (Esto explica por qué existen tantas nubes de polvo, luminosas y oscuras en nuestras proximidades, ya que los brazos espirales de una galaxia se hallan cargados de polvo.) Las fotografías muestran que la galaxia de Andrómeda, es también del tipo espiral.

Pero volvamos de nuevo al problema del patrón. Baade empezó a comparar las estrellas cefeidas halladas en las acumulaciones globulares (Población II), con las observadas en el brazo de la espiral en que nos hallamos (Población I). Se puso de manifiesto que las cefeidas de las dos Poblaciones eran, en realidad, de dos tipos distintos, por lo que se refería a la relación período-luminosidad.

Las cefeidas de la Población II mostraban la curva período-luminosidad establecida por Leavitt y Shapley. Con este patrón, Shapley había medido exactamente las distancias a las acumulaciones globulares y el tamaño de nuestra Galaxia. Pero las cefeidas de la Población I seguían un patrón de medida totalmente distinto. Una cefeida de la Población I era de 4 a 5 veces más luminosa que otra de la Población II del mismo período. Esto significaba que el empleo de la escala de Leavitt determinaría un cálculo erróneo en la magnitud absoluta de una cefeida de la Población I a partir de su período. Y si la magnitud absoluta era errónea, el cálculo de la distancia lo sería también necesariamente; la estrella se hallaría, en realidad, mucho más lejos de lo que indicaba su cálculo.

Hubble calculó la distancia de la galaxia de Andrómeda, a partir de las cefeidas (de la Población I), en sus capas externas, las únicas que pudieron ser distinguidas en aquel entonces. Pero luego, con el patrón revisado, resultó que la Galaxia se hallaba, aproximadamente, a unos 2,5 millones de años luz, en vez de menos de 1 millón, que era el cálculo anterior. De la misma forma se comprobó que otras galaxias se hallaban también, de forma proporcional, más alejadas de nosotros. (Sin embargo, la galaxia de Andrómeda sigue siendo un vecino cercano nuestro. Se estima que la distancia media entre las galaxias es de unos 20 millones de años luz.)

En resumen, el tamaño del Universo conocido se había duplicado ampliamente. Esto resolvió enseguida los problemas que se habían planteado en los años 30. Nuestra Galaxia ya no era la más grande de todas; por ejemplo, la de Andrómeda era mucho mayor. También se ponía de manifiesto que las acumulaciones globulares de la galaxia de Andrómeda eran tan luminosas como las nuestras; se veían menos brillantes sólo porque se había calculado de forma errónea su distancia. Finalmente, y por motivos que veremos más adelante, la nueva escala de distancias permitió considerar el Universo como mucho más antiguo, al menos, de 5 mil millones de

años, lo cual ofreció la posibilidad de llegar a un acuerdo con las valoraciones de los geólogos sobre la edad de la Tierra.

Pero la duplicación de la distancia a que se hallan las galaxias no puso punto final al problema del tamaño. Veamos ahora la posibilidad que haya sistemas aún más grandes, acumulaciones de galaxias y súper galaxias.

Actualmente, los grandes telescopios han revelado que, en efecto, hay acumulaciones de galaxias. Por ejemplo, en la constelación de la Cabellera de Berenice existe una gran acumulación elipsoidal de galaxias, cuyo diámetro es de unos 8 millones de años luz. La «acumulación de la Cabellera» encierra unas 11.000 galaxias, separadas por una distancia media de sólo 300.000 años luz (frente a la media de unos 3 millones de años luz que existe entre las galaxias vecinas nuestras).

Nuestra Galaxia parece formar parte de una «acumulación local» que incluye las Nubes de Magallanes, la galaxia de Andrómeda y tres pequeñas «galaxias satélites» próximas a la misma, más algunas otras pequeñas galaxias, con un total de aproximadamente 19 miembros. Dos de ellas, llamadas «Maffei I» y «Maffei II» (en honor de Paolo Maffei, el astrónomo italiano que informó sobre las mismas por primera vez) no se descubrieron hasta 1971. La tardanza de tal descubrimiento se debió al hecho que sólo pueden detectarse a través de las nubes de polvo interpuestas entre las referidas galaxias y nosotros.

De las acumulaciones locales, sólo nuestra Galaxia, la de Andrómeda y las dos de Maffei son gigantes; las otras son enanas. Una de ellas, la IC 1613, quizás contenga sólo 60 millones de estrellas; por tanto, sería apenas algo más que un agregado globular. Entre las galaxias, lo mismo que entre las estrellas, las enanas rebasan ampliamente en número a las gigantes.

Si las galaxias forman acumulaciones y acumulaciones de acumulaciones, ¿significa esto que el Universo se expande sin límites y que el espacio es infinito? ¿O existe quizás un final, tanto para el Universo como para el espacio? Pues bien, los astrónomos pueden descubrir objetos situados a unos 9 mil millones de años luz, y hasta ahora no hay indicios que exista un final del Universo. Teóricamente pueden esgrimirse argumentos tanto para admitir que el espacio tiene un final, como para decir que no lo tiene; tanto para afirmar que existe un comienzo en el tiempo, como

para oponer la hipótesis de un no comienzo. Habiendo, pues, considerado el espacio, permítasenos ahora exponer el tiempo.

### Nacimiento Del Universo

Los autores de mitos inventaron muchas y peregrinas fábulas relativas a la creación del Universo (tomando, por lo general, como centro, la Tierra, y calificando ligeramente lo demás como el «cielo» o el «firmamento»). La época de la Creación no suele situarse en tiempos muy remotos (si bien hemos de recordar que, para el hombre anterior a la Ilustración, un período de 1.000 años era más impresionante que uno de 1.000 millones de años para el hombre de hoy).

Por supuesto que la historia de la creación con la que estamos más familiarizados es la que nos ofrecen los primeros capítulos del Génesis, pletóricos de belleza poética y de grandiosidad moral, teniendo en cuenta su origen.

En repetidas ocasiones se ha intentado determinar la fecha de la Creación basándose en los datos de la Biblia (los reinados de los diversos reyes; el tiempo transcurrido desde el Éxodo hasta la construcción del templo de Salomón; la Edad de los Patriarcas, tanto antediluvianos como postdiluvianos). Según los judíos medievales eruditos, la Creación se remontaría al 3760 a. de J.C., y el calendario judío cuenta aún sus años a partir de esta fecha. En el 1658 de nuestra Era, el arzobispo James Ussher, de la Iglesia Anglicana, calculó que la fecha de la Creación había que situarla en el año 4004 a. de J.C., y precisamente a las 8 de la tarde del 22 de octubre de dicho año. De acuerdo con algunos teólogos de la Iglesia Ortodoxa Griega, la Creación se remontaría al año 5508 a. de J.C.

Hasta el siglo XVIII, el mundo erudito aceptó la interpretación dada a la versión bíblica, según la cual, la Edad del Universo era, a lo sumo, de sólo 6 o 7 mil años. Este punto de vista recibió su primer y más importante golpe en 1785, al aparecer el libro *Teoría de la Tierra*, del naturalista escocés James Hutton. Éste partió de la proposición que los lentos procesos naturales que actúan sobre la superficie de la Tierra (creación de montañas y su erosión, formación del curso de los ríos, etc.) habían actuado, aproximadamente, con la misma rapidez en todo el curso de la historia de la Tierra. Este «principio uniformista» implicaba que los procesos debían de haber actuado durante un período de tiempo extraordinariamente largo, para

causar los fenómenos observados. Por tanto, la Tierra no debía de tener miles, sino muchos millones de años de existencia.

Los puntos de vista de Hutton fueron desechados rápidamente. Pero el fermento actuó. En 1830, el geólogo británico Charles Lyell reafirmó los puntos de vista de Hutton y, en una obra en 3 volúmenes titulada *Principios de Geología*, presentó las pruebas con tal claridad y fuerza, que conquistó al mundo de los eruditos. La moderna ciencia de la Geología se inicia, pues, en este trabajo.

Se intentó calcular la edad de la Tierra basándose en el principio uniformista. Por ejemplo, si se conoce la cantidad de sedimentos depositados cada año por la acción de las aguas (hoy se estima que es de unos 30 cm cada 880 años), puede calcularse la edad de un estrato de roca sedimentaria a partir de su espesor. Pronto resultó evidente que este planteamiento no permitiría determinar la edad de la Tierra con la exactitud necesaria, ya que los datos que pudieran obtenerse de las acumulaciones de los estratos de rocas quedaban falseados a causa de los procesos de la erosión, disagregación, cataclismos y otras fuerzas de la Naturaleza. Pese a ello, esta evidencia fragmentaria revelaba que la Tierra debía de tener, por lo menos, unos 500 millones de años.

Otro procedimiento para medir la edad del Planeta consistió en valorar la velocidad de acumulación de la sal en los océanos, método que sugirió el astrónomo inglés Edmund Halley en 1715. Los ríos vierten constantemente sal en el mar. Y como quiera que la evaporación libera sólo agua, cada vez es mayor la concentración de sal. Suponiendo que el océano fuera, en sus comienzos, de agua dulce, el tiempo necesario para que los ríos vertieran en él su contenido en sal (de más del 3 %) sería de mil millones de años aproximadamente.

Este enorme período de tiempo concordaba con el supuesto por los biólogos, quienes, durante la última mitad del siglo XIX, intentaron seguir el curso del lento desarrollo de los organismos vivos, desde los seres unicelulares, hasta los animales superiores más complejos. Se necesitaron largos períodos de tiempo para que se produjera el desarrollo, y mil millones de años parecía ser un lapso suficiente.

Sin embargo, hacia mediados del siglo XIX, consideraciones de índole astronómica complicaron de pronto las cosas. Por ejemplo, el principio de la «conservación de la energía» planteaba un interesante problema en lo referente al Sol, astro que había

venido vertiendo en el curso de la historia registrada hasta el momento, colosales cantidades de energía. Si la Tierra era tan antigua, ¿de dónde había venido toda esta energía? No podía haber procedido de las fuentes usuales, familiares a la Humanidad. Si el Sol se había originado como un conglomerado sólido incandescente en una atmósfera de oxígeno, se habría reducido a ceniza (a la velocidad a que venía emitiendo la energía) en el curso de unos 2.500 años.

El físico alemán Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, uno de los primeros en enunciar la ley de conservación de la energía, mostróse particularmente interesado en el problema del Sol. En 1854 señaló que si éste se fuera contrayendo, su masa experimentaría un incremento de energía al acercarse hacia el centro de gravedad, del mismo modo que aumenta la energía de una piedra cuando cae. Esta energía se transformaría en radiación. Helmholtz calculó que una concentración del Sol de sólo la diezmilésima parte de su radio, proporcionaría la energía emitida durante 2.000 años.

El físico británico William Thomson (futuro Lord Kelvin) prosiguió sus estudios sobre el tema y, sobre esta base, llegó a la conclusión que la Tierra no tendría más de 50 millones de años, pues a la velocidad con que el Sol había emitido su energía, debería de haberse contraído partiendo de un tamaño gigantesco, inicialmente tan grande como la órbita que describe la tierra en torno a él. (Esto significaba, por supuesto, que Venus debía de ser más joven que la Tierra, y Mercurio, aún más.) Lord Kelvin consideró que si la Tierra, en sus orígenes, había sido una masa fundida, el tiempo necesario para enfriarse hasta su temperatura actual sería de unos 20 millones de años, período que correspondía a la edad de nuestro Planeta.

Hacia 1890, la batalla parecía entablada entre dos ejércitos invencibles. Los físicos habían demostrado, al parecer, de forma concluyente- que la Tierra no podía haber sido sólida durante más de unos pocos millones de años, en tanto que los geólogos y biólogos demostraban, de forma también concluyente, que tenía que haber sido sólida por lo menos durante unos mil millones de años.

Luego surgió algo nuevo y totalmente inesperado, que destrozó las hipótesis de los físicos.

En 1896, el descubrimiento de la radiactividad reveló claramente que el uranio y otras sustancias radiactivas de la Tierra liberaban grandes cantidades de energía, y

que lo habían venido haciendo durante mucho tiempo. Este hallazgo invalidaba los cálculos de Kelvin, como señaló, en 1904, el físico británico, de origen neocelandés, Ernest Rutherford, en una conferencia, a la que asistió el propio Kelvin, ya anciano, y que se mostró en desacuerdo con dicha teoría.

Carece de objeto intentar determinar cuánto tiempo ha necesitado la Tierra para enfriarse, si no se tiene en cuenta, al mismo tiempo, el hecho que las sustancias radiactivas le aportan calor constantemente. Al intervenir este nuevo factor, se había de considerar que la Tierra podría haber precisado miles de millones de años, en lugar de millones, para enfriarse, a partir de una masa fundida, hasta la temperatura actual. Incluso sería posible que fuera aumentando con el tiempo la temperatura de la Tierra.

La radiactividad aportaba la prueba más concluyente de la edad de la Tierra, ya que permitía a los geólogos y geoquímicos calcular directamente la edad de las rocas a partir de la cantidad de uranio y plomo que contenían. Gracias al «cronómetro» de la radiactividad, hoy sabemos que algunas de las rocas de la Tierra tienen, aproximadamente, 4.000 millones de años, y hay muchas razones para creer que la antigüedad de la Tierra es aún algo mayor. En la actualidad se acepta como muy probable una edad, para el Planeta, de 4,7 mil millones de años. Algunas de las rocas traídas de la Luna por los astronautas americanos han resultado tener la misma edad.

Y, ¿qué ocurre con el Sol? La radiactividad, junto con los descubrimientos relativos al núcleo atómico, introdujeron una nueva fuente de energía, mucho mayor que cualquier otra conocida antes. En 1930, el físico británico Sir Arthur Eddington introdujo una nueva forma de pensar al sugerir que la temperatura y la presión en el centro del Sol debían de ser extraordinariamente elevadas: la temperatura quizás fuera de unos 15 millones de grados. En tales condiciones, los núcleos de los átomos deberían experimentar reacciones tremendas, inconcebibles, por otra parte, en la suave moderación del ambiente terrestre. Se sabe que el Sol está constituido, sobre todo, por hidrógeno. Si se combinaran 4 núcleos (para formar un átomo de helio), se liberarían enormes cantidades de energía.

Posteriormente (en 1938), el físico americano, de origen alemán, Hans Albrecht Bethe, elaboró las posibles vías por las que podría producirse esta combinación del

hidrógeno para formar helio. Para ello existían dos procesos, contando siempre con las condiciones imperantes en el centro de estrellas similares al Sol. Uno implicaba la conversión directa del hidrógeno en helio; el otro involucraba un átomo de carbono como intermediario en el proceso. Cualquiera de las dos series de reacciones puede producirse en las estrellas; en nuestro propio Sol, el mecanismo dominante parece ser la conversión directa del hidrógeno. Cualquiera de estos procesos determina la conversión de la masa en energía. (Einstein, en su *Teoría especial de la relatividad*, había demostrado que la masa y la energía eran aspectos distintos de la misma cosa, y podían transformarse la una en la otra; además, demostró que podía liberarse una gran cantidad de energía mediante la conversión de una muy pequeña cantidad de masa.)

La velocidad de radiación de energía por el Sol implica la desaparición de determinada masa solar a una velocidad de 4,2 millones de toneladas por segundo. A primera vista, esto parece una pérdida formidable; pero la masa total del Sol es de 2.200.000.000.000.000.000.000 toneladas, de tal modo que nuestro astro pierde, por segundo, sólo 0,0000000000000000000002 % de su masa. Suponiendo que la edad del Sol sea de 6 mil millones de años, tal como creen hoy los astrónomos, y que haya emitido energía a la velocidad actual durante todo este lapso de tiempo, habrá perdido sólo un 1/40.000 de su masa. De ello se desprende fácilmente que el Sol puede seguir emitiendo aún energía, a su velocidad actual, durante unos cuantos miles de millones de años más.

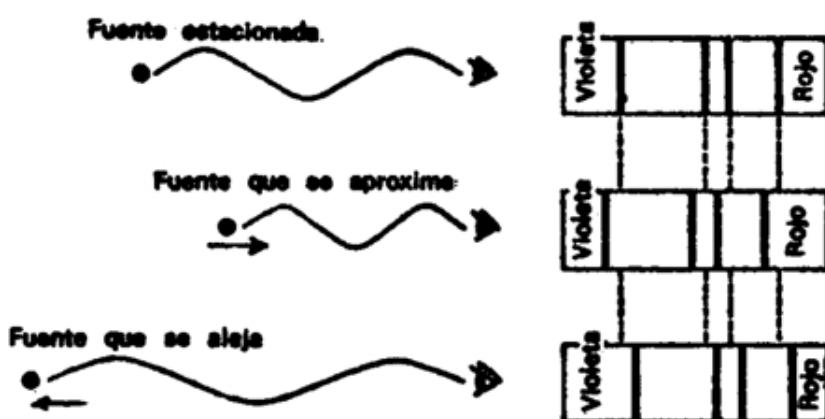
Por tanto, en 1940 parecía razonable calcular, para el Sistema Solar como conjunto, unos 6.000 millones de años. Con ello parecía resuelta la cuestión concerniente a la edad del Universo; pero los astrónomos aportaron hechos que sugerían lo contrario. En efecto, la edad asignada al Universo, globalmente considerado, resultaba demasiado corta en relación con la establecida para el Sistema Solar. El problema surgió al ser examinadas por los astrónomos las galaxias distantes y plantearse el fenómeno descubierto en 1842 por un físico austriaco llamado Christian Johann Doppler.

El «efecto Doppler» es bien conocido. Suele ilustrarse con el ejemplo del silbido de una locomotora cuyo tono aumenta cuando se acerca a nosotros y, en cambio, disminuye al alejarse. Esta variación en el tono se debe, simplemente, al hecho que

el número de ondas sonoras por segundo que chocan contra el tímpano varía a causa del movimiento de su fuente de origen.

Como sugirió su descubridor, el efecto Doppler se aplica tanto a las ondas luminosas como a las sonoras. Cuando alcanza el ojo la luz que procede de una fuente de origen en movimiento, se produce una variación en la frecuencia, es decir, en el color- si tal fuente se mueve a la suficiente velocidad. Por ejemplo, si la fuente luminosa se dirige hacia nosotros, nos llega mayor número de ondas de luz por segundo, y ésta se desplaza hacia el extremo violeta, de más elevada frecuencia, del espectro visible. Por otra parte, si se aleja la fuente de origen, llegan menos ondas por segundo, y la luz se desplaza hacia el extremo rojo, de baja frecuencia, del espectro.

Los astrónomos habían estudiado durante mucho tiempo los espectros de las estrellas y estaban muy familiarizados con la imagen normal, secuencia de líneas brillantes sobre un fondo oscuro o de líneas negras sobre un fondo brillante, que revelaba la emisión o la absorción de luz por los átomos a ciertas longitudes de ondas o colores. Lograron calcular la velocidad de las estrellas que se acercaban o se alejaban de nosotros (es decir, la velocidad radial), al determinar el desplazamiento de las líneas espectrales usuales hacia el extremo violeta o rojo del espectro.



*El efecto Doppler-Fizeau. Las líneas en el espectro se desplazan hacia el extremo violeta (a la izquierda), cuando la fuente de luz se aproxima. Al alejarse la fuente luminosa, las líneas espectrales se desplazan hacia el extremo rojo (derecha).*

El físico francés Armand-Hippolyte-Louis Fizeau fue quien, en 1848, señaló que el efecto Doppler en la luz podía observarse mejor anotando la posición de las líneas espectrales. Por esta razón, el efecto Doppler se denomina «efecto Doppler-Fizeau» cuando se aplica a la luz.

El efecto Doppler-Fizeau se ha empleado con distintas finalidades. En nuestro Sistema Solar se ha utilizado para demostrar de una nueva forma la rotación del Sol. Las líneas espectrales que se originan a partir de los bordes de la corona solar y se dirigen hacia nosotros, en el curso de su vibración, se desplazan hacia el violeta («desplazamiento violeta»). Las líneas del otro borde mostrarían un «desplazamiento hacia el rojo», ya que esta parte se alejaría de nosotros.

En realidad, el movimiento de las manchas del Sol permite detectar y medir la rotación solar de forma más adecuada (rotación que tiene un período aproximado de 25 días con relación a las estrellas). Este efecto puede usarse también para determinar la rotación de objetos sin caracteres llamativos, tales como los anillos de Saturno.

El efecto Doppler-Fizeau se emplea para observar objetos situados a cualquier distancia, siempre que éstos den un espectro que pueda ser estudiado. Por tanto, sus mejores resultados se han obtenido en relación con las estrellas.

En 1868, el astrónomo británico Sir William Huggins midió la velocidad radial de Sirius y anunció que éste se movía alejándose de nosotros a 46 km/seg. (Aunque hoy disponemos de mejores datos, lo cierto es que se acercó mucho a la realidad en su primer intento.) Hacia 1890, el astrónomo americano James Edward Keeler, con ayuda de instrumentos perfeccionados, obtuvo resultados cuantitativos más fidedignos; por ejemplo, demostró que Arturo se acercaba a nosotros a la velocidad aproximada de 6 km/seg.

El efecto podía utilizarse también para determinar la existencia de sistemas estelares cuyos detalles no pudieran detectarse con el telescopio. Por ejemplo, en 1782 un astrónomo inglés, John Goodricke (sordomudo que murió a los 22 años de edad; en realidad un gran cerebro en un cuerpo trágicamente defectuoso), estudió la estrella Algol, cuyo brillo aumenta y disminuye regularmente. Para explicar este fenómeno, Goodricke emitió la hipótesis que un compañero opaco giraba en torno a

Algol. De forma periódica, el enigmático compañero pasaba por delante de Algol, eclipsándolo y amortiguando la intensidad de su luz.

Transcurrió un siglo antes que esta plausible hipótesis fuera confirmada por otras pruebas. En 1889, el astrónomo alemán Hermann Carl Vogel demostró que las líneas del espectro de Algol se desplazaban alternativamente hacia el rojo y el violeta, siguiendo un comportamiento paralelo al aumento y disminución de su brillo. Las líneas retrocedían cuando se acercaba el invisible compañero, para acercarse cuando éste retrocedía. Algol era, pues, una «estrella binaria que se eclipsaba».

En 1890, Vogel realizó un descubrimiento similar, de carácter más general. Comprobó que algunas estrellas efectuaban movimientos de avance y retroceso. Es decir, las líneas espectrales experimentaban un desplazamiento hacia el rojo y otro hacia el violeta, como si se duplicaran. Vogel interpretó este fenómeno como revelador que la estrella constituía un sistema estelar binario, cuyos dos componentes (ambos brillantes) se eclipsaban mutuamente y se hallaban tan próximos entre sí, que aparecían como una sola estrella, aunque se observaran con los mejores telescopios. Tales estrellas son «binarias espectroscópicas».

Pero no había que restringir la aplicación del efecto Doppler-Fizeau a las estrellas de nuestra Galaxia. Estos objetos podían estudiarse también más allá de la Vía Láctea. Así, en 1912, el astrónomo americano Vesto Melvin Slipher, al medir la velocidad radial de la galaxia de Andrómeda, descubrió que se movía en dirección a nosotros aproximadamente a la velocidad de 200 km/seg. Pero al examinar otras galaxias descubrió que la mayor parte de ellas se alejaban de nosotros. Hacia 1914, Slipher había obtenido datos sobre un total de 15 galaxias; de éstas, 13 se alejaban de nosotros, todas ellas a la notable velocidad de varios centenares de kilómetros por segundo.

Al proseguir la investigación en este sentido, la situación fue definiéndose cada vez más. Excepto algunas de las galaxias más próximas, todas las demás se alejaban de nosotros. Y a medida que mejoraron las técnicas y pudieron estudiarse galaxias más tenues y distantes de nosotros, se descubrió en ellas un progresivo desplazamiento hacia el rojo.

En 1929, Hubble, astrónomo del Monte Wilson, sugirió que estas velocidades de alejamiento aumentaban en proporción directa a la distancia a que se hallaba la correspondiente galaxia. Si la galaxia *A* estaba dos veces más distante de nosotros que la *B*, la *A* se alejaba a una velocidad dos veces superior a la de la *B*. Esto se llama a veces «ley de Hubble».

Esta ley fue confirmada por una serie de observaciones. Así, en 1929, Milton La Salle Humason, en el Monte Wilson, utilizó el telescopio de 100 pulgadas para obtener espectros de galaxias cada vez más tenues. Las más distantes que pudo observar se alejaban de nosotros a la velocidad de 40.000 km/seg. Cuando empezó a utilizarse el telescopio de 200 pulgadas, pudieron estudiarse galaxias todavía más lejanas, y, así, hacia 1960 se detectaron ya cuerpos tan distantes, que sus velocidades de alejamiento llegaban a los 144.000 km/seg, o sea, la mitad de la velocidad de la luz.

¿A qué se debía esto? Supongamos que tenemos un balón con pequeñas manchas pintadas en su superficie. Es evidente que si lo inflamos, las manchas se separarán. Si en una de las manchas hubiera un ser diminuto, éste, al inflar el balón, vería cómo todas las restantes manchas se alejaban de él, y cuanto más distantes estuvieran las manchas, tanto más rápidamente se alejarían. Y esto ocurría con independencia de la mancha sobre la cual se hallara el ser imaginario. El efecto sería el mismo.

Las galaxias se comportan como si el Universo se inflara igual que nuestro balón. Los astrónomos aceptan hoy de manera general el hecho de esta expansión, y las «ecuaciones de campo» de Einstein en su *Teoría general de la relatividad* pueden construirse de forma que concuerden con la idea de un Universo en expansión.

Pero esto plantea cuestiones de gran trascendencia. El Universo visible, ¿tiene un límite? Las galaxias más remotas que podemos ver (aproximadamente, distantes de nosotros unos 9 mil millones de años luz), se alejan de nuestro planeta a la mitad de la velocidad de la luz. Si se cumple la ley de Hubble, relativa al aumento de la velocidad de los cuerpos celestes a medida que se alejan de nosotros, ya a los 11 mil millones de años luz de la Tierra, las galaxias se alejarían a la velocidad de la luz; pero ésta es, según la teoría de Einstein, la máxima velocidad posible. ¿Significa esto que no hay galaxias visibles a mayor distancia?

Tenemos también la cuestión relativa a la edad. Si el Universo se viene expandiendo constantemente, es lógico suponer que en un pasado remoto sería más pequeño que ahora, y que en algún momento de ese pasado tuvo su origen como un núcleo de materia denso. Y aquí es donde radicaba el conflicto, hacia la década de los 40, sobre la edad del Universo. Según su velocidad de expansión y la distancia actual de las galaxias, parecía que el Universo no pueda tener más de 2 mil millones de años. Pero los geólogos, gracias a la radiactividad, sabían con certeza que la Tierra debía de tener, por lo menos, 4 mil millones de años.

Afortunadamente salvó la situación, en 1952, la revisión del módulo de referencia constituido por las cefeidas. Al doblar y, posiblemente, triplicar el tamaño del Universo, se duplicó o triplicó su edad, con lo cual concordaban la radiactividad de las rocas y el desplazamiento hacia el rojo; en tales condiciones, se podía suponer que tanto el Sistema Solar como las galaxias tenían de 5 a 6 mil millones de años.

Hacia 1960, la situación volvió a hacerse algo confusa. El astrónomo británico Fred Hoyle, tras analizar la probable composición de las estrellas de las Poblaciones I y II, decidió que, de los dos procesos mediante los cuales las estrellas queman hidrógeno para formar helio, el más lento era precisamente el que predominaba. Basándose en esto, calculó que algunas estrellas debían de tener entre 10 y 15 mil millones de años. Posteriormente, el astrónomo americano Allen Sandage descubrió que las estrellas de la acumulación NGC 188 parecían tener, por lo menos, 24 mil millones de años, mientras que por su parte, el astrónomo suizo-americano Fritz Zwicky especuló sobre edades del orden del billón de años. Tales edades no entrarían en conflicto con la prueba sobre la antigüedad de la Tierra basada en la edad de las rocas, pues nuestro planeta, evidentemente, sería más joven que el Universo; pero si éste se había venido expandiendo a la velocidad actual durante 24 mil millones de años o más, tal expansión sería, en realidad, superior a la calculada. Así, pues, los astrónomos se enfrentaban con un nuevo problema.

Suponiendo que el Universo se expande y que las ecuaciones de campo de Einstein concuerdan con tal interpretación, surge, inexorablemente, la pregunta: ¿Por qué? La explicación más fácil, y casi inevitable, es la que la expansión constituye el resultado de una explosión en sus comienzos. En 1927, el matemático belga Georges-Édouard Lemaître sugirió que toda la materia procedía, originalmente, de

un enorme «huevo cósmico» que, al estallar, dio origen al Universo que conocemos. Los fragmentos de la esfera original formarían las galaxias, que se alejan, unas respecto a otras, en todas direcciones, todavía a consecuencia de la inimaginablemente poderosa explosión ocurrida hace muchos miles de millones de años.

El físico ruso-americano George Gamov trabajó sobre esta idea. Sus cálculos lo llevaron a suponer que los diversos elementos que conocemos se formaron en la primera media hora después de la explosión. Durante los 250 millones de años que siguieron a la misma, la radiación predominó sobre la materia y, en consecuencia, la materia del Universo permaneció dispersa en forma de un gas tenue. Sin embargo, una vez alcanzado un punto crítico en la expansión, la materia predominó, al fin, empezó a condensarse y se perfilaron las galaxias. Gamov considera que la expansión seguirá probablemente hasta que todas las galaxias, excepto las de nuestro propio agregado local, se hayan alejado fuera del alcance de los instrumentos más poderosos. A partir de entonces nos hallaremos solos en el Universo.

¿De dónde procede la materia que formó el «huevo cósmico»? Algunos astrónomos sugieren que el Universo se originó como un gas extraordinariamente tenue, que se fue contrayendo de manera gradual bajo la fuerza de la gravitación, hasta constituir una masa de gran densidad que, al fin, estalló. En otras palabras: hace una eternidad, inicióse en la forma de un vacío casi absoluto, para llegar, a través de una fase de contracción, a adquirir la forma de «huevo cósmico», estallar y, mediante una fase de expansión, volver hacia una eternidad de vacío casi absoluto. Vivimos en un período transitorio, un instante en la eternidad- de plenitud del Universo.

Otros astrónomos, especialmente W. B. Bonnor, de Inglaterra, señalan que el Universo ha pasado por una interminable serie de ciclos de este tipo, cada uno de los cuales duraría, quizá, decenas de miles de millones de años; en otras palabras, tendríamos un «Universo oscilante».

Tanto si el Universo se está simplemente expandiendo, o contrayéndose y expandiéndose, u oscilando, subsiste el concepto de «Universo en evolución».

En 1948, los astrónomos británicos Hermann Bondi y Thomas Gold emitieron una teoría, divulgada luego por otro astrónomo británico, Fred Hoyle- que excluía la evolución. Su Universo se llama «Universo en estado estacionario» o «Universo en creación continua». En efecto, la teoría señala que las galaxias se alejan y que el Universo se expande. Cuando las galaxias más alejadas alcanzan la velocidad de la luz, de tal modo que ya no puede llegar hasta nosotros ninguna luz de ellas, puede decirse que abandonan nuestro Universo. Sin embargo, mientras se separan de nuestro Universo las galaxias y grupos de la galaxias, se van formando sin cesar, entre las antiguas, nuevas galaxias. Por cada una que desaparece del Universo al haber superado el límite de la velocidad de la luz, aparecen otras entre nosotros. Por tanto, el Universo permanece en un estado constante, el espacio está ocupado siempre por la misma densidad de galaxias.

Por supuesto que debe de existir una creación continua de nueva materia para remplazar a las galaxias que nos abandonan, aunque no se ha detectado tal extremo. Sin embargo, esto no es sorprendente. Para suministrar nueva materia destinada a constituir galaxias a la velocidad necesaria, se requiere sólo que se forme por año un átomo de hidrógeno en mil millones de litros de espacio. Esta creación se produce a una velocidad demasiado pequeña como para que puedan captarla los instrumentos que disponemos actualmente.

Si suponemos que la materia es creada de una forma incansable, aunque a velocidad muy baja, podemos preguntarnos: « ¿De dónde procede esta nueva materia?» ¿Qué ocurre con la ley de conservación de la masa-energía? Desde luego, la materia no puede elaborarse a partir de la nada. Hoyle supone que la energía para la creación de nueva materia puede ser injectada a partir de la energía de la expansión. En otras palabras; el Universo puede expandirse a una velocidad algo inferior a la que se requeriría si no se formara materia, y la materia que se forma podría ser creada a expensas de la energía que se consume en la expansión.

Se ha entablado una violenta polémica entre los patrocinadores de la teoría evolutiva y la del estado inmutable. El mejor procedimiento para elegir una u otra podría consistir en estudiar los remotos confines del Universo situados a miles de millones de años luz.

Si fuera correcta la teoría del estado inmutable, el Universo sería uniforme por doquier, y su aspecto a miles de millones de años luz debería parecerse al que ofrece en nuestra vecindad. Por el contrario, con la idea evolutiva se podría ver ese Universo a miles de millones de años luz, con una luz cuya creación habría tenido lugar hace miles de millones de años. Esta luz se habría formado cuando el Universo era joven, y no mucho después del «gran estallido». Así, pues, lo que observáramos en este Universo joven debería diferir de cuanto vemos en nuestra vecindad, donde el Universo ha envejecido.

Por desgracia, resulta muy difícil definir con claridad lo que vemos en las galaxias más distantes con ayuda del telescopio; en realidad era insuficiente la información acumulada hasta la década iniciada en 1960. Cuando, por fin, empezó a perfilarse lo evidente, se comprobó que, como veremos- se trataba más bien de radiación que de luz corriente.

### **Muerte del Sol**

Que el Universo esté evolucionando o se halle en un estado estacionario, es algo que no afecta directamente a las galaxias ni a las acumulaciones de galaxias en sí. Aún cuando las galaxias se alejen cada vez más hasta quedar fuera del alcance visual de los mejores instrumentos, nuestra propia Galaxia permanecerá intacta, y sus estrellas se mantendrán firmemente dentro de su campo gravitatorio. Tampoco nos abandonarán las otras galaxias de la acumulación local. Pero no se excluye la posibilidad que se produzcan en nuestra Galaxia cambios desastrosos para nuestro planeta y la vida en el mismo.

Todas las teorías acerca de los cambios en los cuerpos celestes son modernas. Los filósofos de la Antigüedad, en particular Aristóteles, consideraban que los cielos eran perfectos e inalterables. Cualquier cambio, corrupción y degradación se hallaban limitados a las regiones imperfectas situadas bajo la esfera más próxima, o sea, la Luna. Esto parecía algo de simple sentido común, ya que, a través de los siglos y las generaciones, jamás se produjeron cambios importantes en los cielos. Es cierto que los surcaban los misteriosos cometas, que ocasionalmente se materializaban en algún punto del espacio y que, errantes en sus idas y venidas, mostrábanse fantasmagóricos al revestir a las estrellas de un delicado velo y eran funestos en su

aspecto, pues la sutil cola se parecía al ondulante cabello de una criatura enloquecida que corriera profetizando desgracias. (La palabra «cometa» se deriva precisamente de la voz latina para designar el «pelo».) Cada siglo pueden observarse unos veinticinco cometas a simple vista. Aristóteles intentó conciliar estas apariciones con la perfección de los cielos, al afirmar, de forma insistente, que pertenecían, en todo caso, a la atmósfera de la Tierra, corrupta y cambiante. Este punto de vista prevaleció hasta finales del siglo XVI. Pero en 1577, el astrónomo danés Tycho Brahe intentó medir el paralaje de un brillante cometa y descubrió que no podía conseguirlo (esto ocurría antes de la época del telescopio). Ya que el paralaje de la Luna era mensurable, Tycho Brahe llegó a la conclusión que el cometa estaba situado más allá de la Luna, y que en los cielos se producían, sin duda, cambios y había imperfección.

En realidad, mucho antes se habían señalado (Séneca había ya sospechado esto en el siglo I de nuestra Era) ya cambios incluso en las estrellas, mas, al parecer, no despertaron gran curiosidad. Por ejemplo, tenemos las estrellas variables, cuyo brillo cambia considerablemente de una noche a otra, cosa apreciable incluso a simple vista. Ningún astrónomo griego hizo referencia alguna a las variaciones en el brillo de una estrella. Es posible que se hayan perdido las correspondientes referencias, o que, simplemente, no advirtieran estos fenómenos. Un caso interesante es el de Algol, la segunda estrella, por su brillo, de la constelación de Perseo, que pierde bruscamente las dos terceras partes de su fulgor y luego vuelve a adquirirlo, fenómeno que se observa, de forma regular, cada 69 horas. (Hoy, gracias a Goodricke y Vogel, sabemos que Algol tiene una estrella compañera, de luz más tenue, que la eclipsa y amortigua su brillo con la periodicidad indicada.) Los astrónomos griegos no mencionaron para nada este fenómeno; tampoco se encuentran referencias al mismo entre los astrónomos árabes de la Edad Media. Sin embargo, los griegos situaron la estrella en la cabeza de Medusa, el diabólico ser que convertía a los hombres en rocas. Incluso su nombre, «Algol», significa, en árabe, «demonio profanador de cadáveres». Evidentemente, los antiguos se sentían muy intranquilos respecto a tan extraña estrella.

Una estrella de la constelación de la Ballena, llamada Omicrón de la Ballena, varía irregularmente. A veces es tan brillante como la Estrella Polar; en cambio, otras

deja de verse. Ni los griegos ni los árabes dijeron nada respecto a ella. El primero en señalar este comportamiento fue el astrónomo holandés David Fabricius, en 1596. Más tarde, cuando los astrónomos se sintieron menos atemorizados por los cambios que se producían en los cielos, fue llamada Mira (de la voz latina que significa «maravillosa»).

Más llamativa aún era la brusca aparición de «nuevas estrellas» en los cielos. Esto no pudieron ignorarlo los griegos. Se dice que Hiparco quedó tan impresionado, en el 134 a. de J.C., al observar una nueva estrella en la constelación del Escorpión, que trazó su primer mapa estelar, al objeto que pudieran detectarse fácilmente, en lo futuro, las nuevas estrellas.

En 1054 de nuestra Era se descubrió una nueva estrella, extraordinariamente brillante, en la constelación de Tauro. En efecto, su brillo superaba al del planeta Venus, y durante semanas fue visible incluso de día. Los astrónomos chinos y japoneses señalaron exactamente su posición, y sus datos han llegado hasta nosotros. Sin embargo, era tan rudimentario el nivel de la Astronomía, por aquel entonces, en el mundo occidental, que no poseemos ninguna noticia respecto a que se conociera en Europa un hecho tan importante, lo cual hace sospechar que quizá nadie lo registró.

No ocurrió lo mismo en 1572, cuando apareció en la constelación de Casiopea una nueva estrella, tan brillante como la de 1054. La astronomía europea despertaba entonces de su largo sueño. El joven Tycho Brahe la observó detenidamente y escribió la obra *De Nova Stella*, cuyo título sugirió el nombre que se aplicaría en lo sucesivo a toda nueva estrella: «nova».

En 1604 apareció otra extraordinaria nova en la constelación de la Serpiente. No era tan brillante como la de 1572, pero sí lo suficiente como para eclipsar a Marte. Johannes Kepler, que la observó, escribió un libro sobre las novas. Tras la invención del telescopio, las novas perdieron gran parte de su misterio. Se comprobó que, por supuesto, no eran en absoluto estrellas nuevas, sino, simplemente, estrellas, antes de escaso brillo, que aumentaron bruscamente de esplendor hasta hacerse visibles. Con el tiempo se fue descubriendo un número cada vez mayor de novas. En ocasiones alcanzaban un brillo muchos miles de veces superior al primitivo, incluso en pocos días, que luego se iba atenuando lentamente, en el transcurso de unos

meses, hasta esfumarse de nuevo en la oscuridad. Las novas aparecían a razón de unas 20 por año en cada galaxia (incluyendo la nuestra).

Un estudio de los desplazamientos Doppler-Fizeau efectuado durante la formación de novas, así como otros detalles precisos de sus espectros, permitió concluir que las novas eran estrellas que estallaban. En algunos casos, el material estelar lanzado al espacio podía verse como una capa de gas en expansión, iluminado por los restos de la estrella. Tales estrellas se denominaron «nebulosas planetarias».

Este tipo de formación de novas no implica necesariamente la muerte de la estrella. Desde luego se trata de un tremendo cataclismo, ya que la luminosidad de la estrella puede aumentar hasta un millón de veces, respecto a su brillo inicial, en menos de 24 horas. (Si nuestro Sol se convirtiera en una nova, destruiría toda la vida sobre la Tierra y, posiblemente, se desintegraría el Planeta.) Pero la explosión emite sólo, aparentemente, el 1 ó el 2 % de la masa de la estrella: luego, ésta vuelve a seguir una vida más o menos normal. En realidad, algunas estrellas parecen estar sometidas a tales explosiones de forma periódica, pese a lo cual, aún existen.

La nova más llamativa observada después de la invención del telescopio fue la descubierta, en 1885, por el astrónomo alemán Ernst Harwig en la nebulosa de Andrómeda, a la que se dio el nombre de «Andrómeda S». Se hallaba muy por debajo del límite de la observación a simple vista. En el telescopio se mostraba con un brillo correspondiente a la décima parte del de toda la galaxia de Andrómeda. Por aquél entonces se desconocía a qué distancia se encontraba dicha galaxia o cuán grande era, por lo cual no despertó ningún interés especial el brillo de su nova. Pero tan pronto como Hubble determinó la distancia que nos separaba de la galaxia, el brillo de la nova de 1885 sorprendió bruscamente a los astrónomos. Hubble descubrió ocasionalmente una serie de novas en la misma galaxia, pero ninguna se aproximaba, ni siquiera remotamente, por su brillo, a la nova de 1885, la cual debió de haber sido 10.000 veces más brillante que las novas corrientes. Era, pues, una «supernova». Por tanto, si miramos hacia atrás, comprobamos que eran también supernovas las novas de 1054, 1572 y 1604. Más aún, probablemente se hallaban en nuestra propia Galaxia, lo cual explicaría su extraordinario brillo. En 1965, Bernard Goldstein, de Yale, presentó pruebas que en 1006 debió de aparecer en

nuestra galaxia una cuarta supernova, si podía aceptarse como cierta la oscura referencia de un astrólogo egipcio de aquel tiempo.

En apariencia, las supernovas difieren por completo, en su comportamiento físico, de las novas corrientes, y los astrónomos se hallan muy interesados en estudiar sus espectros con todo detenimiento. La principal dificultad estriba en la escasa frecuencia con que se observan. Según Zwicky, su periodicidad sería de unas 3 por cada 1.000 años en cualquier galaxia. Aunque los astrónomos han logrado detectar unas 50, todas ellas están en galaxias distantes y no han podido ser estudiadas con detalle. La supernova de Andrómeda (1885), la más próxima a nosotros en los últimos 350 años, se mostró unos cuantos decenios antes que se hubiera desarrollado totalmente la fotografía aplicada a la Astronomía. Por tanto, no existe registro gráfico de su espectro. (Sin embargo, la distribución de las supernovas en el tiempo no parece seguir norma alguna. En una galaxia se detectaron recientemente 3 supernovas en sólo un lapso de 17 años. Los astrónomos pueden probar ahora su suerte.)

El brillo de una supernova (cuyas magnitudes absolutas oscilan entre, 14 y, 17) podría ser debido sólo al resultado de una explosión total, es decir, que una estrella se fragmentara por completo en sus componentes. ¿Qué le ocurriría a tal estrella? Al llegar aquí, permítasenos remontarnos en el pasado...

Ya en 1834, Bessel (el astrónomo que más adelante sería el primero en medir el paralaje de una estrella) señaló que Sirio y Proción se iban desviando muy ligeramente de su posición con los años, fenómeno que no parecía estar relacionado con el movimiento de la Tierra. Sus movimientos no seguían una línea recta, sino ondulada, y Bessel llegó a la conclusión que todas las estrellas se moverían describiendo una órbita alrededor de algo.

De la forma en que Sirio y Proción se movían en sus órbitas podía deducirse que ese «algo», en cada caso, debía de ejercer una poderosa atracción gravitatoria, no imaginable en otro cuerpo que no fuera una estrella. En particular el compañero de Sirio debía de tener una masa similar a la de nuestro Sol, ya que sólo de esta forma se podían explicar los movimientos de la estrella brillante. Así, pues, se supuso que los compañeros eran estrellas; pero, dado que eran invisibles para los telescopios

de aquel entonces, se llamaron «compañeros opacos». Fueron considerados como estrellas viejas, cuyo brillo se había amortiguado con el tiempo.

En 1862, el fabricante de instrumentos, Alvan Clark, americano, cuando comprobaba un nuevo telescopio descubrió una estrella, de luz débil, cerca de Sirio, la cual, según demostraron observaciones ulteriores, era el misterioso compañero. Sirio y la estrella de luz débil giraban en torno a un mutuo centro de gravedad, y describían su órbita en unos 50 años. El compañero de Sirio (llamado ahora «Sirio B», mientras que Sirio propiamente dicho recibe el nombre de «Sirio A») posee una magnitud absoluta de sólo 11,2, y, por tanto, tiene 1/400 del brillo de nuestro Sol, si bien su masa es muy similar a la de éste.

Esto parecía concordar con la idea de una estrella moribunda. Pero en 1914, el astrónomo americano Walter Sydney Adams, tras estudiar el espectro de Sirio B, llegó a la conclusión que la estrella debía de tener una temperatura tan elevada como la del propio Sirio A y tal vez mayor que la de nuestro Sol. Las vibraciones atómicas que determinaban las características líneas de absorción halladas en su espectro, sólo podían producirse a temperaturas muy altas. Pero si Sirio B tenía una temperatura tan elevada, ¿por qué su luz era tan tenue? La única respuesta posible consistía en admitir que sus dimensiones eran sensiblemente inferiores a las de nuestro Sol. Al ser un cuerpo más caliente, irradiaba más luz por unidad de superficie; respecto a la escasa luz que emitía, sólo podía explicarse considerando que su superficie total debía de ser más pequeña. En realidad, la estrella no podía tener más de 26.000 km de diámetro, o sea, sólo 2 veces el diámetro de la Tierra. No obstante, ¡Sirio B tenía la misma masa que nuestro Sol! Adams trató de imaginarse esta masa comprimida en un volumen tan pequeño como el de Sirio B. La densidad de la estrella debería ser entonces unas 3.000 veces la del platino.

Esto significaba, nada menos, que un estado totalmente nuevo de la materia. Por fortuna, esta vez los físicos no tuvieron ninguna dificultad en sugerir la respuesta. Sabían que en la materia corriente los átomos estaban compuestos por partículas muy pequeñas, tan pequeñas, que la mayor parte del volumen de un átomo es espacio «vacío». Sometidas a una presión extrema, las partículas subatómicas podrían verse forzadas a agregarse para formar una masa superdensa. Incluso en la supernova Sirio B, las partículas subatómicas están separadas lo suficiente como

para poder moverse con libertad, de modo que la sustancia más densa que el platino sigue actuando como un gas. El físico inglés Ralph Howard Fowler sugirió, en 1925, que se denominara «gas degenerado», y, por su parte, el físico soviético Lev Davidovich Landau señaló, en la década de los 30, que hasta las estrellas corrientes, tales como nuestro Sol, deben de tener un centro compuesto por gas degenerado.

El compañero de Proción («Proción B»), que detectó por primera vez J. M. Schaberle, en 1896, en el Observatorio de Lick, resultó ser también una estrella superdensa, aunque sólo con una masa 5/8 de veces la de Sirio B. Con los años se descubrieron otros ejemplos. Estas estrellas son llamadas «enanas blancas», por asociarse en ellas su escaso tamaño, su elevada temperatura y su luz blanca. Las enanas blancas tal vez sean muy numerosas y puedan constituir hasta el 3 % de las estrellas. Sin embargo, debido a su pequeño tamaño, en un futuro previsible sólo podrán descubrirse las de nuestra vecindad. (También existen «enanas rojas», mucho más pequeñas que nuestro Sol, pero de dimensiones no tan reducidas como las de las enanas blancas. Las enanas rojas son frías y tienen una densidad corriente. Quizá sean las estrellas más abundantes, aunque por su escaso brillo son tan difíciles de detectar como las enanas blancas. En 1948 se descubrieron un par de enanas rojas, sólo a 6 años luz de nosotros. De las 36 estrellas conocidas dentro de los 14 años luz de distancia de nuestro Sol, 21 son enanas rojas, y 3, enanas blancas. No hay gigantes entre ellas, y sólo dos, Sirio y Proción, son manifiestamente más brillantes que nuestro Sol.)

Un año después de haberse descubierto las sorprendentes propiedades de Sirio B, Albert Einstein expuso su *Teoría general de la relatividad*, que se refería, particularmente, a nuevas formas de considerar la gravedad. Los puntos de vista de Einstein sobre ésta condujeron a predecir que la luz emitida por una fuente con un campo gravitatorio de gran intensidad se desplazaría hacia el rojo («desplazamiento de Einstein»). Adams, fascinado por las enanas blancas que había descubierto, efectuó detenidos estudios del espectro de Sirio B y descubrió que también aquí se cumplía el desplazamiento hacia el rojo predicho por Einstein. Esto constituyó no sólo un punto en favor de la teoría de Einstein, sino también en favor de una muy elevada densidad de Sirio B, pues en una estrella ordinaria, como nuestro Sol, el

efecto del desplazamiento hacia el rojo sólo sería unas 30 veces menor. No obstante, al iniciarse la década de los 60, se detectó este desplazamiento de Einstein, muy pequeño, producido por nuestro Sol, con lo cual se confirmó una vez más la *Teoría general de la relatividad*.

Pero, ¿cuál es la relación entre las enanas blancas y las supernovas, tema éste que promovió la discusión? Para contestar a esta pregunta, permítasenos considerar la supernova de 1054. En 1844, el conde de Rosse, cuando estudiaba la localización de tal supernova en Tauro, donde los astrónomos orientales habían indicado el hallazgo de la supernova del 1054, observó un pequeño cuerpo nebuloso. Debido a su irregularidad y a sus proyecciones, similares a pinzas, lo denominó «Nebulosa del Cangrejo». La observación, continuada durante decenios, reveló que esta mancha de gas se expandía lentamente. La velocidad real de su expansión pudo calcularse a partir del efecto Doppler-Fizeau, y éste, junto con la velocidad aparente de expansión, hizo posible calcular la distancia a que se hallaba de nosotros la Nebulosa del Cangrejo, que era de 3.500 años luz. De la velocidad de la expansión se dedujo también que el gas había iniciado ésta a partir de un punto central de explosión unos 900 años antes, lo cual concordaba bastante bien con la fecha del año 1054.

Así, pues, apenas hay dudas que la Nebulosa del Cangrejo, que ahora se despliega en un volumen de espacio de unos 5 años luz de diámetro- constituiría los restos de la supernova de 1054.

No se ha observado una región similar de gas turbulento en las localizaciones de las supernovas indicadas por Tycho y Kepler, aunque sí se han visto pequeñas manchas nebulosas cerca de cada una de aquéllas. Sin embargo, existen unas 150 nebulosas planetarias, en las cuales los anillos toroidales de gas pueden representar grandes explosiones estelares. Una nube de gas particularmente extensa y tenue, la nebulosa del Velo, en la constelación del Cisne, pueden muy bien ser los restos de una supernova que hizo explosión hace 30.000 años.

Por aquel entonces debió de producirse más cerca y haber sido más brillante que la supernova de 1054, mas por aquel tiempo no existía en la Tierra civilización que pudiera registrar aquel espectacular acontecimiento.

Incluso se ha sugerido que esa tenue nebulosidad que envuelve a la constelación de Orión, puede corresponder a los restos de una supernova más antigua aún.

En todos estos casos, ¿qué ocurre con la estrella que ha estallado? La dificultad o imposibilidad de localizarla indica que su brillo es muy escaso, y esto, a su vez, sugiere que se trata de una enana blanca. Si es así, ¿serían todas las enanas blancas restos de estrellas que han explotado? En tal caso, ¿por qué algunas de ellas, tales como Sirio B, carecen de gas envolvente? Nuestro propio Sol, ¿estallará algún día y se convertirá en una enana blanca? Estas cuestiones nos llevan a considerar el problema de la evolución de las estrellas.

De las estrellas más cercanas a nosotros, las brillantes parecen ser cuerpos calientes, y las de escaso brillo, fríos, según una relación casi lineal entre el brillo y la temperatura. Si las temperaturas superficiales de las distintas estrellas se correlacionan con sus magnitudes absolutas, la mayor parte de estas estrellas familiares para nosotros caen dentro de una banda estrecha, que aumenta constantemente desde la de menor brillo y temperatura más baja, hasta la más brillante y caliente. Esta banda se denomina «secuencia principal». La estableció en 1913 el astrónomo americano Henry Norris Russell, quien realizó sus estudios siguiendo líneas similares a las de Hertzsprung (el astrónomo que determinó por primera vez las magnitudes absolutas de las cefeidas). Por tanto, una gráfica que muestra la secuencia principal se denominará «diagrama de Hertzsprung-Russell», o «diagrama H-R».

Pero no todas las estrellas pertenecen a la secuencia principal. Hay algunas estrellas rojas que, pese a su temperatura más bien baja, tienen considerables magnitudes absolutas, debido a su enorme tamaño. Entre estos «gigantes rojos», los mejor conocidos son Betelgeuse y Antares. Se trata de Cuerpos tan fríos (lo cual se descubrió en 1964), que muchos tienen atmósferas ricas en vapor de agua, que se descompondría en hidrógeno y oxígeno a las temperaturas, más altas, de nuestro Sol. Las enanas blancas de elevada temperatura se hallan también fuera de la secuencia principal.

En 1924, Eddington señaló que la temperatura en el interior de cualquier estrella debía de ser muy elevada. Debido a su gran masa, la fuerza gravitatoria de una estrella es inmensa. Si la estrella no se colapsa, esta enorme fuerza es equilibrada

mediante una presión interna equivalente, a partir de la energía de irradiación-. Cuanto mayor sea la masa del cuerpo estelar, tanto mayor será la temperatura central requerida para equilibrar la fuerza gravitatoria. Para mantener estas elevadas temperaturas y presiones de radiación, las estrellas de mayor masa deben consumir energía más rápidamente y, por tanto, han de ser más brillantes que las de masa menor. Ésta es la «ley masa-brillo». En esta relación, la luminosidad varía con la sexta o séptima potencia de la masa. Si ésta aumenta tres veces, la luminosidad aumenta en la sexta o séptima potencia de 3, es decir, unas 750 veces. Se sigue de ello que las estrellas de gran masa consumen rápidamente su combustible hidrógeno y tienen una vida más corta. Nuestro Sol posee el hidrógeno suficiente para muchos miles de millones de años, siempre que mantenga su ritmo actual de irradiación. Una estrella brillante como Capella se consumirá en unos 20 millones de años, y algunas de las estrellas más brillantes, por ejemplo, Rigel, posiblemente no durarán más de 1 ó 2 millones de años. Esto significa que las estrellas muy brillantes deben de ser muy jóvenes. Quizás en este momento se estén formando nuevas estrellas en regiones del espacio en que hay suficiente polvo para proporcionar la materia prima necesaria.

El astrónomo americano George Herbig detectó, en 1955, dos estrellas en el polvo de la nebulosa de Orión, que no eran visibles en las fotografías de la región tomadas algunos años antes. Podría tratarse muy bien de estrellas que nacían cuando las observábamos.

Allá por 1965 se localizaron centenares de estrellas tan frías, que no tenían brillo alguno. Se detectaron mediante la radiación infrarroja, y, en consecuencia, se las denominó «gigantes infrarrojas», ya que están compuestas por grandes cantidades de materia gaseiforme. Se cree que se trata de masas de polvo y gas que forman un conglomerado, cuya temperatura aumenta gradualmente. A su debido tiempo adquieren el calor suficiente para brillar, y la posibilidad que se incorporen oportunamente a la secuencia principal dependerá de la masa total de la materia así acumulada.

El paso siguiente en el estudio de la evolución estelar procedió del análisis de las estrellas en los agregados globulares. Todas las estrellas de un agregado se encuentran aproximadamente a la misma distancia de nosotros, de forma que su

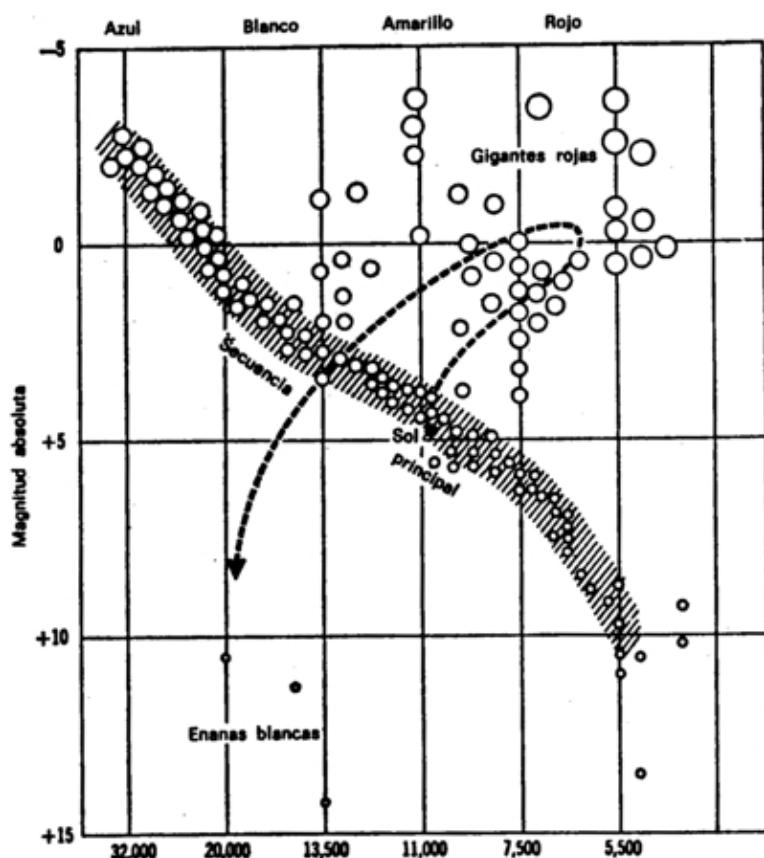
magnitud aparente es proporcional a su magnitud absoluta (como en el caso de las cefeidas en las Nubes de Magallanes). Por tanto, como quiera que se conoce su magnitud, puede elaborarse un diagrama H-R de estas estrellas. Se ha descubierto que las estrellas más frías (que queman lentamente su hidrógeno) se localizan en la secuencia principal, mientras que las más calientes tienden a separarse de ella. De acuerdo con su elevada velocidad de combustión y con su rápido envejecimiento, siguen una línea definida, que muestra diversas fases de evolución, primero, hacia las gigantes rojas, y luego, en sentido opuesto, y a través de la secuencia principal, de forma descendente, hacia las enanas blancas.

A partir de esto y de ciertas consideraciones teóricas sobre la forma en que las partículas subatómicas pueden combinarse a ciertas temperaturas y presiones elevadas, Fred Hoyle ha trazado una imagen detallada del curso de la evolución de una estrella. Según este astrónomo, en sus fases iniciales, una estrella cambia muy poco de tamaño o temperatura. (Ésta es, actualmente, la posición de nuestro Sol, y en ella seguirá durante mucho tiempo.) Cuando en su interior, en que se desarrolla una elevadísima temperatura, convierte el hidrógeno en helio, éste se acumula en el centro de la estrella. Y al alcanzar cierta entidad este núcleo de helio, la estrella empieza a variar de tamaño y temperatura de forma espectacular. Se hace más fría y se expande enormemente. En otras palabras: abandona la secuencia principal y se mueve en dirección a las gigantes rojas. Cuanto mayor es la masa de la estrella, tanto más rápidamente llega a este punto. En los agregados globulares, las de mayor masa ya han avanzado mucho a lo largo de esta vía.

La gigante que se expande libera más calor, pese a su baja temperatura, debido a su mayor superficie. En un futuro remoto, cuando el Sol abandone la secuencia principal, y quizás algo antes, habrá calentado hasta tal punto la Tierra, que la vida será imposible en ella. Sin embargo, nos hallamos aún a miles de millones de años de este hecho.

Hasta no hace mucho, la conversión del hidrógeno en helio era la única fuente de energía conocida en las estrellas, lo cual planteaba un problema respecto a las gigantes rojas. Cuando una estrella ha alcanzado la fase de gigante roja, la mayor parte de su hidrógeno se ha consumido. Entonces, ¿cómo puede seguir irradiando tan enormes cantidades de energía? Hoyle sugirió que, al final, llega a contraerse

también el núcleo de helio, y, como resultado, su temperatura aumenta hasta tal punto, que los núcleos de helio pueden fusionarse para formar carbono, con liberación de energía adicional. En 1959, el físico americano David E. Alburger demostró, en el laboratorio, que esta reacción puede producirse. Es muy rara y de un tipo muy poco probable, pero existen tantos átomos de helio en una gigante roja, que puede llegarse a tales fusiones en número suficiente como para proporcionar las cantidades necesarias de energía adicional.



*Temperatura superficial en grados Fahrenheit. El diagrama de Hertzsprung-Russell. La línea de trazos representa la evolución de una estrella. El tamaño relativo de las estrellas sólo se da de forma esquemática, no a escala.*

Hoyle fue más lejos. El nuevo núcleo de carbono se calienta todavía más, y entonces se empiezan a formar átomos más complejos aún, como los de oxígeno y neón. Mientras ocurre esto, la estrella se va contrayendo y calentándose de nuevo; vuelve a incorporarse a la secuencia principal. La estrella empieza a adquirir una serie de capas, como las de una cebolla. Se compone de un núcleo de oxígeno-

neón, una capa de carbono y otra de helio, y el conjunto se halla envuelto en una cutícula de hidrógeno todavía no convertido.

Al seguir aumentando la temperatura en el centro, se van desencadenando reacciones cada vez más complejas. En el nuevo núcleo, el neón puede convertirse en magnesio, el cual puede combinarse, a su vez, para formar sílice y, finalmente, hierro. En una última fase de su vida, la estrella puede estar constituida por más de media docena de capas concéntricas, en cada una de las cuales se consume un combustible distinto. La temperatura central puede haber alcanzado entonces los 1.500 o 2.000 millones de grados.

Sin embargo, en comparación con su larga vida como consumidor de oxígeno, la estrella está situada en la vertiente de un rápido tobogán respecto a los restantes combustibles. Su vida en la secuencia principal es feliz, pero corta. Una vez la estrella empieza a formar hierro, ha alcanzado un punto muerto, pues los átomos de este metal representan el punto de máxima estabilidad y mínimo contenido energético. Para alterar los átomos de hierro en la dirección de los átomos más complejos, o de átomos menos complejos, se requiere una ganancia de energía en el sistema.

Además, cuando la temperatura central aumenta con la edad, se eleva también la presión de radiación de una manera proporcionada a la cuarta potencia de la temperatura. Cuando ésta se duplica, la presión aumenta 16 veces, y el equilibrio entre ella y la gravitación se hace cada vez más delicado. Un desequilibrio temporal dará resultados progresivamente más drásticos, y si tal presión aumenta demasiado de prisa, puede estallar una nova. La pérdida de una parte de la masa tal vez resuelva la situación, por lo menos, temporalmente, y entonces la estrella seguirá envejeciendo, sin sufrir nuevas catástrofes, durante un millón de años más o menos.

Pero también es posible que se mantenga el equilibrio y que no se llegue a la explosión de la estrella. En tal caso, las temperaturas centrales pueden elevarse tanto, según opina Hoyle, que los átomos de hierro se separan, para originar helio; mas para que ocurra esto, tal como hemos dicho, debe introducirse energía en los átomos. La única forma en que la estrella puede conseguir esta energía es a partir de su campo gravitatorio. Cuando la estrella se encoge, la energía que obtiene

puede destinarse a convertir el hierro en helio. Sin embargo, es tan grande la cantidad de energía necesaria, que la estrella ha de empequeñecerse bruscamente, hasta convertirse en una pequeña fracción de su volumen anterior, lo cual ocurriría, siempre según Hoyle, «aproximadamente en un segundo».

Por tanto, la estrella corriente muere en un abrir y cerrar de ojos, y ocupa su lugar entonces una enana blanca. Éste es el destino que correrá nuestro Sol en un futuro muy remoto, y estrellas hoy más brillantes que el Sol alcanzarán ese estado antes que él (quizás en los próximos 5 mil millones de años). Todo esto permite explicar cómo se forma una enana blanca sin llegar a la explosión. Y quizás ocurrió esto con enanas tales como Sirio B y Proción B. Pero, ¿cuál es el destino de las supernovas?

El astrónomo hindú Subrahmanyan Chandrasekhar calculó, en el Observatorio de Yerkes, que ninguna estrella de masa 1,4 veces mayor que la de nuestro Sol (llamado ahora «límite de Chandrasekhar», en honor al citado investigador) puede convertirse en una enana blanca mediante el proceso «normal» descrito por Hoyle. Y, en realidad, todas las enanas blancas observadas hasta ahora se hallan por debajo del límite de masa establecido por Chandrasekhar. Creemos asimismo que la Nebulosa del Cangrejo, respecto a la cual se admite que es un resto de la explosión de una supernova y que, según parece, posee una enana blanca en su centro, tiene más de 1,4 veces la masa de nuestro Sol, considerando también la masa del gas proyectado.

Veamos, pues, cómo la estrella original, al rebasar el citado límite, pudo convertirse en una enana blanca. La razón del «límite de Chandrasekhar» es la que cuanto mayor masa tiene la estrella, tanto más debe encogerse (o sea, tanto más densa tiene que hacerse), al objeto de proporcionar la energía necesaria para volver a convertir su hierro en helio, ya que, por así decirlo, existe un límite para la posible retracción. Sin embargo, una estrella de gran masa puede rebasar este límite. Cuando la estrella empieza a colapsarse, su núcleo de hierro se encuentra todavía rodeado de una voluminosa capa externa de átomos que aún no han alcanzado una estabilidad máxima. Cuando las regiones externas se colapsan y aumenta su temperatura, estas sustancias, todavía combinables, entran bruscamente en «ignición». El resultado es una explosión, que proyecta al espacio el material exterior de la estrella. La enana blanca que resulta de tal explosión se halla

entonces por debajo del límite de Chandrasekhar, aunque la estrella original se encontrara por encima del mismo.

Esto puede aplicarse, no sólo a la Nebulosa del Cangrejo, sino también a todas las supernovas. Nuestro Sol, que, de momento, se halla por debajo del límite de Chandrasekhar- podría convertirse algún día en enana blanca, aunque, al parecer, nunca podrá transformarse en una supernova.

Hoyle aventura la posibilidad que la materia expulsada al espacio por una supernova pueda dispersarse a través de las galaxias y servir como materia prima para la formación de nuevas estrellas de la «segunda generación», ricas en hierro y otros elementos metálicos. Nuestro propio Sol tal vez sea una estrella de la segunda generación, mucho más joven que las antiguas estrellas de algunos de los cúmulos globulares libres de polvo. Las estrellas de la «primera generación» poseen escaso contenido en metales y son ricas en hidrógeno. La Tierra, formada a partir de los mismos restos de los que nació el Sol, es extraordinariamente rica en hierro, hierro que pudo haber existido alguna vez en el centro de una estrella que explotara hace muchos miles de millones de años.

Por lo que respecta a las enanas blancas, aún cuando van muriendo, parece que esta muerte se prolongará de una manera indefinida. Su única fuente de energía consiste en la contracción gravitatoria, pero esta fuerza es tan inmensa, que puede proporcionar a las enanas blancas poco radiantes la energía suficiente para perdurar decenas de miles de millones de años antes de oscurecerse por completo, y convertirse en «enanas negras».

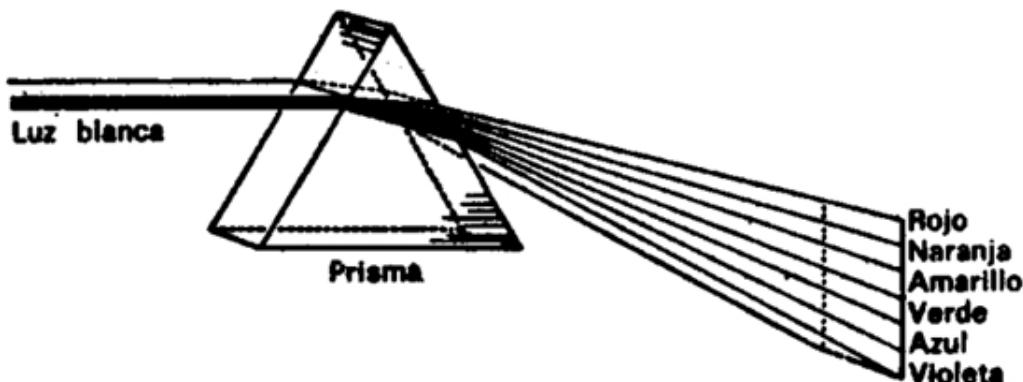
O bien pudiera ser, como veremos hacia el final del capítulo- que ni siquiera la enana blanca representara la fase culminante de esa evolución estelar y que hubiera estrellas incluso más condensadas, cuyas partículas atómicas se aproximaran entre sí hasta entrar virtualmente en contacto; entonces, toda la masa de una estrella se comprimiría hasta formar un globo de un diámetro no superior a los 16 km.

La detección de esos casos extremos requerirá un compás de espera, hasta que aparezcan nuevos métodos para explorar el Universo; entonces será factible el aprovechamiento de otras radiaciones que no sean las de la luz visible.

## Las Ventanas del Universo

Las más formidables armas del hombre para su conquista del conocimiento son la mente racional y la insaciable curiosidad que lo impulsa. Y esta mente, llena de recursos, ha inventado sin cesar instrumentos para abrir nuevos horizontes más allá del alcance de sus órganos sensoriales.

El ejemplo más conocido es el vasto cúmulo de conocimientos que siguieron a la invención del telescopio, en 1609. En esencia, el telescopio es, simplemente, un ojo inmenso. En contraste con la pupila humana, de 6 mm, el telescopio de 200 pulgadas del Monte Palomar tiene más de 100.000 mm<sup>2</sup> de superficie receptora de luz. Su poder colector de la luz intensifica la luminosidad de una estrella aproximadamente un millón de veces, en comparación con la que puede verse a simple vista.



*Experimento de Newton con formación del espectro de la luz blanca.*

Este telescopio, puesto en servicio en 1948, es el más grande en la actualidad, aunque la Unión Soviética, cuyo mayor ingenio actual, en este sentido, es uno de 102 pulgadas, está construyendo otro de 236 pulgadas. Durante la década 1950-1960. Merle A. Ture desarrolló un tubo de imagen que ampliaba electrónicamente la luz recibida de un telescopio, triplicando su poder. Sin embargo, en este caso también es aplicable la ley de la rentabilidad. Construir telescopios aún mayores carecería de sentido, dado que la absorción de la luz y las variaciones térmicas de la atmósfera terrestre son factores que limitan la capacidad para distinguir los detalles más pequeños. Si han de construirse telescopios mayores, sólo se podrá sacarles

todo el partido en un observatorio dispuesto en el vacío, quizás instalado en la Luna.

Pero la simple ampliación e intensificación de la luz no es todo lo que los telescopios pueden aportar al ser humano. El primer paso para convertirlo en algo más que un simple colector de luz se dio en 1666, cuando Isaac Newton descubrió que la luz podía separarse en lo que él denominó un «espectro» de colores. Hizo pasar un haz de luz solar a través de un prisma de cristal de forma triangular, y comprobó que el haz originaba una banda constituida por luz roja, naranja, amarilla, verde, azul y violeta, y que cada color pasaba al próximo mediante una transición suave. (Por supuesto que el fenómeno en sí ya era familiar en la forma del arco iris, que es el resultado del paso de la luz solar a través de las gotitas de agua, las cuales actúan como diminutos prismas.)

Lo que Newton demostró fue que la luz solar, o «luz blanca», es una mezcla de muchas radiaciones específicas (que hoy reconocemos como formas ondulatorias, de diversa longitud de onda), las cuales excitan el ojo humano, determinando la percepción de los citados colores. El prisma los separa, debido a que, al pasar del aire al cristal y de éste a aquél, la luz es desviada en su trayectoria o «refractada», y cada longitud de onda experimenta cierto grado de refracción, la cual es mayor cuanto más corta es la longitud de onda. Las longitudes de onda de la luz violeta son las más refractadas; y las menos, las largas longitudes de onda del rojo.

Entre otras cosas, esto explica un importante defecto en los primeros telescopios, o sea, que los objetos vistos a través de los telescopios aparecían rodeados de anillos de color, que hacían confusa la imagen, debido a que la dispersaban en espectros las lentes a cuyo través pasaba la luz.

Newton intentó una y otra vez corregir este defecto, pues ello ocurría al utilizar lentes de cualquier tipo. Con tal objeto, ideó y construyó un «telescopio reflector», en el cual se utilizaba un espejo parabólico, más que una lente, para ampliar la imagen. La luz de todas las longitudes de onda era reflejada de la misma forma, de tal modo que no se formaban espectros por refracción y, de consiguiente, no aparecían anillos de color («aberración cromática»).

En 1757, el óptico inglés John Dollond fabricó lentes de dos clases distintas de cristal; cada una de ellas equilibraba la tendencia de la otra a formar espectros. De

esta forma pudieron construirse lentes «acromáticas» («sin color»). Con ellas volvieron a hacerse populares los «telescopios refractores». El más grande de tales telescopios, con una lente de 40 pulgadas, se encuentra en el Observatorio de Yerkes, cerca de la Bahía de Williams (Wisconsin), y fue instalado en 1897. Desde entonces no se han construido telescopios refractores de mayor tamaño, ni es probable que se construyan, ya que las lentes de dimensiones mayores absorberían tanta luz que neutralizarían las ventajas ofrecidas por su mayor potencia de amplificación. En consecuencia, todos los telescopios gigantes construidos hasta ahora son reflectores, puesto que la superficie de reflexión de un espejo absorbe muy poca cantidad de luz.

En 1814, un óptico alemán, Joseph von Fraunhofer, realizó un experimento inspirado en el de Newton. Hizo pasar un haz de luz solar a través de una estrecha hendidura, antes que fuera refractado por un prisma. El espectro resultante estaba constituido por una serie de imágenes de la hendidura, en la luz de todas las longitudes de onda posible. Había tantas imágenes de dicha hendidura, que se unían entre sí para formar el espectro. Los prismas de Fraunhofer eran tan perfectos y daban imágenes tan exactas, que permitieron descubrir que no se formaban algunas de las imágenes de la hendidura. Si en la luz solar no había determinadas longitudes de ondas de luz, no se formaría la imagen correspondiente de la hendidura en dichas longitudes de onda, y el espectro solar aparecería cruzado por líneas negras.

Fraunhofer señaló la localización de las líneas negras que había detectado, las cuales eran más de 700. Desde entonces se llaman «líneas de Fraunhofer». En 1842, el físico francés Alexandre Edmond Becquerel fotografió por primera vez las líneas del espectro polar. Tal fotografía facilitaba sensiblemente los estudios espectrales, lo cual, con ayuda de instrumentos modernos, ha permitido detectar en el espectro solar más de 30.000 líneas negras y determinar sus longitudes de onda. A partir de 1850, una serie de científicos emitió la hipótesis que las líneas eran características de los diversos elementos presentes en el Sol. Las líneas negras representaban la absorción de la luz por ciertos elementos, en las correspondientes longitudes de onda; en cambio, las líneas brillantes representarían emisiones características de luz por los elementos. Hacia 1859, el químico alemán Robert

Wilhelm Bunsen y su compatriota Gustav Robert Kirchhoff elaboraron un sistema para identificar los elementos. Calentaron diversas sustancias hasta su incandescencia, dispersaron la luz en espectros y midieron la localización de las líneas, en este caso, líneas brillantes de emisión- contra un fondo oscuro, en el cual se había dispuesto una escala, e identificaron cada línea con un elemento particular. Su «espectroscopio» se aplicó en seguida para descubrir nuevos elementos mediante nuevas líneas espectrales no identificables con los elementos conocidos. En un par de años, Bunsen y Kirchhoff descubrieron de esta forma el cesio y el rubidio.

El espectroscopio se aplicó también a la luz del Sol y de las estrellas. Y en poco tiempo aportó una sorprendente cantidad de información nueva, tanto de tipo químico como de otra naturaleza. En 1862, el astrónomo sueco Anders Jonas Angstrom identificó el hidrógeno en el Sol gracias a la presencia de las líneas espectrales características de este elemento.

El hidrógeno podía ser también detectado en las estrellas, aunque los espectros de éstas variaban entre sí, debido tanto a las diferencias en su constitución química como a otras propiedades. En realidad, las estrellas podían clasificarse de acuerdo con la naturaleza general de su grupo de líneas espectrales. Tal clasificación la realizó por vez primera el astrónomo italiano Pietro Angelo Secchi, a mediados del siglo XIX, basándose en algunos espectros. Hacia 1890, el astrónomo americano Edward Charles Pickering estudió los espectros estelares de decenas de millares de cuerpos celestes, lo cual permitió realizar la clasificaciónpectral con mayor exactitud.

Originalmente, esta clasificación se efectuó con las letras mayúsculas por orden alfabético; pero a medida que se fue aprendiendo cada vez más sobre las estrellas, hubo que alterar dicho orden para disponer las «clases espectrales» en una secuencia lógica. Si las letras se colocan en el orden de las estrellas de temperatura decreciente, tenemos O, B, A, F, G, H, M, R, N y S. Cada clasificación puede subdividirse luego con los números del 1 al 10. El Sol es una estrella de temperatura media, de la clasepectral de G-0. mientras que Alfa de Centauro es de la G-2. La estrella Proción, algo más caliente, pertenece a la clase F-5, y Sirio, de temperatura probablemente más elevada, de la A-0.

El espectroscopio podía localizar nuevos elementos no sólo en la Tierra, sino también en el firmamento. En 1868, el astrónomo francés Pierre-Jules-César Janssen observó un eclipse total de Sol desde la India, y comunicó la aparición de una línea espectral que no podía identificar con la producida por cualquier elemento conocido. El astrónomo inglés Sir Norman Lockyer, seguro que tal línea debía de representar un nuevo elemento, lo denominó «helio», de la voz griega con que se designa el «Sol». Sin embargo, transcurrieran 30 años más antes que se descubriera el helio en nuestro planeta.

Como ya hemos visto, el espectroscopio se convirtió en un instrumento para medir la velocidad radial de las estrellas, así como para investigar otros muchos problemas. Por ejemplo, las características magnéticas de una estrella, su temperatura, si era simple o doble, etc.

Además, las líneas espectrales constituyan una verdadera enciclopedia de información sobre la estructura atómica, que, sin embargo, no pudo utilizarse adecuadamente hasta después de 1890 cuando se descubrieron las partículas subatómicas en el interior del átomo. Por ejemplo, en 1885, el físico alemán Johann Jakob Balmer demostró que el hidrógeno producía en el espectro toda una serie de líneas, que se hallaban espaciadas con regularidad, de acuerdo con una fórmula relativamente simple. Este fenómeno fue utilizado una generación más tarde, para deducir una imagen importante de la estructura del átomo de hidrógeno (véase capítulo VII).

El propio Lockyer mostró que las líneas espectrales producidas por un elemento dado se alteraban a altas temperaturas. Esto revelaba algún cambio en los átomos. De nuevo, este hallazgo no fue apreciado hasta que se descubrió que un átomo constaba de partículas más pequeñas, algunas de las cuales eran expulsadas a temperaturas elevadas; lo cual alteraba la estructura atómica y, por tanto, la naturaleza de las líneas que producía el átomo. (Tales líneas alteradas fueron a veces interpretadas erróneamente como nuevos elementos, cuando en realidad el helio es el único elemento nuevo descubierto en los cielos.)

Cuando, en 1830, el artista francés Louis-Jacques-Mandé Daguerre obtuvo los primeros «daguerrotipos» e introdujo así la fotografía, ésta se convirtió pronto en un valiosísimo instrumento para la Astronomía. A partir de 1840, varios astrónomos

americanos fotografiaron la Luna, y una fotografía tomada por George Phillips Bond impresionó profundamente en la Exposición Internacional celebrada en Londres en 1851. También fotografiaron el Sol.

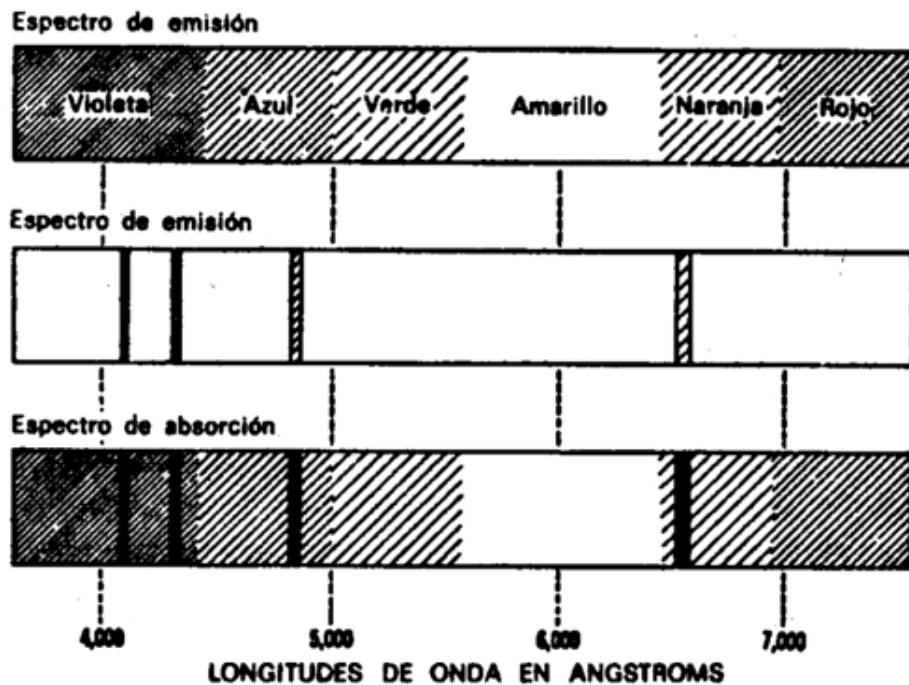
En 1860, Secchi tomó la primera fotografía de un eclipse total de Sol. Hacia 1870, las fotografías de tales eclipses habían demostrado ya que la corona y las protuberancias formaban parte del Sol, no de nuestro satélite.

Entretanto, a principios de la década iniciada con 1850, los astrónomos obtuvieron también fotografías de estrellas distantes. En 1887, el astrónomo escocés David Gill tomaba de forma rutinaria fotografías de las estrellas. De esta forma, la fotografía se hizo más importante que el mismo ojo humano para la observación del Universo. La técnica de la fotografía con telescopio ha progresado de forma constante. Un obstáculo de gran importancia lo constituye el hecho que un telescopio grande puede cubrir sólo un campo muy pequeño. Si se intenta aumentar el campo, aparece distorsión en los bordes. En 1930, el óptico ruso-alemán Bernard Schmidt ideó un método para introducir una lente correctora, que podía evitar la distorsión. Con esta lente podía fotografiarse cada vez una amplia área del firmamento y observarla en busca de objetos interesantes, que luego podían ser estudiados con mayor detalle mediante un telescopio convencional. Como quiera que tales telescopios son utilizados casi invariablemente para los trabajos de fotografía, fueron denominados «cámaras de Schmidt».

Las cámaras de Schmidt más grandes empleadas en la actualidad son una de 53 pulgadas, instalada en Tautenberg (Alemania oriental), y otra, de 48 pulgadas, utilizada junto con el telescopio Hale de 200 pulgadas, en el Monte Palomar. La tercera, de 39 pulgadas, se instaló en 1961 en un observatorio de la Armenia soviética.

Hacia 1800, William Herschel (el astrónomo que por vez primera explicó la probable forma de nuestra galaxia) realizó un experimento tan sencillo como interesante. En un haz de luz solar que pasaba a través de un prisma, mantuvo un termómetro junto al extremo rojo del espectro. La columna de mercurio ascendió. Evidentemente, existía una forma de radiación invisible a longitudes de onda que se hallaban por debajo del espectro visible. La radiación descubierta por Herschel

recibió el nombre de «infrarroja», por debajo del rojo-. Hoy sabemos que casi el 60 % de la radiación solar se halla situada en el infrarrojo.



*El espectro visible, en el que se indican las líneas de emisión y absorción.*

Aproximadamente por la misma época, el físico alemán Johann Wilhelm Ritter exploró el otro extremo del espectro. Descubrió que el nitrato de plata, que se convierte en plata metálica y se oscurece cuando es expuesto a la luz azul o violeta, se descomponía aún más rápidamente al colocarla por debajo del punto en el que el espectro era violeta. Así, Ritter descubrió la «luz» denominada ahora «ultravioleta» (más allá del violeta). Estos dos investigadores, Herschel y Ritter, habían ampliado el espectro tradicional y penetrado en nuevas regiones de radiación.

Estas nuevas regiones prometían ofrecer abundante información. La región ultravioleta del espectro solar, invisible a simple vista, puede ponerse de manifiesto con toda claridad mediante la fotografía. En realidad, si se utiliza un prisma de cuarzo, el cuarzo transmite la luz ultravioleta, mientras que el cristal corriente absorbe la mayor parte de ella- puede registrarse un espectro ultravioleta bastante complejo, como lo demostró por vez primera, en 1852, el físico británico George Gabriel Stokes. Por desgracia, la atmósfera sólo permite el paso de radiaciones del

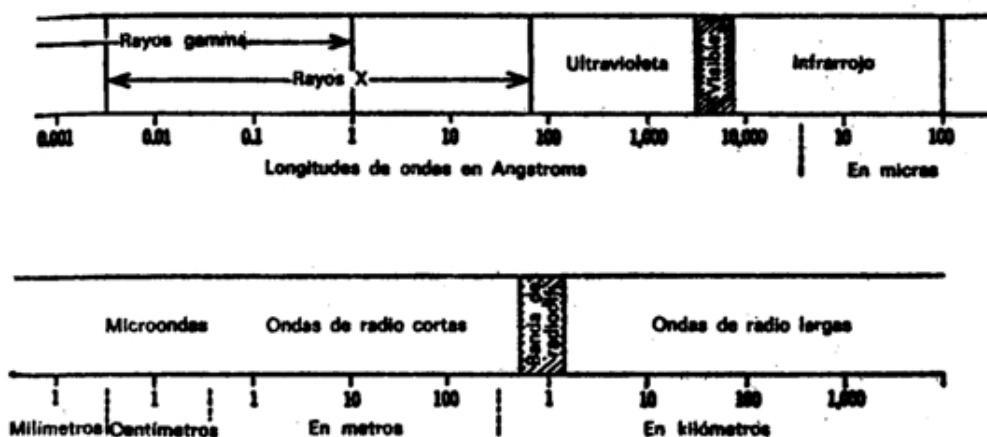
«ultravioleta cercano», o sea la región del espectro constituida por longitudes de onda casi tan largas como las de la luz violeta. El «ultravioleta lejano», con sus longitudes de onda particularmente cortas, es absorbido en la atmósfera superior. En 1860, el físico escocés James Clerk Maxwell elaboró una teoría que predecía la existencia de toda una familia de radiaciones asociadas a los fenómenos eléctricos y magnéticos («radiación electromagnética»), familia de la cual la luz corriente era sólo una pequeña fracción. La primera radiación definida de las predichas por él llegó un cuarto de siglo más tarde, siete años después de su prematura muerte por cáncer. En 1887, el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz, al generar una corriente oscilatoria a partir de la chispa de una bobina de inducción, produjo y detectó una radiación de longitudes de onda extremadamente largas, mucho más largas que las del infrarrojo corriente. Se les dio el nombre de «ondas radioeléctricas».

Las longitudes de onda de la luz visible se miden en micras o micrones (milésima parte del milímetro, representada por la letra griega  $\mu$ ). Se extienden desde las 0,39 (extremo violeta) a las 0,78  $\mu$ , (extremo rojo). Seguidamente se encuentra el «infrarrojo cercano» (0,78 a 3  $\mu$ ), el «infrarrojo medio» (3 a 30  $\mu$ ), el «infrarrojo lejano» (30 a 1.000  $\mu$ ). Aquí es donde empiezan las ondas radioeléctricas: las denominadas «ondas ultracortas» se extienden desde las 1.000 a las 160.000  $\mu$ . Y las radioeléctricas de onda larga llegan a tener muchos miles de millones de micras. La radiación puede caracterizarse no sólo por la longitud de onda, sino también por la «frecuencia», o sea, el número de ondas de radiación producidas por segundo. Este valor es tan elevado para la luz visible y la infrarroja, que no suele emplearse en estos casos. Sin embargo, para las ondas de radio la frecuencia alcanza cifras más bajas, y entonces es ventajoso definirlas en términos de ésta. Un millar de ondas por segundo se llama «kilociclo», y un millón de ondas por segundo, «megaciclo». La región de las ondas ultracortas se extiende desde los 300.000 hasta los 1.000 megaciclos. Las ondas de radio mucho mayores, usadas en las estaciones radio corrientes, se hallan en el campo de frecuencia de los kilociclos. Una década después del descubrimiento de Hertz, se extendió, de forma similar, el otro extremo del espectro. En 1895, el físico alemán Wilhelm Konrad Roentgen descubrió, accidentalmente, una misteriosa radiación que de nominó rayos X. Sus longitudes de onda resultaron ser más cortas que las ultravioleta. Posteriormente,

Rutherford demostró que los «rayos gamma», asociados a la radiactividad, tenían una longitud de onda más pequeña aún que la de los rayos X.

La mitad del espectro constituido por las ondas cortas se divide ahora, de una manera aproximada, de la siguiente forma: las longitudes de onda de 0,39 a 0,17  $\mu$  pertenecen al «ultravioleta cercano»; de las 0,17 a la 0,01  $\mu$ , al «ultravioleta lejano»; de las 0,01 a las 0,00001  $\mu$ , a los rayos X; mientras que los rayos gamma se extienden desde esta cifra hasta menos de la milmillonésima parte de la micra.

Así, pues, el espectro original de Newton se había extendido enormemente. Si consideramos cada duplicación de una longitud de onda como equivalente a una octava (como ocurre en el caso del sonido), el espectro electromagnético, en toda su extensión estudiada, abarca 60 octavas. La luz visible ocupa sólo una de estas octavas, casi en el centro del espectro.



*El espectro de las radiaciones electromagnéticas.*

Por supuesto que con un espectro más amplio podemos tener un punto de vista más concreto sobre las estrellas. Sabemos, por ejemplo, que la luz solar es rica en luz ultravioleta e infrarroja. Nuestra atmósfera filtra la mayor parte de estas radiaciones; pero en 1931, y casi por accidente, se descubrió una ventana de radio al Universo.

Karl Jansky, joven ingeniero radiológico de los laboratorios de la «Bell Telephone», estudió los fenómenos de estática que acompañan siempre a la recepción de radio. Apreció un ruido muy débil y constante, que no podía proceder de ninguna de las

fuentes de origen usuales. Finalmente, llegó a la conclusión que la estática era causada por ondas de radio procedentes, del espacio exterior.

Al principio, las señales de radio procedentes del espacio parecían más fuertes en la dirección del Sol; pero, con los días, tal dirección fue desplazándose lentamente desde el Sol y trazando un círculo en el cielo. Hacia 1933, Jansky emitió la hipótesis que las ondas de radio procedían de la Vía Láctea y, en particular, de Sagitario, hacia el centro de la Galaxia.

Así nació la «Radioastronomía». Los astrónomos no se sirvieron de ella en seguida, pues tenía graves inconvenientes. No proporcionaba imágenes nítidas, sino sólo trazos ondulantes sobre un mapa, que no eran fáciles de interpretar. Pero había algo más grave aún: las ondas de radio eran de una longitud demasiado larga para poder resolver una fuente de origen tan pequeña como una estrella. Las señales de radio a partir del espacio ofrecían longitudes de onda de cientos de miles e incluso de millones de veces la longitud de onda de la luz, y ningún receptor convencional podía proporcionar algo más que una simple idea general de la dirección que procedían. Estas dificultades oscurecieron la importancia del nuevo descubrimiento, hasta que un joven radiotécnico, Grote Reber, por pura curiosidad personal, prosiguió los estudios sobre este hallazgo. Hacia 1937, gastó mucho tiempo y dinero en construir, en el patio de su casa, un pequeño «radiotelescopio» con un «reflector» paraboloide de unos 900 cm de diámetro, para recibir y concentrar las ondas de radio. Empezó a trabajar en 1938, y no tardó en descubrir una serie de fuentes de ondas de radio distintas de la de Sagitario: una, en la constelación del Cisne, por ejemplo, y otra en la de Casiopea. (A tales fuentes de radiación se les dio al principio el nombre de «radioestrellas», tanto si las fuentes de origen eran realmente estrellas, como si no lo eran; hoy suelen llamarse «fuentes radioeléctricas».)

Durante la Segunda Guerra Mundial, mientras los científicos británicos desarrollaban el radar, descubrieron que el Sol interfería sus señales al emitir radiaciones en la región de las ondas ultracortas. Esto desvió su interés hacia la Radioastronomía, y, después de la guerra, los ingleses prosiguieron sus radiocontactos con el Sol. En 1950 descubrieron que gran parte de las señales radioeléctricas procedentes del Sol estaban asociadas con sus manchas. (Jansky había realizado sus experiencias

durante un período de mínima actividad solar, motivo por el cual había detectado más la radiación galáctica que la del Sol.)

Los británicos fueron los pioneros en la construcción de grandes antenas y series de receptores muy separados (técnica usada por vez primera en Australia) para hacer más nítida la recepción y localizar las estrellas emisoras de ondas radioeléctricas. Su pantalla, de 75 m, en Jodrell Bank, Inglaterra, construida bajo la supervisión de Sir Bernard Lowell, fue el primer radiotelescopio verdaderamente grande.

En 1947, el astrónomo australiano John C. Bolton detectó la tercera fuente radioeléctrica más intensa del firmamento, y demostró que procedía de la nebulosa del Cangrejo. De las 2.000 fuentes radioeléctricas detectadas en distintos lugares del firmamento, ésta fue la primera en ser asignada a un objeto realmente visible. Parecía improbable que fuera una enana blanca lo que daba origen a la radiación, ya que otras enanas blancas no cumplían esta misión. Resultaba mucho más probable que la fuente en cuestión fuese la nube de gas en expansión, en la nebulosa.

Esto apoyaba otras pruebas que las señales radioeléctricas procedentes del cosmos se originaban principalmente en gases turbulentos. El gas turbulento de la atmósfera externa del Sol origina ondas de radio, por lo cual se denomina «sol radioemisor», cuyo tamaño es superior al del Sol visible. Posteriormente se comprobó que también Júpiter, Saturno y Venus, planetas de atmósfera turbulentas eran emisores de ondas radioeléctricas. Sin embargo, en el caso de Júpiter, la radiación, detectada por primera vez en 1955 y registrada ya en 1950- parece estar asociada de algún modo con un área particular, la cual se mueve tan regularmente, que puede servir para determinar el período de rotación de Júpiter con una precisión de centésimas de segundo. ¿Acaso indica esto la asociación con una parte de la superficie sólida de Júpiter, una superficie nunca vista tras las oscuras, nubes de una atmósfera gigantesca? Y si es así, ¿por qué? En 1964 se señaló que el período de rotación de Júpiter se había alterado bruscamente, aunque en realidad lo había hecho sólo de forma ligera. De nuevo hemos de preguntarnos: ¿Por qué? Hasta el momento, los estudios radioeléctricos han planteado más cuestiones de las que han resuelto, pero no hay nada tan estimulante para la Ciencia y para los científicos como una buena cuestión no resuelta.

Jansky, que fue el iniciador de todo esto, no recibió honores durante su vida, y

murió, en 1950, a los 44 años de edad, cuando la Radioastronomía empezaba a adquirir importancia. En su honor, y como reconocimiento póstumo, las emisiones radioeléctricas se miden ahora por «jankies».

La Radioastronomía exploró la inmensidad del espacio. Dentro de nuestra Galaxia existe una potente fuerza radioeléctrica, la más potente entre las que trascienden el Sistema Solar, denominada «Cas» por hallarse localizada en Casiopea. Walter Baade y Rudolph Minkowski, en el Monte Palomar, dirigieron el telescopio de 200 pulgadas hacia el punto donde esta fuente había sido localizada por los radiotelescopios británicos, y encontraron indicios de gas en turbulencias. Es posible que se trate de los restos de la supernova de 1604, que Kepler había observado en Casiopea.

Un descubrimiento más distante aún fue realizado en 1951. La segunda fuente de radio de mayor intensidad se halla en la constelación del Cisne. Reber señaló por vez primera su presencia en 1944. Cuando los radiotelescopios la localizaron más tarde con mayor precisión, pudo apreciarse que esta fuente radioeléctrica se hallaba fuera de nuestra Galaxia. Fue la primera que se localizó más allá de la Vía Láctea. Luego, en 1951, Baade, estudiando, con el telescopio de 200 pulgadas, la porción indicada del firmamento, descubrió una singular galaxia en el centro del área observada. Tenía doble centro y parecía estar distorsionada. Baade sospechó que esta extraña galaxia, de doble centro y con distorsión, no era en realidad una galaxia, sino dos, unidas por los bordes como dos platillos al entrechocar. Baade pensó que eran dos galaxias en colisión, posibilidad que ya había discutido con otros astrónomos.

Necesitó un año para aclarar la cuestión. El espectroscopio mostraba líneas de absorción, que sólo podían explicarse suponiendo que el polvo y el gas de las dos galaxias habían entrado en colisión, colisión que se acepta hoy como un hecho. Además, parece probable que los choques galácticos sean bastante comunes, especialmente en los aglomerados densos, donde las galaxias pueden estar separadas por distancias no muy superiores a sus propios diámetros.

Cuando dos galaxias entran en colisión no es probable que choquen entre sí las estrellas contenidas en ellas: se hallan tan ampliamente espaciadas, que una galaxia podría pasar a través de otra sin que ninguna estrella se aproximara

demasiado a otra. Pero las nubes de polvo y gas son agitadas con enorme turbulencia, con lo cual se genera una radiación, radioeléctrica de gran intensidad. Las galaxias en colisión en el Cisne se hallan distantes de nosotros unos 260 millones de años luz, pero las señales radioeléctricas que nos llegan son más intensas que las de la nebulosa del Cangrejo, de la que nos separan sólo 3.500 años luz. Por tanto, se habrían de detectar galaxias en colisión a distancias mayores de las que pueden verse con el telescopio óptico. El radiotelescopio de 75 m de Jodrell Bank, por ejemplo, podía alcanzar distancias mayores que el telescopio de 200 pulgadas de Hale.

Pero cuando aumentó el número de fuentes radioeléctricas halladas entre las galaxias distantes, y tal número pasó de 100, los astrónomos se inquietaron. No era posible que todas ellas pudieran atribuirse a galaxias en colisión. Sería como pretender sacar demasiado partido a una posible explicación.

A decir verdad, la noción sobre colisiones galácticas en el Universo se tambaleó cada vez más. En 1955, el astrofísico soviético Victor Amazaspovich Ambartsumian expuso ciertos fundamentos teóricos para establecer la hipótesis que las radiogalaxias tendían a la explosión, más bien que a la colisión. En 1960, Fred Hoyle sugirió que las galaxias que emitían tan tremendos haces de ondas radioeléctricas que podían detectarse a cientos de millones de años luz, podían ofrecer series completas de supernovas. En el hacinado centro de un núcleo galáctico puede explotar una supernova y calentar a una estrella próxima hasta el punto de determinar su explosión y transformación en otra supernova. La segunda explosión inicia una tercera, ésta una cuarta, y así sucesivamente. En cierto sentido, todo el centro de una galaxia es una secuencia de explosiones.

La posibilidad que ocurra esto fue confirmada en gran parte por el descubrimiento, en 1963, de la galaxia M-82, en la constelación de la Osa Mayor, una fuente radioeléctrica de gran intensidad (aproximadamente, unos 10 millones de años luz), es una galaxia en explosión de este tipo.

El estudio de la M-82 con el telescopio Hale de 200 pulgadas, y usando la luz de una longitud de onda particular, mostró grandes chorros de materia que, emergían aproximadamente a unos 1.000 años luz del centro de la galaxia. Por la cantidad de materia que explotaba, la distancia que ésta había recorrido y su velocidad de

desplazamiento, parece posible deducir que, hace 1,5 millones de años, llegó por vez primera a nosotros la luz de unos 5 millones de estrellas que habían estallado casi simultáneamente en el núcleo.

### **Los Nuevos Objetos**

Al entrar en la década de 1960-1970, los astrónomos tenían buenas razones para suponer que los objetos físicos del firmamento nos depararían ya pocas sorpresas. Nuevas teorías, nuevos atisbos reveladores..., sí; pero habiendo transcurrido ya tres siglos de concienzuda observación con instrumentos cada vez más perfectos, no cabía esperar grandes y sorprendentes descubrimientos en materia de estrellas, galaxias u otros elementos similares.

Si algunos de los astrónomos opinaban así, habrán sufrido una serie de grandes sobresaltos, el primero de ellos, ocasionado por la investigación de ciertas radiofuentes que parecieron insólitas, aunque no sorprendentes.

Las primeras radiofuentes sometidas a estudio en la profundidad del espacio parecían estar en relación con cuerpos dilatados de gas turbulento: la nebulosa del Cangrejo, las galaxias distantes y así sucesivamente. Sin embargo, surgieron unas cuantas radiofuentes cuya pequeñez parecía desusada. Cuando los radiotelescopios, al perfeccionarse, fueron permitiendo una visualización cada vez más alambicada de las radiofuentes, se vislumbró la posibilidad que ciertas estrellas individuales emitieran radioondas.

Entre esas radiofuentes compactas se conocían las llamadas 3C48, 3C147, 3C196, 3C273 y 3C286. «3C» es una abreviatura para designar el «Tercer Catálogo de estrellas radioemisoras, de Cambridge», lista compilada por el astrónomo inglés Martin Ryle y sus colaboradores; las cifras restantes designan el lugar de cada fuente en dicha lista.

En 1960, Sandage exploró concienzudamente, con un telescopio de 200 pulgadas, las áreas donde aparecían estas radiofuentes compactas, y en cada caso una estrella padeció la fuente de radiación. La primera estrella descubierta fue la asociada con el 3C48. Respecto al 3C273, el más brillante de todos los objetos, Cyril Hazard determinó en Australia su posición exacta al registrar el bache de radiación cuando la Luna pasó ante él.

Ya antes se habían localizado las citadas estrellas mediante barridos fotográficos del firmamento; entonces se tomaron por insignificantes miembros de nuestra propia Galaxia. Sin embargo, su inusitada radioemisión indujo a fotografiarlas con más minuciosidad, hasta que, por fin, se puso de relieve que *no todo* era como se había supuesto. Ciertas nebulosidades ligeras resultaron estar claramente asociadas a algunos objetos, y el 3C273 pareció proyectar un minúsculo chorro de materia. En realidad eran dos las radiofuentes relacionadas con el 3C273: una procedente de la estrella, y otra, del chorro. El detenido examen permitió poner de relieve otro punto interesante: las citadas estrellas irradiaban luz ultravioleta con una profusión desusada.

Entonces pareció lógico suponer que, pese a su aspecto de estrellas, las radiofuentes compactas no eran, en definitiva, estrellas corrientes. Por lo pronto se las denominó «fuentes cuasiestelares», para dejar constancia de su similitud con las estrellas. Como este término revistiera cada vez más importancia para los astrónomos, la denominación de «radiofuentे cuasiestelar» llegó a resultar engorrosa, por lo cual, en 1964, el físico americano, de origen chino, Hong Yee Chiu ideó la abreviatura «cuasar» (*cuasi-estelar*), palabra que, pese a ser poco eufónica, ha conquistado un lugar inamovible en la terminología astronómica.

Como es natural, el cuasar ofrece el suficiente interés como para justificar una investigación con la batería completa de procedimientos técnicos astronómicos, lo cual significa espectroscopia. Astrónomos tales como Allen Sandage, Jesse L. Greenstein y Maarten Schmidt se afanaron por obtener el correspondiente espectro. Al acabar su trabajo, en 1960, se encontraron con unas rayas extrañas, cuya identificación fue de todo punto imposible. Por añadidura, las rayas del espectro de cada cuasar no se asemejaban a las de ningún otro.

En 1963, Schmidt estudió de nuevo el 3C273, que, por ser el más brillante de los misteriosos objetos, mostraba también el espectro más claro. Se veían en él seis rayas, cuatro de las cuales estaban espaciadas de tal modo, que semejaban una banda de hidrógeno, lo cual habría sido revelador si no fuera por la circunstancia que tales bandas no deberían estar en el lugar en que se habían encontrado. Pero, ¿y si aquellas rayas tuviesen una localización distinta, pero hubieran aparecido allí porque se las hubiese desplazado hacia el extremo rojo del espectro? De haber

ocurrido así, tal desplazamiento habría sido muy considerable e implicaría un retroceso a la velocidad de 40.000 km/seg. Aunque esto parecía inconcebible, si se hubiese producido tal desplazamiento, sería posible identificar también las otras dos rayas, una de las cuales representaría oxígeno menos dos electrones, y la otra, magnesio menos dos electrones.

Schmidt y Greenstein dedicaron su atención a los espectros de otros cuásares y comprobaron que las rayas serían también identificables si se presupusiera un enorme desplazamiento hacia el extremo rojo.

Los inmensos desplazamientos hacia el rojo podrían haber sido ocasionados por la expansión general del Universo; pero si se planteara la ecuación del desplazamiento rojo con la distancia, según la ley de Hubble, resultaría que el cuasar no podría ser en absoluto una estrella corriente de nuestra galaxia. Debería figurar entre los objetos más distantes, situados a miles de millones de años luz.

Hacia fines de 1960 se habían descubierto ya, gracias a tan persistente búsqueda, 150 cuásares. Luego se procedió a estudiar los espectros de unas 110. Cada uno de ellos mostró un gran desplazamiento hacia el rojo, y, por cierto, en algunos casos bastante mayor que el del 3C273. Según se ha calculado, algunos distan unos 9 mil millones de años luz.

Desde luego, si los cuásares se hallan tan distantes como se infiere de los desplazamientos hacia el extremo rojo, los astrónomos habrán de afrontar algunos obstáculos desconcertantes y difíciles de franquear. Por lo tanto, esos objetos deberán ser excepcionalmente luminosos, para brillar tanto a semejante distancia: entre treinta y cien veces más luminosos que toda una galaxia de tipo corriente.

Ahora bien, si fuera cierto y los cuásares tuvieran la forma y el aspecto de una galaxia, encerrarían un número de estrellas cien veces superior al de una galaxia común y serían cinco o seis veces mayores en cada dimensión. E incluso a esas enormes distancias deberían mostrar, vistas a través de los grandes telescopios, unos inconfundibles manchones ovalados de luz. Pero no ocurre así. Hasta con los mayores telescopios se ven como puntos semejantes a estrellas, lo cual parece indicar que, pese a su insólita luminosidad, tienen un tamaño muy inferior al de las galaxias corrientes.

Otro fenómeno vino a confirmar esa pequeñez. Hacia los comienzos de 1963 se comprobó que los cuásares eran muy variables respecto a la energía emitida, tanto en la región de la luz visible como en la de las radioondas. Durante un período de pocos años se registraron aumentos y disminuciones nada menos que del orden de tres magnitudes.

Para que la radiación experimente tan extremas variaciones en tan breve espacio de tiempo, un cuerpo debe ser pequeño. Las pequeñas variaciones obedecen a ganancias o pérdidas de brillo en ciertas regiones de un cuerpo; en cambio, las grandes abarcan todo el cuerpo sin excepción. Así, pues, cuando todo el cuerpo queda sometido a estas variaciones, se ha de notar algún efecto a lo largo del mismo, mientras duran las variaciones. Pero como quiera que no hay efecto alguno que viaje a mayor velocidad que la luz, si un cuasar varía perceptiblemente durante un período de pocos años, su diámetro no puede ser superior a un año luz. En realidad, ciertos cálculos parecen indicar que el diámetro de los cuásares podría ser muy pequeño, de algo así como una semana luz (804 mil millones de kilómetros).

Los cuerpos que son tan pequeños y luminosos a la vez deben consumir tales cantidades de energía, que sus reservas no pueden durar mucho tiempo, a no ser que exista una fuente energética hasta ahora inimaginable, aunque, desde luego, no imposible. Otros cálculos demuestran que un cuasar sólo puede liberar energía a ese ritmo durante un millón de años más o menos. Si es así, los cuásares descubiertos habrían alcanzado su estado de tales hace poco tiempo, hablando en términos cósmicos, y, por otra parte, puede haber buen número de objetos que fueron cuásares en otro tiempo, pero ya no lo son.

En 1965, Sandage anunció el descubrimiento de objetos que podrían ser cuásares envejecidos. Semejaban estrellas azuladas corrientes, pero experimentaban enormes cambios, que los hacían virar al rojo, como los cuásares.

Eran semejantes a éstos por su distancia, luminosidad y tamaño, pero no emitían radioondas. Sandage los denominó «blue stellar objects» (objetos estelares azules), que aquí designaremos, para abreviar, con la sigla inglesa de BSO.

Los BSO parecen ser más numerosos que los cuásares: según un cálculo aproximado de 1967, los BSO al alcance de nuestros telescopios suman 100.000. La

razón de tal superioridad numérica de los BSO sobre los cuásares es la que estos cuerpos viven mucho más tiempo en la forma de BSO.

La característica más interesante de los cuásares, dejando aparte el desconcertante enigma que existe acerca de su verdadera identidad- es que son, a la vez, cuerpos insólitos y se hallan muy distantes. Quizá sean los últimos representantes de ciertos elementos cuya existencia perdurara sólo durante la juventud del Universo. (En definitiva, un cuerpo situado a 9 mil millones de años luz es perceptible solo por la luz que dejó hace 9 mil millones de años, y posiblemente esta fecha sea sólo algo posterior a la explosión del «huevo cósmico».) Si nos atenemos a tal hipótesis, resulta evidente que el aspecto del Universo fue, hace miles de millones de años, distinto por completo del actual. Así, el Universo habría evolucionado según opinan quienes propugnan la teoría de la «gran explosión», y, en líneas generales, no es eternamente inmutable, según afirman los que defienden la teoría de la «creación continua».

El empleo de los cuásares como prueba en favor de la «gran explosión» no ha sido aceptado sin reservas. Algunos astrónomos, esgrimiendo diversas pruebas, aducen que los cuásares no se hallan realmente tan distantes como se cree, por lo cual no pueden tomarse como objetos representativos de la juventud del Universo. Pero quienes sustentan semejante criterio deben explicar cuál es el origen de las enormes variaciones hacia el rojo en el espectro del cuasar, ya que eliminan de antemano la única posibilidad, es decir, la inmensa distancia; y eso no es nada fácil. Aunque esta cuestión diste mucho de haber sido solucionada, considerando las enormes dificultades implícitas en ambas teorías, las opiniones parecen inclinarse, por lo general, en favor de los cuásares vistos como objetos muy remotos.

Aún cuando sea así, hay buenas razones para preguntarse si caracterizan concreta y exclusivamente la juventud del Universo. ¿Habrán sido distribuidos con una uniformidad relativa, de forma que estén presentes en el Universo en todas las edades?

Volvamos, pues, a 1943. Por este tiempo, el astrónomo americano Carl Seyfert observó una galaxia singular, de gran brillantez y núcleo muy pequeño. Desde entonces se descubrieron otras similares, y hoy se hace referencia al conjunto con la denominación de «galaxia Seyfert». Aunque hacia finales de 1960 se conocía sólo

una docena, hay buenas razones para suponer que casi el 1 % de las galaxias pertenecen a tipo Seyfert.

¿No sería posible que las galaxias Seyfert fueran objetos intermedios entre las galaxias corrientes y los cuásares? Sus brillantes centros muestran variaciones luminosas, que hacen de ellos algo casi tan pequeño como los cuásares. Si se intensificara aún más la luminosidad de tales centros y se oscureciera proporcionalmente el resto de la galaxia, acabaría por ser imperceptible la diferencia entre un cuasar y una galaxia Seyfert; por ejemplo la 3C120 podría considerarse un cuasar por su aspecto.

Las galaxias Seyfert experimentan sólo moderados cambios hacia el rojo, y su distancia no es enorme. Tal vez los cuásares sean galaxias Seyfert muy distantes; tanto, que podemos distinguir únicamente sus centros, pequeños y luminosos, y observar sólo las mayores. ¿No nos causará ello la impresión que estamos viendo unos cuásares extraordinariamente luminosos, cuando en verdad deberíamos sospechar que sólo unas cuantas galaxias Seyfert, muy grandes, forman esos cuásares, que divisamos a pesar de su gran distancia?

Pero si optamos por considerar las cercanas galaxias Seyfert como pequeños o, tal vez, grandes cuásares en pleno desarrollo, pudiera ser que la distribución de los cuásares no caracterizase exclusivamente la juventud del Universo y que, al fin y al cabo, su existencia no fuera una prueba contundente para fundamentar la teoría de la «gran explosión».

No obstante, la teoría de la «gran explosión» fue confirmada, por otros caminos, cuando menos se esperaba. En 1949, Gamow había calculado que la radiación asociada a la «gran explosión» se había atenuado con la expansión del Universo, hasta el extremo que hoy había quedado convertida en una fuente de radioondas que procedía, indistintamente, de todas las partes del firmamento, como una especie de fondo radioemisor. Gamow sugirió que esta radiación se podría comparar con la de objetos a una temperatura de -268º C.

En 1965, A. A. Penzias y R. W. Wilson, científicos de los «Bell Telephone Laboratories», en Nueva Jersey, detectaron precisamente esa radiación básica de radioondas e informaron sobre ella. La temperatura asociada a esta radiación resultó ser de -160º C, lo cual no estaba muy en desacuerdo con las predicciones

de Gamow. Hasta ahora no se ha emitido ninguna hipótesis, salvo la de la «gran explosión», para explicar la existencia de esa radiación básica. Así, pues, de momento parece dominar este campo la teoría de la «gran explosión» sobre el Universo evolutivo nacido con la proyección de grandes volúmenes de materia condensada.

Así como la emisión de radioondas ha originado ese peculiar y desconcertante cuerpo astronómico llamado cuasar, la investigación en el otro extremo del espectro esboza otro cuerpo igualmente peculiar, aunque no tan desconcertante.

Hacia 1958, el astrofísico americano Herbert Friedman descubrió que el Sol generaba una considerable cantidad de rayos X. Naturalmente no era posible detectarlos desde la superficie terrestre, pues la atmósfera los absorbía; pero los cohetes disparados más allá de la atmósfera y provistos de instrumentos adecuados, detectaban esa radiación con suma facilidad.

Durante algún tiempo constituyó un enigma la fuente de los rayos X solares. En la superficie del Sol, la temperatura es sólo de 6.000º C, o sea, lo bastante elevada para convertir en vapor cualquier forma de materia, pero insuficiente para producir rayos X. La fuente debería hallarse en la corona solar, tenue halo gaseoso que rodea al Sol por todas partes y que tiene una anchura de muchos millones de kilómetros. Aunque la corona difunde una luminosidad equivalente al 50 % de la lunar, sólo es visible durante los eclipses, por lo menos, en circunstancias corrientes, pues la luz solar propiamente dicha la neutraliza por completo. En 1930, el astrónomo francés Bernard-Ferdinand Lyot inventó un telescopio que a gran altitud, y con días claros, permitía observar la corona interna, aunque no hubiera eclipse.

Incluso antes de ser estudiados los rayos X con ayuda de cohetes, se creía que dicha corona era la fuente generadora de tales rayos, pues se la suponía sometida a temperaturas excepcionalmente elevadas. Varios estudios de su espectro (durante los eclipses) revelaron rayas que no podían asociarse con ningún elemento conocido. Entonces se sospechó la presencia de un nuevo elemento, que recibió el nombre de «coronio». Sin embargo, en 1941 se descubrió que los átomos de hierro podían producir las mismas rayas del coronio cuando perdían muchas partículas subatómicas. Ahora bien, para disociar todas esas partículas se requerían

temperaturas cercanas al millón de grados, suficientes, sin duda, para generar rayos X.

La emisión de rayos X aumenta de forma notable cuando sobreviene una erupción solar en la corona. Durante ese período, la intensidad de los rayos X comporta temperaturas equivalentes a los 100 millones de grados *en la corona*, por encima de la erupción. La causa de unas temperaturas tan enormes en el tenue gas de la corona sigue promoviendo grandes controversias. (Aquí es preciso distinguir entre la temperatura y el calor. La temperatura sirve, sin duda, para evaluar la energía cinética de los átomos o las partículas en el gas; pero como quiera que estas partículas son escasas, es bajo el verdadero contenido calorífico por unidad de volumen. Las colisiones entre partículas de extremada energía producen los rayos X. Estos rayos provienen también de otros espacios situados más allá del Sistema Solar. En 1963, Bruno Rossi y otros científicos lanzaron cohetes provistos de instrumentos para comprobar si la superficie lunar reflejaba los rayos X solares. Entonces descubrieron en el firmamento dos fuentes generadoras de rayos X singularmente intensos. Enseguida se pudo asociar la más débil (denominada «Tau X-1». por hallarse en la constelación de Tauro) a la nebulosa del Cangrejo. Hacia 1966 se descubrió que la más potente, situada en la constelación de Escorpión («Esco X-1»), era asociable a un objeto óptico que parecía ser (como la nebulosa del Cangrejo) el residuo de una antigua nova. Desde entonces se han detectado en el firmamento varias docenas de fuentes generadoras de rayos X, aunque más débiles.

La emisión de rayos X de la energía suficiente como para ser detectados a través de una brecha interestelar, requería una fuente de considerable masa, y temperaturas excepcionalmente altas. Así, pues, quedaba descartada la concentración de rayos emitidos por la corona solar.

Esa doble condición de masa y temperatura excepcional (un millón de grados) parecía sugerir la presencia de una «estrella enana superblanca.». En fechas tan lejanas ya como 1934, Zwicky había insinuado que las partículas subatómicas de una enana blanca podrían combinarse para formar partículas no modificadas, llamadas «neutrones». Entonces sería posible obligarlas a unirse hasta establecer pleno contacto. Se formaría así una esfera de unos 16 km de diámetro como

máximo, que, pese a ello, conservaría la masa de una estrella regular. En 1939, el físico americano J. Robert Oppenheimer especificó, con bastantes pormenores, las posibles propiedades de semejante «estrella-neutrón». Tal objeto podría alcanzar temperaturas de superficie lo bastante elevadas, por lo menos, durante las fases iniciales de su formación e inmediatamente después- como para emitir con profusión rayos X.

La investigación dirigida por Friedman para probar la existencia de las «estrellas-neutrón» se centró en la nebulosa del Cangrejo, donde, según se suponía, la explosión cósmica que la había originado podría haber dejado como residuo no una enana blanca condensada, sino una «estrella-neutrón» supercondensada. En julio de 1964, cuando la Luna pasó ante la nebulosa del Cangrejo, se lanzó un cohete estratosférico para captar la emisión de rayos X. Si tal emisión procediera de una estrella-neutrón, se extinguiría tan pronto como la Luna pasara por delante del diminuto objeto. Si la emisión de rayos X proveniera de la nebulosa del Cangrejo, se reduciría progresivamente, a medida que la Luna eclipsara la nebulosa. Ocurrió esto último, y la nebulosa del Cangrejo dio la impresión de ser simplemente una corona mayor y mucho más intensa, del diámetro de un año-luz.

Por un momento pareció esfumarse la posibilidad que las estrellas-neutrón fueran perceptibles, e incluso que existieran; pero durante aquel mismo año, en que no se pudo revelar el secreto que encerraba la nebulosa del Cangrejo, se hizo un nuevo descubrimiento en otro campo. Las radioondas de ciertas fuentes revelaron, al parecer, una fluctuación de intensidad muy rápida. Fue como si brotaran «centelleos radioeléctricos» acá y allá.

Los astrónomos se apresuraron a diseñar instrumentos apropiados para captar ráfagas muy cortas de radioondas, en la creencia que ello permitiría un estudio más detallado de tan fugaces cambios. Anthony Hewish, del Observatorio de la Universidad de Cambridge, figuró entre los astrónomos que utilizaron dichos radiotelescopios.

Apenas empezó a manejar el telescopio provisto del nuevo detector, localizó ráfagas de energía radioeléctrica emitida desde algún lugar situado entre Vega y Altair. No resultó difícil detectarlas, lo cual, por otra parte, habría sido factible mucho antes si los astrónomos hubiesen tenido noticias de esas breves ráfagas y hubieran aportado

el material necesario para su detección. Las citadas ráfagas fueron de una brevedad sorprendente: duraron solo 1/30 de segundo. Y se descubrió algo más impresionante aún: todas ellas se sucedieron con notable regularidad, a intervalos de 1 1/3 segundos. Así, se pudo calcular el período hasta la cien millonésima de segundo: fue de 1,33730109 segundos.

Desde luego, por entonces no fue posible explicar lo que representaban aquellas pulsaciones isócronas. Hewish las atribuyó a una «estrella latiente» (*«pulsating star»*) que, con cada pulsación, emitía una ráfaga de energía. Casi a la vez se creó la voz «pulsar» para designar al fenómeno, y desde entonces se llama así el nuevo objeto.

En realidad se debería hablar en plural del nuevo objeto, pues apenas descubierto el primero, Hewish inició la búsqueda de otros, y cuando anunció su descubrimiento, en febrero de 1968, había localizado ya cuatro. Entonces, otros astrónomos emprendieron afanosamente la exploración y no tardaron en detectar algunos más. Al cabo de dos años se consiguió localizar unos cuarenta pulsar.

Dos terceras partes de estos cuerpos están situados en zonas muy cercanas al ecuador galáctico, lo cual permite conjeturar, con cierta seguridad, que los pulsares pertenecen, por lo general, a nuestra galaxia. Algunos se hallan tan cerca, que rondan el centenar de años luz. (No hay razón para negar su presencia en otras galaxias, aunque quizás sean demasiado débiles para su detección si se considera la distancia que nos separa de tales galaxias.)

Todos los pulsares se caracterizan por la extremada regularidad de sus pulsaciones, si bien el período exacto varía de unos a otros. Hay uno cuyo período es nada menos que de 3,7 seg. En noviembre de 1968, los astrónomos de Green Bank (Virginia Occidental) detectaron, en la nebulosa del Cangrejo, un pulsar de período ínfimo (sólo de 0,033089 seg). Y con treinta pulsaciones por segundo.

Como es natural, se planteaba la pregunta: ¿Cuál sería el origen de los destellos emitidos con tanta regularidad? ¿Tal vez se trataba de algún cuerpo astronómico que estuviese experimentando un cambio muy regular, a intervalos lo suficientemente rápidos como para producir dichas pulsaciones? ¿No se trataría de un planeta que giraba alrededor de una estrella y que, con cada revolución, se distanciaba más de ella, visto desde la Tierra- y emitía una potente ráfaga de

radioondas alemerger? ¿O sería un planeta giratorio que mostraba con cada rotación un lugar específico de su superficie, de la que brotaran abundantes radioondas proyectadas en nuestra dirección?

Ahora bien, para que ocurra esto, un planeta debe girar alrededor de una estrella o sobre su propio eje en un período de segundos o fracciones de segundo, lo cual es inconcebible, ya que un objeto necesita girar, de una forma u otra, a enormes velocidades, para emitir pulsaciones tan rápidas como las de los pulsares. Ello requiere que se trate de tamaños muy pequeños, combinados con fantásticas temperaturas, o enormes campos gravitatorios, o ambas cosas.

Ello hizo evocar inmediatamente las enanas blancas; pero ni siquiera éstas podían girar unas alrededor de otras, ni sobre sus propios ejes, ni emitir pulsaciones a períodos lo suficientemente breves como para explicar la existencia de los pulsares. Las enanas blancas seguían siendo demasiado grandes, y sus campos gravitatorios, demasiado débiles.

Thomas Gold se apresuró a sugerir que tal vez se tratara de una estrella-neutrón. Señaló que este tipo de estrella era lo bastante pequeña y densa como para girar sobre su eje en un período de 4 seg e incluso menos. Por añadidura, se había demostrado ya teóricamente que una estrella-neutrón debería tener un campo magnético de enorme intensidad, cuyos polos magnéticos no estarían necesariamente en el eje de rotación. La gravedad de la estrella-neutrón retendría con tal fuerza los electrones, que éstos sólo podrían emerger en los polos magnéticos, y al salir despedidos, perderían energía en forma de radioondas. Esto significaba que un haz de radioondas emergería regularmente de dos puntos opuestos en la superficie de la estrella-neutrón.

Si uno o ambos haces de radioondas se proyectasen en nuestra dirección mientras girase la estrella-neutrón, detectaríamos breves ráfagas de energía radioeléctrica una o dos veces por cada revolución. De ser cierto, detectaríamos simplemente un pulsar, cuya rotación se producía en tal sentido, que orientaba en nuestra dirección por lo menos uno de los polos magnéticos. Según ciertos astrónomos, se comportaría así sólo una estrella-neutrón de cada cien. Calculan que, aún cuando tal vez haya en la Galaxia, unas 10.000 estrellas-neutrón sólo unas 1.000 podrían ser detectadas desde la Tierra.

Gold agregó que si su teoría era acertada, ello significaba que la estrella-neutrón no tenía energía en los polos magnéticos y que su ritmo de rotación decrecería paulatinamente. Es decir, que cuanto más breve sea el período de un pulsar, tanto más joven será éste y tanto más rápida su pérdida de energía y velocidad rotatoria. El pulsar más rápido conocido hasta ahora se halla en la nebulosa del Cangrejo, y tal vez sea también el más joven, puesto que la explosión supernova, generadora de la estrella-neutrón, debe de haberse producido hace sólo unos mil años.

Se estudió con gran precisión el período de dicho pulsar en la nebulosa del Cangrejo y, en efecto, se descubrió la existencia de un progresivo retraso, tal como había predicho Gold. El período aumentaba a razón de 36,48 milmillonésimas de segundo por día. El mismo fenómeno se comprobó en otros pulsares, y al iniciarse la década de 1970-1980, se generalizó la aceptación de tal hipótesis sobre la estrella-neutrón. A veces, el período de un pulsar experimenta una súbita, aunque leve aceleración, para reanudarse luego la tendencia al retraso. Algunos astrónomos creen que ello puede atribuirse a un «seísmo estelar», un cambio en la distribución de masas dentro de la estrella-neutrón. O quizás obedezca a la «zambullida» de un cuerpo lo suficientemente grande en la estrella-neutrón, que añada su propio momento al de la estrella.

Desde luego, no había razón alguna para admitir que los electrones que emergían de la estrella-neutrón perdieran energía exclusivamente en forma de microondas. Este fenómeno produciría ondas a todo lo largo del espectro, y generaría también luz visible.

Se prestó especial atención a las secciones de la nebulosa del Cangrejo donde pudiera haber aún vestigios visibles de la antigua explosión, y, en efecto, en enero de 1969 se observó que la luz de una estrella débil emitía destellos intermitentes, sincronizados con las pulsaciones de microondas. Habría sido posible detectarla antes si los astrónomos hubiesen tenido cierta idea sobre la necesidad de buscar esas rápidas alternancias de luz y oscuridad. El pulsar de la nebulosa del Cangrejo fue la primera estrella-neutrón que pudo detectarse con la vista.

Por añadidura, dicho pulsar irradió rayos X. El 5 % aproximadamente de los rayos X emitidos por la nebulosa del Cangrejo correspondió a esa luz diminuta y

parpadeante. Así, pues, resurgió, triunfante, la teoría de la conexión entre rayos X y estrellas-neutrón, que parecía haberse esfumado en 1964.

Por otra parte, ni siquiera se ha alcanzado el límite con la estrella-neutrón. Cuando, en 1939, Oppenheimer definió las propiedades de la estrella-neutrón, predijo también que tal vez una estrella con suficientes masa y enfriamiento podría desintegrarse por completo. Cuando se produjera tal desintegración, tras la fase de estrella-neutrón, el campo gravitatorio adquiriría tal intensidad, que ninguna materia ni luz podría eludir su acción. Nada se vería de él; sería, simplemente, un «orificio negro» en el espacio.

¿Será posible detectar en el futuro esos orificios negros, que representan, sin duda, la última palabra entre los extraños objetos nuevos del Universo? El tiempo lo dirá.

¿Acaso serán los cuásares grandes apiñamientos de estrellas-neutrón? ¿O bien se tratará de estrellas-neutrón aisladas y de masa galáctica? ¿No representarán fenómenos relacionados con la formación de orificios negros? También el tiempo lo dirá.

Pero la sorpresa surge también en los vastos espacios interestelares, no tan vacíos como se supone. La «no vacuidad» del «espacio vacío» se ha convertido en un asunto bastante espinoso para los astrónomos en la observación de puntos relativamente cercanos a casa.

En cierto modo, nuestra propia Galaxia es la que más dificulta el examen visual. Por lo pronto, estamos encerrados dentro de ella, mientras que las demás son observables desde el exterior. Esto podría compararse con la diferencia que existe entre intentar ver una ciudad desde el tejado de un edificio bajo, y contemplarla desde un aeroplano. Además estamos a gran distancia del centro, y, para complicar aún más las cosas, nos hallamos en una ramificación espiral saturada de polvo. Dicho de otra forma: estamos sobre un tejado bajo en los aledaños de la ciudad y con tiempo brumoso.

En términos generales, el espacio interestelar no es un vacío perfecto en condiciones óptimas. Dentro de las galaxias, el espacio interestelar está ocupado, generalmente, por un gas muy tenue. Las líneas espectrales de absorción producidas por ese «gas interestelar» fueron vistas por primera vez en 1904; su descubridor fue el astrónomo alemán Johannes Franz Hartmann. Hasta aquí todo es

verosímil. El conflicto empieza cuando se comprueba que la concentración de gas y polvo se intensifica sensiblemente en los confines de la Galaxia. Porque también vemos en las galaxias más próximas esos mismos ribetes oscuros de polvo.

En realidad, podemos «ver» las nubes de polvo en el interior de nuestra galaxia como áreas oscuras en la Vía Láctea. Por ejemplo, la oscura nebulosa de la Cabeza del Caballo, que se destaca claramente sobre el brillo circundante de millones de estrellas, y la denominada, más gráficamente aún, Saco de Carbón situada en la Cruz del Sur, una región que dista de nosotros unos 400 años luz, la cual tiene un diámetro de 30 años luz y donde hay esparcidas partículas de polvo.

Aún cuando las nubes de gas y polvo oculten a la visión directa los brazos espirales de la Galaxia, la estructura de tales brazos es visible en el espectroscopio. La radiación de energía emitida por las estrellas brillantes de primera magnitud, situadas en los brazos, ioniza, disociación de partículas subatómicas cargadas eléctricamente- los átomos de hidrógeno. A principios de 1951, el astrónomo americano William Wilson Morgan encontró indicios de hidrógeno ionizado que trazaban los rasgos de las gigantes azules, es decir, los brazos espirales. Sus espectros se revelaron similares a los mostrados por los brazos espirales de la galaxia de Andrómeda.

El indicio más cercano de hidrógeno ionizado incluye las gigantes azules de la constelación de Orión, por lo cual se le ha dado el nombre de «Brazo de Orión». Nuestro Sistema Solar se halla en este brazo. Luego se localizaron otros dos brazos. Uno, mucho más distante del centro galáctico que el nuestro, incluye las estrellas gigantes de la constelación de Perseo («Brazo de Perseo»). El otro se halla más cerca del centro galáctico y contiene nubes brillantes en la constelación de Sagitario («Brazo de Sagitario»). Cada brazo parece tener una longitud aproximada de 10.000 años luz.

Luego llegó la radio, como una herramienta más poderosa todavía. No sólo pudo perforar las ensombrecedoras nubes, sino también hacerles contar su historia... y con su propia «voz». Ésta fue la aportación del trabajo realizado por el astrónomo holandés H. C. van De Hulst. En 1944, los Países Bajos fueron un territorio asolado por las pesadas botas del Ejército nazi, y la investigación astronómica resultó imposible. Van De Hulst se circunscribió al trabajo de pluma y papel, estudió los

átomos corrientes ionizados de hidrógeno y sus características, los cuales representan el mayor porcentaje en la composición del gas interestelar.

Según sugirió Van De Hulst, esos átomos podían sufrir cambios ocasionales en su estado de energía al entrar en colisión; entonces emitirían una débil radiación en la parte radioeléctrica del espectro. Tal vez un determinado átomo de hidrógeno lo hiciera sólo una vez en once millones de años; pero considerando la enorme cantidad de los mismos que existe en el espacio intergaláctico, la radiación simultánea de pequeños porcentajes bastaría para producir una emisión perceptible, de forma continua.

Van De Hulst estudió dicha radiación, y calculó que su longitud de onda debería de ser de 21 cm. Y, en efecto, en 1951, las nuevas técnicas radioeléctricas de posguerra permitieron a Edward Mills Purcell y Harold Irving Ewen, científicos de Harvard, captar esa «canción del hidrógeno».

Sintonizando con la radiación de 21 cm de las concentraciones de hidrógeno, los astrónomos pudieron seguir el rastro de los brazos espirales hasta distancias muy considerables, en muchos casos, por todo el contorno de la Galaxia. Se descubrieron más brazos y se elaboraron mapas sobre la concentración del hidrógeno, en los cuales quedaron plasmadas por lo menos media docena de bandas.

Y, lo que es más, la «canción del hidrógeno» reveló algunas cosas acerca de sus movimientos. Esta radiación está sometida, como todas las ondas, al efecto Doppler-Fizeau. Por su mediación los astrónomos pueden medir la velocidad de las nubes circulantes de hidrógeno y, en consecuencia, explorar, entre otras cosas, la rotación de nuestra Galaxia.

Esta nueva técnica confirmó que la Galaxia tiene un período de rotación (referido a la distancia entre nosotros y el centro) de 200 millones de años.

En la Ciencia, cada descubrimiento abre puertas, que conducen a nuevos misterios. Y el mayor progreso deriva siempre de lo inesperado, es decir, el descubrimiento que echa por tierra todas las nociones precedentes. Como ejemplo interesante de la actualidad cabe citar un pasmoso fenómeno que ha sido revelado mediante el estudio radioeléctrico de una concentración de hidrógeno en el centro de nuestra Galaxia. Aunque el hidrógeno parezca extenderse, se confina al plano ecuatorial de

la Galaxia. Esta expansión es sorprendente de por sí, pues no existe ninguna teoría para explicarla. Porque si el hidrógeno se difunde, ¿cómo no se ha disipado ya durante la larga vida de la Galaxia? ¿No será tal vez una demostración que hace diez millones de años más o menos, según conjetura Oort, su centro explotó tal como lo ha hecho en fechas mucho más recientes el del M-82? Pues tampoco aquí el plano del hidrógeno es absolutamente llano. Se arquea hacia abajo en un extremo de la Galaxia, y hacia arriba en el otro. ¿Por qué? Hasta ahora nadie ha dado una explicación convincente.

El hidrógeno no es, o no debería ser, un elemento exclusivo por lo que respecta a las radioondas. Cada átomo o combinación de átomos tiene la capacidad suficiente para emitir o absorber radioondas características de un campo radioeléctrico general. Así, pues, los astrónomos se afanan por encontrar las reveladoras «huellas dactilares» de átomos que no sean los de ese hidrógeno, ya generalizado por doquier.

Casi todo el hidrógeno que existe en la Naturaleza es de una variedad excepcionalmente simple, denominada «hidrógeno 1». Hay otra forma más compleja, que es el «deuterio», o «hidrógeno 2». Así, pues, se tamizó toda la emisión de radioondas desde diversos puntos del firmamento, en busca de la longitud de onda que se había establecido teóricamente. Por fin se detectó en 1966, y todo pareció indicar que la cantidad de hidrógeno 2 que hay en el Universo representa un 5 % de la del hidrógeno 1.

Junto a esas variedades de hidrógeno figuran el helio y el oxígeno como componentes usuales del Universo. Un átomo de oxígeno puede combinarse con otro de hidrógeno, para formar un «grupo hidroxílico». Esta combinación no tendría estabilidad en la Tierra, pues como el grupo hidroxílico es muy activo, se mezclaría con casi todos los átomos y moléculas que se le cruzaran por el camino. En especial se combinaría con los átomos de hidrógeno 2, para constituir moléculas de agua. Ahora bien, cuando se forma un grupo hidroxílico en el espacio interestelar, donde las colisiones escasean y distan mucho entre sí, permanece inalterable durante largos períodos de tiempo. Así lo hizo constar, en 1953, el astrónomo soviético T. S. Sklovski.

A juzgar por los cálculos realizados, dicho grupo hidroxílico puede emitir o absorber cuatro longitudes específicas de radioondas. Allá por octubre de 1963, un equipo de ingenieros electrotécnicos detectó dos en el Lincoln Laboratory del MIT.

El grupo hidroxílico tiene una masa diecisiete veces mayor que la del átomo de hidrógeno; por tanto, es más lento y se mueve a velocidades equivalentes a una cuarta parte de la de dicho átomo a las mismas temperaturas. Generalmente, el movimiento hace borrosa la longitud de onda, por lo cual las longitudes de onda del grupo hidroxílico son más precisas que las del hidrógeno. Sus cambios se pueden determinar más fácilmente, y no hay gran dificultad para comprobar si una nube de las que contiene hidroxilo se está acercando o alejando.

Los astrónomos se mostraron satisfechos, aunque no muy asombrados, al descubrir la presencia de una combinación diatómica en los vastos espacios interestelares. En seguida empezaron a buscar otras combinaciones, aunque no con grandes esperanzas, pues, dada la gran diseminación de los átomos en el espacio interestelar, parecía muy remota la posibilidad que dos o más átomos permanecieran unidos durante el tiempo suficiente para formar una combinación. Se descartó asimismo la probabilidad que interviniesen átomos no tan corrientes como el del oxígeno (es decir, los del carbono y nitrógeno, que le siguen en importancia entre los preparados para formar combinaciones).

Sin embargo, hacia comienzos de 1968 empezaron a surgir las verdaderas sorpresas. En noviembre de aquel mismo año se descubrió la radioonda, auténtica «huella dactilar»- de las moléculas de agua ( $H_2O$ ), y antes de acabar el mes se detectaron, con mayor asombro todavía, algunas moléculas de amoníaco ( $NH_3$ ) compuestas por una combinación de cuatro átomos: tres de hidrógeno y uno de nitrógeno.

En 1969 se detectó otra combinación de cuatro átomos, en la que se incluía un átomo de carbono: era el formaldehído ( $H_2CO$ ).

Allá por 1970 se hicieron nuevos descubrimientos, incluyendo la presencia de una molécula de cinco átomos, el cianoacetileno, que contenía una cadena de tres átomos de carbono ( $HCCCN$ ). Y luego, como culminación, al menos para aquel año, llegó el alcohol etílico, una molécula de seis átomos ( $CH_3OH$ ).

Así, pues, los astrónomos descubrieron una rama inédita y absolutamente inesperada de la Ciencia: «la Astroquímica».

El astrónomo no puede explicar por ahora cómo se han reunido esos átomos para formar moléculas tan complicadas, ni cómo pueden sobrevivir las mismas pese al flujo de la potente radiación emitida por las estrellas que, lógicamente, habría de bastar para desintegrarlas. Según se supone, tales moléculas se forman en un espacio interestelar no tan vacío como se creía, quizás en regiones en las que se condensan las nubes de polvo, siguiendo el proceso que origina las estrellas.

Si es cierta dicha suposición, puede esperarse detectar moléculas aún más complicadas, cuya presencia revolucionaría nuestros conceptos sobre la formación de los planetas y el desarrollo de la vida en los mismos. Los astrónomos siguen explorando ansiosamente las bandas de radioondas, en busca de indicios moleculares diferentes.

## Capítulo 3

### La Tierra

#### Nacimiento Del Sistema Solar

Por muy impresionantes que sean las inimaginables profundidades del Universo, y por pequeña que pueda ser la Tierra comparada con el mismo, vivimos en nuestro planeta, y a él hemos de volver.

Desde los tiempos de Newton se ha podido especular acerca de la creación de la Tierra y el Sistema Solar como un problema distinto del de la creación del Universo en conjunto. La idea que se tenía del Sistema Solar era el de una estructura con unas ciertas características unificadas:

1. Todos los planetas mayores dan vueltas alrededor del Sol aproximadamente en el plano del ecuador solar. En otras palabras: si preparamos un modelo tridimensional del Sol y sus planetas, comprobaremos que se puede introducir en un cazo poco profundo.
2. Todos los planetas mayores giran en torno al Sol en la misma dirección, en sentido contrario al de las manecillas del reloj, si contemplamos el Sistema Solar desde la Estrella Polar.
3. Todos los planetas mayores (excepto Urano y, posiblemente, Venus) efectúan un movimiento de rotación al rededor de su eje en el mismo sentido que su revolución alrededor del sol, o sea de forma contraria a las manecillas del reloj; también el Sol se mueve en tal sentido.
4. Los planetas se hallan espaciados a distancias uniformemente crecientes a partir del Sol y describen órbitas casi circulares.
5. Todos los satélites, con muy pocas excepciones- dan vueltas alrededor de sus respectivos planetas en el plano del ecuador planetario, y siempre en sentido contrario al de las manecillas del reloj.

La regularidad de tales movimientos sugirió, de un modo natural, la intervención de algunos procesos singulares en la creación del Sistema en conjunto.

Por tanto, ¿cuál era el proceso que había originado el Sistema Solar? Todas las teorías propuestas hasta entonces podían dividirse en dos clases: catastróficas y

evolutivas. Según el punto de vista catastrófico, el Sol había sido creado como singular cuerpo solitario, y empezó a tener una «familia» como resultado de algún fenómeno violento. Por su parte, las ideas evolutivas consideraban que todo el Sistema había llegado de una manera ordenada a su estado actual.

En el siglo XVIII se suponía aún que la historia de la Tierra estaba llena de violentas catástrofes. ¿Por qué, pues, no podía haberse producido una catástrofe de alcances cósmicos, cuyo resultado fuese la aparición de la totalidad del Sistema? Una teoría que gozó del favor popular fue la propuesta por el naturalista francés Georges-Louis Leclerc de Buffon, quien afirmaba que el Sistema Solar había sido creado a partir de los restos de una colisión entre el Sol y un cometa. Pero la teoría de Buffon se vino abajo cuando se descubrió que los cometas eran sólo cuerpos formados por un polvo extremadamente sutil.

En el siglo XIX, cuando ganaron popularidad los conceptos de procesos naturales, en lento desarrollo, como el principio uniformista de Hutton, las catástrofes quedaron relegadas a segundo plano. En su lugar, los eruditos se inclinaron progresivamente hacia las teorías que implican procesos evolucionistas, siguiendo las huellas de Newton.

El propio Newton había sugerido que el Sistema Solar podía haberse formado a partir de una tenue nube de gas y polvo, que se hubiera condensado lentamente bajo la atracción gravitatoria. A medida que las partículas se aproximaban, el campo gravitatorio se habría hecho más intenso, la condensación se habría acelerado hasta que, al fin, la masa total se habría colapsado, para dar origen a un cuerpo denso (el Sol), incandescente a causa de la energía de la contracción.

En esencia, ésta es la base de las teorías hoy más populares respecto al origen del Sistema Solar. Pero había que resolver buen número de espinosos problemas, para contestar algunas preguntas clave. Por ejemplo: ¿Cómo un gas altamente disperso podía ser forzado a unirse por una fuerza gravitatoria muy débil? Recientemente, los sabios han propuesto para ello otro mecanismo plausible: la presión de la luz. Que la luz ejerce realmente presión viene ilustrado por los cometas, cuyas colas apuntan siempre en dirección contraria al Sol, impulsadas por la presión de la luz solar. Ahora bien, las partículas que flotan en el espacio son bombardeadas desde todos los lados por la radiación; pero si dos partículas llegan a unirse hasta el punto

de poder protegerse una a otra, quedarán sometidas a una presión de radiación menor en el lado protegido que en el expuesto. La diferencia en la presión tenderá a situarlas una encima de otra. Al estar más juntas, la atracción gravitatoria acelerará su fusión.

Si el Sol había sido creado de esta forma, ¿qué se podía decir de los planetas? ¿De dónde procedían?

Los primeros esfuerzos por responder a estas preguntas los realizaron Immanuel Kant en 1755, e, independientemente de éste, el astrónomo y matemático francés Pierre-Simon de Laplace, en 1796. Por cierto que la imagen de Laplace era mucho más detallada.

De acuerdo con la descripción de Laplace, la enorme nube de materia en contracción se hallaba en fase rotatoria al empezar el proceso. Al contraerse, se incrementó su velocidad de rotación, de la misma forma que un patinador gira más de prisa cuando recoge sus brazos. (Esto es debido a la «conservación del momento angular». Puesto que dicho momento es igual a la velocidad del movimiento por la distancia desde el centro de rotación, cuando disminuye tal distancia, se incrementa, en compensación, la velocidad del movimiento).

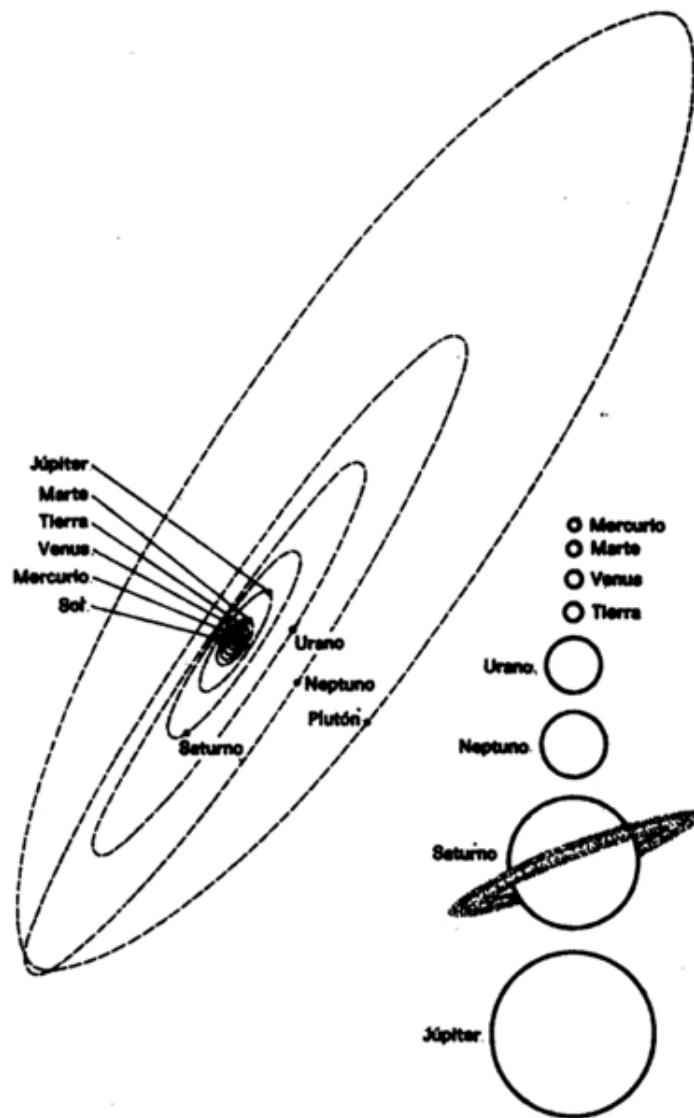
Y, según Laplace, al aumentar la velocidad de rotación de la nube, ésta empezó a proyectar un anillo de materia a partir de su ecuador, en rápida rotación. Esto disminuyó en cierto grado el momento angular, de tal modo que se redujo la velocidad de giro de la nube restante; pero al seguir contrayéndose, alcanzó de nuevo una velocidad que le permitía proyectar otro anillo de materia. Así, el coalescente Sol fue dejando tras sí una serie de anillos (nubes de materia, en forma de rosquillas), anillos que, sugirió Laplace- se fueron condensando lentamente, para formar los planetas; con el tiempo, éstos expelieron, a su vez, pequeños anillos, que dieron origen a sus satélites.

La «hipótesis nebulosa» de Laplace parecía ajustarse muy bien a las características principales del Sistema Solar, e incluso a algunos de sus detalles. Por ejemplo, los anillos de Saturno podían ser los de un satélite que no se hubiera condensado. (Al unirse todos, podría haberse formado un satélite de respetable tamaño.) De manera similar, los asteroides que giraban, en cinturón, alrededor del Sol, entre Marte y Júpiter, podrían ser condensaciones de partes de un anillo que no se hubiera unido

para formar un planeta. Y cuando Helmholtz y Kelvin elaboraron unas teorías que atribuían la energía del Sol a su lenta contracción, las hipótesis parecieron acomodarse de nuevo perfectamente a la descripción dada por Laplace.

La hipótesis nebulosa mantuvo su validez durante la mayor parte del siglo XIX. Pero antes que éste finalizara empezó a mostrar puntos débiles. En 1859, James Clerk Maxwell, al analizar de forma matemática los anillos de Saturno, llegó a la conclusión que un anillo de materia gaseosa lanzado por cualquier cuerpo podría condensarse sólo en una acumulación de pequeñas partículas, que formarían tales anillos, pero que nunca podrían formar un cuerpo sólido, porque las fuerzas gravitatorias fragmentarían el anillo antes que se materializara su condensación.

También surgió el problema del momento angular. Se trataba que los planetas, que constituían sólo algo más del 0,1 % de la masa del Sistema Solar, icontenían, sin embargo, el 98 % de su momento angular! En otras palabras: el Sol retenía únicamente una pequeña fracción del momento angular de la nube original. ¿Cómo fue transferida la casi totalidad del momento angular a los pequeños anillos formados a partir de la nebulosa? El problema se complica al comprobar que, en el caso de Júpiter y Saturno, cuyos sistemas de satélites les dan el aspecto de sistemas solares en miniatura y que han sido, presumiblemente, formados de la misma manera, el cuerpo planetario central retiene la mayor parte del momento angular.



*El Sistema Solar, dibujado de forma esquemática, con indicación sobre la jerarquía de los planetas, según su tamaño relativo.*

A partir de 1900 perdió tanta fuerza la hipótesis nebulosa, que la idea de cualquier proceso evolutivo pareció desacreditada para siempre. El escenario estaba listo para la resurrección de una teoría catastrófica. En 1905, dos sabios americanos, Thomas Chrowder Chamberlin y Forest Ray Moulton, propusieron una nueva, que explicaba el origen de los planetas como el resultado de una quasi colisión entre nuestro Sol y otra estrella. Este encuentro habría arrancado materia gaseosa de ambos soles, y las nubes de material abandonadas en la vecindad de nuestro Sol se habrían condensado luego en pequeños «planetesimales», y éstos, a su vez, en planetas. Ésta es la «hipótesis planetesimal». Respecto al problema del momento angular, los

científicos británicos James Hopwood Jeans y Harold Jeffreys propusieron, en 1918, una «hipótesis de marea», sugiriendo que la atracción gravitatoria del Sol que pasó junto al nuestro habría comunicado a las masas de gas una especie de impulso lateral (dándoles «efecto», por así decirlo), motivo por el cual les habría impartido un momento angular. Si tal teoría catastrófica era cierta, podía suponerse que los sistemas planetarios tenían que ser muy escasos. Las estrellas se hallan tan ampliamente espaciadas en el Universo, que las colisiones estelares son 10.000 veces menos comunes que las de las supernovas, las cuales, por otra parte, no son, en realidad, muy frecuentes. Según se calcula, en la vida de la Galaxia sólo ha habido tiempo para diez encuentros del tipo que podría generar sistemas solares con arreglo a dicha teoría.

Sin embargo, fracasaron estos intentos iniciales para asignar un papel a las catástrofes, al ser sometidos a la comprobación de los análisis matemáticos. Russell demostró que en cualquiera de estas quasi colisiones, los planetas deberían de haber quedado situados miles de veces más lejos del Sol de lo que están en realidad. Por otra parte, tuvieron poco éxito los intentos de salvar la teoría imaginando una serie de colisiones reales, más que de quasi colisiones. Durante la década iniciada en 1930, Lyttleton especuló acerca de la posibilidad de una colisión entre tres estrellas y, posteriormente, Hoyle sugirió que el Sol había tenido un compañero, que se transformó en supernova y dejó a los planetas como un último legado. Sin embargo, en 1939, el astrónomo americano Lyman Spitzer demostró que un material proyectado a partir del Sol, en cualesquier circunstancias, tendría una temperatura tan elevada que no se condensaría en planetesimales, sino que se expandiría en forma de un gas tenue. Aquello pareció acabar con toda idea de catástrofe. (A pesar de ello, en 1965, un astrónomo británico, M. M. Woolfson, volvió a insistir en el tema, sugiriendo que el Sol podría haber arrojado su material planetario a partir de una estrella fría, muy difusa, de forma que no tendrían que haber intervenido necesariamente temperaturas extremas.)

Y, así, una vez se hubo acabado con la teoría planetesimal, los astrónomos volvieron a las ideas evolutivas y reconsideraron la hipótesis nebulosa de Laplace. Por entonces se había ampliado enormemente su visión del Universo. La nueva cuestión que se les planteaba era la de la formación de las galaxias, las cuales

necesitaban, naturalmente, mayores nubes de gas y polvo que las supuestas por Laplace como origen del Sistema Solar. Y resultaba claro que tan enormes conjuntos de materia experimentarían turbulencias y se dividirían en remolinos, cada uno de los cuales podría condensarse en un sistema distinto.

En 1944, el astrónomo alemán Carl F. von Weizsäcker llevó a cabo un detenido análisis de esta idea. Calculó que en los remolinos mayores habría la materia suficiente como para formar galaxias. Durante la turbulenta contracción de cada remolino se generarían remolinos menores, cada uno de ellos lo bastante grande como para originar un sistema solar (con uno o más soles). En los límites de nuestro remolino solar, esos remolinos menores podrían generar los planetas. Esto ocurriría en los puntos de fricción en que se encontraban los remolinos menores, que se moverían unos contra otros como ruedas engranadas; en tales lugares, las partículas de polvo chocarían y se unirían. Como resultado de estas colisiones, podrían formarse, primero, los planetesimales, y, posteriormente, los planetas.

La teoría de Weizsäcker no resolvió por sí sola los interrogantes sobre el momento angular de los planetas, ni aportó más aclaraciones que la versión, mucho más simple, de Laplace. El astrofísico sueco Hannes Alfven incluyó en sus cálculos el campo magnético del Sol. Cuando el joven Sol giraba rápidamente, su campo magnético actuaba como un freno moderador de ese movimiento, y entonces se transmitiría a los planetas el momento angular.

Tomando como base dicho concepto, Hoyle elaboró la teoría de Weizsäcker de tal forma que ésta, una vez modificada para incluir las fuerzas magnéticas y gravitatorias- sigue siendo, al parecer, la que mejor explica el origen del Sistema Solar.

Sin embargo, persisten ciertas irregularidades en el Sistema Solar que no son fácilmente explicables mediante ninguna teoría sobre la formación general y que requerirán probablemente algunas «subteorías», si se me permite emplear tal vocablo. Por ejemplo, tenemos los cometas, pequeños cuerpos que giran alrededor del Sol describiendo órbitas extremadamente alargadas y durante períodos de docenas, centenares e incluso millares de años. Sus órbitas difieren por completo de las planetarias; penetran, desde todos los ángulos, en el interior del Sistema Solar; están compuestos, en parte, por luz y por ciertas sustancias de lenta fusión, que se

vaporizan y dispersan cuando su trayectoria pasa por las cercanías del Sol, donde se eleva la temperatura.

En 1950, Oort señaló la posible existencia de una inmensa envoltura, integrada por pequeños cuerpos helados, que girarían lentamente alrededor del Sol a la distancia de un año luz o quizá más. Tal vez haya nada menos que 100 mil millones de estos cuerpos, materia residual de alguna nube primigenia de polvo y gas, que se condensaría para formar el Sistema Solar y que se hallaría demasiado lejos para ceder a la atracción de las fuerzas gravitatorias. Subsistiría como una última cobertura sin introflexiones.

Por regla general, tales cuerpos permanecerían inalterables en su órbita. Pero la combinación casual de las atracciones gravitatorias ejercidas por estrellas cercanas podría frenar a veces la marcha de un cuerpo u otro lo suficiente como para hacerla derivar hacia el Sistema Solar interno, moverse alrededor del Sol y salir disparado en dirección a la nube. Al comportarse así, estos cuerpos se acercan desde todas las direcciones imaginables. Si pasan cerca de algún gran planeta externo, la atracción gravitatoria del mismo puede alterar aún más sus órbitas, hasta el punto de mantenerlos permanentemente en el sistema planetario. Una vez dentro de esos límites, los efectos caloríficos y vaporizadores del Sol desintegrarán su sustancia en muy breve espacio de tiempo, es, decir, según el módulo geológico. Sin embargo, quedan muchos más en el lugar de procedencia; Oort calcula que, desde la formación del Sistema Solar, cuya existencia es de miles de millones de años, sólo el 20 % de esos cuerpos cometarios han salido proyectados hacia el Sol.

Una segunda irregularidad es la representada por los planetoides. Componen este grupo decenas de millares de minúsculos cuerpos planetarios (el diámetro de los mayores, apenas alcanzan los 800 km, mientras que el de los menores no llega a los 2 km), cuya mayor parte se encuentra entre las órbitas de Marte y Júpiter. Si el espaciamiento entre los planetas fuera absolutamente regular, los astrónomos tendrían buenas razones para esperar descubrir un planeta hacia donde se halla el mayor de los planetoides. ¿Existió realmente allí un planeta antaño? ¿Explotó por una u otra causa, esparciendo fragmentos por todas partes? ¿Se producirían explosiones secundarias, las cuales explicarían el hecho que algunos planetoides describan órbitas alargadas, mientras que las de otros sean exageradamente

inclinadas (si bien todos ellos giran más o menos en dirección contraria a la de las manecillas del reloj)? Cabe también preguntarse si el campo gravitatorio del cercano gigante, Júpiter, no surtirá unos efectos tan contundentes como para que la nube, de la región situada entre su órbita y la de Marte se coagulara y formase planetesimales, pero jamás un planeta propiamente dicho. Así, pues, sigue pendiente el problema planteado por el origen de los planetoides.

Plutón, el más excéntrico de los planetas, descubierto, en 1930, por el astrónomo americano Clyde William Tombaugh, constituye otro problema. Los restantes planetas externos, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno- son gigantes muy voluminosos, gaseosos y de veloz rotación; Plutón es pequeño, denso, y efectúa un giro completo en 6,4 días. Además, su órbita es más alargada que la de cualquier otro planeta, y su inclinación forma un ángulo bastante mayor con el plano general de revolución. Su órbita es tan alargada, que cuando el planeta pasa por el sector más cercano del Sol, se aproxima veinte años más que Neptuno.

Algunos astrónomos se preguntan si Plutón no habrá sido en tiempos remotos un satélite de Neptuno. Desde luego parece algo grande para haber desempeñado ese papel secundario, y, no obstante, dicha hipótesis explicaría su lenta rotación, pues esos 6,4 días podrían haber sido el período de su revolución alrededor de Neptuno, es decir, revolución igual a rotación, como en el caso de la Luna. Quizás un formidable cataclismo lo liberó de la «presa» de Neptuno, para proyectarlo con violencia a una órbita elíptica. Ese supuesto cataclismo pudo haber hecho girar también a Tritón, el gran satélite de Neptuno, y haber forzado el acercamiento de éste al Sol, pues su órbita debería distar bastante más de nuestro astro si se cumpliese la ley sobre la separación cada vez mayor entre los sucesivos planetas. Por desgracia, los astrónomos no tienen ni la más remota idea sobre el tipo de cataclismo cósmico que pudo haber ocasionado tales alteraciones.

La rotación de los planetas ofrece también problemas específicos. Idealmente, todos los planetas deberían girar en dirección contraria a la de las manecillas del reloj (si se observasen desde un punto situado a gran altura, en la vertical del Polo Norte terrestre), y sus ejes de rotación deberían ser perpendiculares al plano de sus revoluciones alrededor del Sol. Así ocurre, de una forma razonablemente aproximada, con el propio Sol y Júpiter, los dos cuerpos principales del Sistema

Solar. En cambio, se observa una desconcertante variación en aquellos otros cuyo plano de rotación es mensurable.

El eje de la Tierra tiene una oblicuidad de 23,5º aproximadamente respecto a la vertical, inclinación que, en los ejes de Marte, Saturno y Neptuno, es de 25º, 27º y 29º, respectivamente. Urano representa incluso un caso extremo, pues su eje forma un ángulo de 98º, algo mayor que el recto, o sea, que en realidad, está alineado con su plano de rotación, lo cual lo hace girar a lo largo de su órbita como una peonza que rodara de lado en vez de mantener la posición vertical (o, como máximo, con una leve inclinación). Urano posee cinco pequeños satélites, cuyas órbitas siguen la misma inclinación que el eje del planeta; por tanto, todos permanecen en el plano ecuatorial de Urano.

¿Qué es lo que causa la inclinación de tantos planetas y sobre todo, la tan espectacular de Urano? Esto sigue siendo un enigma, aunque no tan misterioso, ni mucho menos, como el que plantea el planeta Venus. Desde lejanas fechas, los astrónomos han dado por supuesto que cuando un cuerpo pequeño gira alrededor de otro mayor, la gravitación frena el movimiento rotatorio del cuerpo pequeño hasta hacerlo presentar constantemente la misma cara al grande, por lo cual cada rotación sobre su eje coincide con cada revolución. En este sentido podemos aportar el clásico ejemplo de la Luna respecto a la Tierra, cuyo satélite gira alrededor de su eje y tarda 29,5 días en dar la vuelta en torno al globo terráqueo. Se creyó muy probable que Mercurio y Venus, tan cercanos al Sol, experimentaban idéntico retraso y girarían sobre su propio eje una vez por cada revolución: Mercurio, en 88 días, y Venus, en 225. Resulta muy difícil observar a Mercurio, porque es un planeta pequeño, distante y excepcionalmente próximo a la cegadora luz solar. Sin embargo, ya en fechas tan lejanas como el 1880, el astrónomo italiano Giovanni Virginio Schiaparelli percibió unas leves señales en la superficie de Mercurio, que aprovechó para medir su período de rotación. Llegó a la conclusión de que, en efecto, Mercurio *giraba*, una vez por revolución, cada 88 días.

El caso de Venus resultó mucho más difícil. Una sempiterna capa de nubes oscurecía por completo la superficie de Venus, lo cual impedía su observación a simple vista. Hasta la década de 1960, nadie pudo descubrir marca alguna ni determinar

directamente el período de rotación del planeta más cercano a nosotros (cuando ya se conocían esos datos respecto al lejano Plutón).

Sin embargo, en la década de 1960-1970 fue ya posible «ver» los cuerpos astronómicos, gracias al empleo de medios más efectivos. Entonces se pudo proyectar hacia el cuerpo un apretado haz de radioondas cortas y detectar la reflexión del rayo en la Tierra. Esto se había hecho ya con la Luna en 1946. Entonces, las radioondas cortas eran del tipo utilizado en el radar. Así nació la «Astronomía-radar».

Ahora bien, las reflexiones del radar desde la Luna tuvieron una importancia secundaria, puesto que la superficie lunar era bien visible con la reflexión de la luz solar corriente. Las ondas del radar podrían atravesar la capa nubosa, tocar la superficie y reflejarse en ella. Y esto lo consiguió, en 1961, un grupo integrado por científicos estadounidenses, británicos y soviéticos. El tiempo requerido por las ondas de radar para alcanzar Venus y regresar, permitió medir con mayor precisión la distancia de Venus en aquel momento (y, por ende, todas las distancias del Sistema Solar). No mucho después se estableció también contacto con Mercurio por medio del radar. Este éxito se lo apuntó un equipo soviético en 1962.

La naturaleza del rayo reflejo del radar depende de la superficie en que toque (áspera o lisa y rotatoria o fija). La aspereza tiende a ensanchar el rayo reflejo, mientras que la rotación tiende a incrementar la longitud de onda. El grado de aspereza y la velocidad de rotación determinan la amplitud del cambio.

En 1965, la naturaleza del rayo radar reflejado desde Mercurio demostró a los americanos Rolf Buchanan Dyce y G. H. Pettengill que Mercurio giraba con mucha más rapidez de lo que se había pensado. ¡El período de rotación no era de 88, sino de 59 días! Este descubrimiento, a cuya confirmación visual se llegó en 1968 constituyó una gran sorpresa, pero los astrónomos reaccionaron inmediatamente. El período de rotación equivalía a los dos tercios del de revolución, lo cual significaba que en cada perigeo (punto de máxima aproximación) Mercurio presentaba, alternativamente, varias caras al Sol. Se estudiaron los efectos de la gravitación que dieron por resultado una situación estable y clara.

Venus volvió a plantear problemas. Desde luego, celebróse que el radar aportara información referente a la superficie sólida del planeta, algo que jamás estuvo al alcance de las ondas medias.

Se obtuvieron bastantes datos. Por ejemplo, se supo que la superficie era áspera. Hacia fines de 1965 se llegó a la conclusión que en Venus había, por lo menos, dos enormes cadenas montañosas. Una se extendía a lo largo de más de 3.000 km en dirección norte-sur y tenía una anchura de varios centenares de kilómetros. La otra, más ancha aún, seguía rumbo este-oeste. Ambas cordilleras fueron bautizadas con las dos primeras letras del alfabeto griego: «Montañas Alfa» y «Montañas Beta».

Pero con anterioridad a este hallazgo, concretamente, en 1964- se comprobó que Venus giraba con mucha lentitud. Hasta entonces no hubo sorpresas, pues se había supuesto (mediante un cálculo puramente especulativo) que el período de rotación era de 225 días, período que luego resultó ser de 243 días, con el eje de rotación casi perpendicular al plano de revolución. Fue decepcionante que el período de rotación no durase exactamente 225 días (igual al período de revolución), porque, al haberse previsto así, todo habría tenido fácil explicación. Sin embargo... lo que sorprendió en realidad a los astrónomos fue que la rotación siguiese una dirección «errónea». Venus giraba en el sentido de las manecillas del reloj (visto desde un punto a gran altura sobre la vertical del Polo Norte terrestre), es decir, de Este a Oeste, y no de Oeste a Este, según lo hacían todos los demás planetas, excepto Urano. Era como si Venus se sostuviese sobre la «cabeza», o sea, que el Polo Norte mirase hacia abajo, y el Polo Sur, hacia arriba.

¿Por qué? Nadie ha podido explicárselo hasta ahora.

Para mayor desconcierto, la rotación está sincronizada de tal forma, que cuando Venus se acerca más a la Tierra, nos presenta siempre la misma cara (y aún así, oculta tras la nube). ¿No ejercerá la Tierra alguna influencia gravitatoria sobre Venus? Pero, ¿cómo podría competir nuestra Tierra, pequeña y distante, con un Sol más distante aún, pero mucho mayor? Esto es también desconcertante.

Resumiendo: en las postrimerías de la década de 1960-1970, Venus se nos muestra como el planeta más enigmático del Sistema Solar.

Y, sin embargo, hay otros enigmas que nos tocan más de cerca. En cierto modo, la Luna es extraordinariamente grande. Su masa equivale a la 1/81 parte de la

terrestre. Ningún otro satélite del Sistema Solar es tan grande en comparación con su respectivo planeta. Por añadidura, la Luna no gira alrededor de la Tierra en el plano del ecuador terrestre, sino que su órbita se inclina sensiblemente sobre ese plano (una órbita más próxima al plano donde los planetas giran alrededor del Sol). ¿Sería posible que la Luna no fuera inicialmente un satélite de la Tierra, sino un planeta independiente, que vino a caer, quién sabe cómo, bajo el influjo de la Tierra? La Tierra y la Luna, ¿no serán planetas gemelos?

Esta incógnita sobre el origen de la Luna y los antecedentes históricos del sistema Tierra-Luna constituyen uno de los motivos que han causado mayor revuelo entre los científicos, induciéndolos a emprender el estudio acelerado de la superficie lunar, incluyendo en ello el envío, a nuestro satélite, de naves tripuladas.

### Acerca de la Forma y el Tamaño

Una de las mayores inspiraciones de los antiguos griegos fue la de afirmar que la Tierra tenía la forma de una esfera. Originalmente concibieron esta idea (la tradición concede a Pitágoras de Samos la primacía en sugerirla, alrededor del 525 d. de J.C.) sobre bases filosóficas, a saber, que la esfera era la forma perfecta. Pero los griegos también la comprobaron mediante observaciones. Hacia el 350 a. de J.C., Aristóteles expresó su creencia que la Tierra no era plana, sino redonda. Su argumento más efectivo era el que si uno se trasladaba hacia el Norte o hacia el Sur, iban apareciendo nuevas estrellas en su horizonte visible, al tiempo que, desaparecían, bajo el horizonte que dejaba atrás, las que se veían antes. Por otra parte, cuando un barco se adentraba en el mar, no importaba en qué dirección, lo primero que dejaba de verse era el casco y, por fin, los palos. Al mismo tiempo, la sombra que la Tierra proyectaba sobre la Luna durante un eclipse lunar, tenía siempre la forma de un círculo, sin importar la posición de nuestro satélite. Estos dos últimos fenómenos serían ciertos sólo en el caso que la Tierra: fuese una esfera. Por lo menos entre los eruditos nunca desapareció por completo la noción de la esfericidad terrestre, incluso durante la Edad Media. El propio Dante imaginó una Tierra esférica en su *Divina Comedia*.

Pero la cosa cambió por completo cuando se planteó el problema de una esfera *en rotación*. Ya en fecha tan remota como el 350 a. de J.C., el filósofo griego

Heráclides del Ponto sugirió que era mucho más sencillo suponer que la Tierra giraba sobre su eje, que el hecho de que, por el contrario, fuese toda la bóveda de los cielos la que girase en torno a la Tierra. Sin embargo, tanto los sabios de la Antigüedad como los de la Edad Media se negaron a aceptar dicha teoría. Así, como ya sabemos, en 1613, Galileo fue condenado por la Inquisición y forzado a rectificar su idea de una Tierra en movimiento.

No obstante, las teorías de Copérnico hicieron completamente ilógica la idea de una Tierra inmóvil, y, poco a poco, el hecho de su rotación fue siendo aceptado por todos. Pero hasta 1851 no pudo demostrarse de forma experimental esta rotación. En dicho año, el físico francés Jean-Bernard-Léon Foucault colocó un enorme péndulo, que se balanceaba colgado de la bóveda de una iglesia de París. Según las conclusiones de los físicos, un objeto como el Péndulo debería mantener su balanceo en un plano fijo, indiferentemente de la rotación de la Tierra. Por ejemplo, en el polo Norte el péndulo oscilaría en un plano fijo, en tanto que la Tierra giraría bajo el mismo, en sentido contrario a las manecillas del reloj, en 24 horas.

Puesto que una persona que observase el péndulo sería transportada por el movimiento de la Tierra, la cual, por otra parte, le parecería inmóvil al observador, dicha persona tendría la impresión que el plano de balanceo del péndulo se dirigiría a la derecha, mientras se producía una vuelta completa en 24 horas. En el polo Sur se observaría el mismo fenómeno, aunque el plano en oscilación del péndulo parecería girar en sentido contrario a las manecillas del reloj.

En las latitudes interpolares, el plano del péndulo también giraría (en el hemisferio Norte de acuerdo con las manecillas del reloj, y en el Sur, en sentido contrario), aunque en períodos progresivamente más largos, a medida que el observador se alejara cada vez más de los polos. En el ecuador no se alteraría en modo alguno el plano de oscilación del péndulo.

Durante el experimento de Foucault, el plano de balanceo del péndulo giró en la dirección y del modo adecuado. El observador pudo comprobar con sus propios ojos, por así decirlo- que la Tierra giraba bajo el péndulo.



*Modelo del origen del Sistema Solar, de Carl F. von Websäcker. Su teoría afirma que la gran nube a partir de la que se formó este sistema se fragmentó en remolinos y sobremolinos, que luego por un proceso de coalescencia, originaron el Sol, los planetas y sus satélites.*

De la rotación de la Tierra se desprenden muchas consecuencias. La superficie se mueve más deprisa, el ecuador, donde debe completar un círculo de 40.000 km en 24 horas, a una velocidad de algo más de 1.600 km/hora. A medida que se desplaza uno al Norte (o al Sur) del ecuador, algún punto de la Tierra ha de moverse más lentamente, puesto que debe completar un círculo más pequeño en el mismo tiempo. Cerca de los polos, este círculo es realmente pequeño, y en los polos, la superficie del Globo permanece inmóvil.

El aire participa del movimiento de la superficie de la Tierra sobre la que circula. Si una masa de aire se mueve hacia el Norte desde el ecuador, su propia velocidad (al igualar a la del ecuador) es mayor que la de la superficie hacia la que se dirige. Gana terreno a esta superficie en su desplazamiento de Oeste a Este, y es impulsada con fuerza hacia el Este. Tal impulso constituye un ejemplo del «efecto Coriolis», denominado así en honor del matemático francés Gaspard Gustave de Coriolis, quien fue el primero en estudiarlo, en 1835.

Tales efectos Coriolis sobre las masas de aire determinan que giren, en el hemisferio Norte, en el sentido de las manecillas del reloj. En el hemisferio Sur, el efecto es inverso, o sea, que se mueven en sentido contrario a las manecillas del reloj. En cualquier caso se originan «trastornos de tipo ciclónico». Las grandes tempestades de este tipo se llaman «huracanes, en el Atlántico Norte, y «tifones» en el Pacífico Norte. Las más pequeñas, aunque también más intensas, son los «ciclones» o «tornados». En el mar, estos violentos torbellinos originan espectaculares «trombas marinas».

Sin embargo, la deducción más interesante hecha a partir de la rotación de la Tierra se remonta a dos siglos antes del experimento de Foucault, en tiempos de Isaac Newton. Por aquel entonces, la idea de la Tierra como una esfera perfecta tenía ya una antigüedad de casi 2.000 años. Pero Newton consideró detenidamente lo que ocurría en una esfera en rotación. Señaló la diferencia de la velocidad el movimiento en las distintas latitudes de la superficie de la Tierra y reflexionó sobre el posible significado de este hecho.

Cuanto más rápida es la rotación, tanto más intenso es el efecto centrífugo, o sea, la tendencia a proyectar material hacia el exterior a partir del centro de rotación. Por tanto, se deduce de ello que el efecto centrífugo se incrementa sustancialmente desde 0, en los polos estacionarios, hasta un máximo en las zonas ecuatoriales, que giran rápidamente. Esto significa que la Tierra debía de ser proyectada al exterior con mayor intensidad en su zona media. En otras palabras, debía de ser un «esferoide», con un «ensanchamiento ecuatorial» y un achatamiento polar. Debía de tener, aproximadamente, la forma de una mandarina, más que la de una pelota de golf. Newton calculó también que el achatamiento polar debía de ser 1/230 del diámetro total, lo cual se halla, sorprendentemente, muy cerca de la verdad.

La Tierra gira con tanta lentitud sobre sí misma, que el achatamiento y el ensanchamiento son demasiado pequeños para ser detectados de forma inmediata. Pero al menos dos observaciones astronómicas apoyaron el razonamiento de Newton. En primer lugar, en Júpiter y Saturno se distinguía claramente la forma achatada de los polos, tal como demostró por vez primera el astrónomo francés, de origen italiano, Giovanni Domenico Cassini, en 1687. Ambos planetas eran bastante mayores que la Tierra, y su velocidad de rotación era mucho más rápida. Júpiter,

por ejemplo, se movía, en su ecuador, a 43.000 Km/hora. Teniendo en cuenta los efectos centrífugos producidos por tales velocidades, no debe extrañar su forma achataada.

En segundo lugar, si la Tierra se halla realmente ensanchada en el ecuador, los diferentes impulsos gravitatorios sobre el ensanchamiento provocados por la Luna, que la mayor parte del tiempo está situada al norte o al sur del ecuador en su circunvolución alrededor del Planeta- serían la causa que la Tierra se bamboleara algo en su rotación. Miles de años antes, Hiparco de Nicea había indicado ya algo parecido a un balanceo (aunque sin saber, por supuesto, la razón). Este balanceo es causa que el Sol alcance el punto del equinoccio unos 50 segundos de arco hacia Oriente cada año (o sea, hacia el punto por donde sale). Y ya que, debido a esto, el equinoccio llega a un punto precedente (es decir, más temprano) cada año, Hiparco denominó este cambio «precesión de los equinoccios», nombre que aún conserva.

Naturalmente, los eruditos se lanzaron a la búsqueda de una prueba más directa de la distorsión de la Tierra. Recurrieron a un procedimiento normalizado para resolver los problemas geométricos: la Trigonometría. Sobre una superficie curvada, los ángulos de un triángulo suman más de  $180^\circ$ . Cuanto mayor sea la curvatura, tanto mayor será el exceso sobre estos  $180^\circ$ . Ahora bien, si la Tierra era un esferoide, como había dicho Newton, el exceso sería mayor en la superficie más agudamente curvada del ensanchamiento ecuatorial, que en la superficie menos curvada, sobre los polos. En la década de 1730, los sabios franceses realizaron la primera prueba al efectuar una medición a gran escala desde lugares separados, al norte y al sur de Francia. Sobre la base de estas mediciones, el astrónomo francés Jacques Cassini (hijo de Giovanni Domenico, que había descubierto el achatamiento de Júpiter y Saturno) llegó a la conclusión que el ensanchamiento de la Tierra se producía en los polos, *ino* en el ecuador! Para utilizar una analogía exagerada, su forma era más la de un pepino que la de una mandarina.

Pero la diferencia en la curvatura entre el norte y el sur de Francia era, evidentemente, demasiado pequeña como para conseguir resultados concluyentes. En consecuencia, en 1735 y 1736, un par de expediciones francesas marchó hacia regiones más claramente separadas: una hacia el Perú, cerca del ecuador, y la otra,

a Laponia, cerca del Ártico. En 1744, sus mediciones proporcionaron una clara respuesta: la Tierra era sensiblemente más curva, en Perú que en Laponia.

Hoy, las mejores mediciones demuestran que el diámetro de la Tierra es 42,96 km más largo en el ecuador que en el eje que atraviesa los polos (es decir, 12.756,78, frente a 12.713,82 km).

Quizás el resultado científico más importante, como producto de las investigaciones del siglo XVIII sobre la forma de la Tierra, fue el obtenido por los científicos insatisfechos con el estado del arte de la medición. No existían patrones de referencia para una medición precisa. Esta insatisfacción fue, en parte, la causa de que, durante la Revolución francesa, medio siglo más tarde, se adoptara un lógico y científicamente elaborado sistema «métrico», basado en el metro. Tal sistema lo utilizan hoy, satisfactoriamente, los sabios de todo el mundo, y se usa en todos los países civilizados, excepto en las naciones de habla inglesa, principalmente, Gran Bretaña y los Estados Unidos. No debe subestimarse la importancia de unos patrones exactos de medida. Un buen porcentaje de los esfuerzos científicos se dedica continuamente al mejoramiento de tales patrones. El patrón metro y el patrón kilogramo, construidos con una aleación de platino-iridio (virtualmente inmune a los cambios químicos), se guardan en Sèvres (París), a una temperatura constante, para prevenir la expansión o la contracción.

Luego se descubrió que nuevas aleaciones, como el «invar» (abreviatura de invariable), compuesto por níquel y hierro en determinadas proporciones, apenas eran afectadas por los cambios de temperatura. Podrían usarse para fabricar mejores patrones de longitud. En 1920, el físico francés (de origen suizo) Charles-Édouard Guillaume, que desarrolló el invar, recibió el Premio Nobel de Física.

Sin embargo, en 1960 la comunidad científica decidió abandonar el patrón sólido de la longitud. La Conferencia General del Comité Internacional de Pesas y Medidas adoptó como patrón la longitud de la ínfima onda luminosa emitida por el gas noble criptón. Dicha onda, multiplicada por 1.650.763,73, mucho más invariable que cualquier módulo de obra humana- equivale a un metro. Esta longitud es mil veces más exacta que la anterior.

La forma de la Tierra idealmente lisa, sin protuberancias, a nivel del mar, se llama «geoide». Por supuesto que la superficie de la Tierra está salpicada de accidentes

(montañas, barrancos, etc.). Aún antes que Newton planteara la cuestión de la forma global del Planeta, los sabios habían intentado medir la magnitud de estas pequeñas desviaciones de una perfecta esfera (tal como ellos creían). Recurrieron al dispositivo del péndulo oscilante. En 1581, cuando tenía sólo 17 años, Galileo había descubierto que un péndulo de una determinada longitud, completa siempre su oscilación exactamente en el mismo tiempo, tanto si tal oscilación es larga como corta. Se dice que llegó a tal descubrimiento mientras contemplaba las oscilantes arañas de la catedral de Pisa, durante las ceremonias litúrgicas. En dicha catedral hay una lámpara, llamada todavía «lámpara de Galileo», aunque en realidad no fue colgada hasta 1584. (Huygens puso en marcha los engranajes de un reloj acoplándole un péndulo, y utilizó la constancia de su movimiento para mantener el reloj en movimiento con gran exactitud. En 1656 proyectó, gracias a este sistema, el primer reloj moderno, el «reloj del abuelo», con lo cual aumentó en diez veces la exactitud en la determinación del tiempo cronológico.)

El período del péndulo depende tanto de su longitud como de la fuerza de la gravedad. Al nivel del mar, un péndulo de 1 m de longitud lleva a cabo una oscilación completa en un segundo, hecho comprobado en 1644 por el matemático francés, discípulo de Galileo, Marin Mersenne. Los estudiosos de las irregularidades en la superficie terrestre se apoyan en el hecho que el período de oscilación del péndulo depende de la fuerza de la gravedad en cualquier punto. Un péndulo que realiza la oscilación perfecta de un segundo al nivel del mar, por ejemplo, empleará algo más de un segundo en completar una oscilación en la cumbre de una montaña, donde la gravedad es ligeramente menor, porque está situada más lejos del centro de la Tierra.

En 1673, una expedición francesa a la costa norte de Sudamérica (cerca del ecuador) comprobó que en este lugar el péndulo oscilaba más lentamente, incluso a nivel del mar. Más tarde, Newton consideró esto como una prueba de la existencia del ensanchamiento ecuatorial, ya que éste elevaba el terreno a mayor distancia del centro de la Tierra y reducía la fuerza de la gravedad. Después que la expedición al Perú y Laponia hubo demostrado su teoría, un miembro de la expedición a Laponia, el matemático francés Alexis-Claude Clairault, elaboró métodos para calcular la forma esferoidal de la Tierra a partir de las oscilaciones del péndulo. Así puede ser

determinado el geoide, o sea, la forma de la Tierra a nivel del mar, que se desvía del esferoide perfecto en menos de 90 m en todos los puntos. Hoy puede medirse la fuerza de la gravedad con ayuda de un «gravímetro», peso suspendido de un muelle muy sensible. La posición del peso con respecto a una escala situada detrás del mismo indica la fuerza con que es atraído hacia abajo y, por tanto, mide con gran precisión las variaciones en la gravedad.

La gravedad a nivel del mar varía, aproximadamente, en un 0,6 %, y, desde luego, es mínima en el ecuador. Tal diferencia no es apreciable en nuestra vida corriente, pero puede afectar a las plusmarcas deportivas. Las hazañas realizadas en los Juegos Olímpicos dependen, en cierta medida, de la latitud (y altitud) de la ciudad en que se celebren.

Un conocimiento de la forma exacta del geoide es esencial para levantar con precisión los mapas, y, en este sentido, puede afirmarse que se ha cartografiado con exactitud sólo un 7 % de la superficie terrestre. En la década de 1950, la distancia entre Nueva York y Londres, por ejemplo, sólo podía precisarse con un error de 1.600 m más o menos, en tanto que la localización de ciertas islas en el Pacífico se conocía sólo con una aproximación de varios kilómetros. Esto representa un inconveniente en la Era de los viajes aéreos y de los misiles.

Pero, en realidad, hoy es posible levantar mapas exactos de forma bastante singular, no ya por mediciones terrestres, sino astronómicas. El primer instrumento de estas nuevas mediciones fue el satélite artificial *Vanguard I*, lanzado por los Estados Unidos el 17 de marzo de 1958. Dicho satélite da una vuelta alrededor de la Tierra en dos horas y media, y en sus dos primeros años de vida ha efectuado ya mayor número de revoluciones en torno a nosotros que la Luna en todos los siglos de observación con el telescopio. Mediante las observaciones de la posición del *Vanguard I* en momentos específicos y a partir de determinados puntos de la Tierra, se han podido calcular con precisión las distancias entre estos puntos de observación. De esta forma, posiciones y distancias conocidas con un error de varios kilómetros, se pudieron determinar, en 1959, con un error máximo de un centenar de metros. (Otro satélite, el *Transit I-B*, lanzado por los Estados Unidos el 13 de abril de 1960, fue el primero de una serie de ellos creada específicamente para establecer un sistema de localización exacta de puntos en la superficie de la

Tierra, cosa que podría mejorar y simplificar en gran manera la navegación aérea y marítima.)

Al igual que la Luna, el *Vanguard I* circunda la Tierra describiendo una elipse que no está situada en el plano ecuatorial del Planeta. Tal como en el caso de la Luna, el perigeo (máxima aproximación) del *Vanguard I* varía a causa de la atracción ecuatorial. Dado que el *Vanguard I* está más cerca del ecuador terrestre y es mucho más pequeño que la Luna, sufre sus efectos con más intensidad. Si añadimos a esto su gran número de revoluciones, el efecto del ensanchamiento ecuatorial puede estudiarse con más detalle. Desde 1959 se ha comprobado que la variación del perigeo del *Vanguard I* no es la misma en el hemisferio Norte que en el Sur. Esto demuestra que el ensanchamiento no es completamente simétrico respecto al ecuador; parece ser 7,5 m más alto (o sea, que se halla 7,5 m más distante del centro de la Tierra) en los lugares situados al sur del ecuador que en los que se hallan al norte de éste. Cálculos más detallados mostraron que el polo Sur estaba 15 m más cerca del centro de la Tierra (contando a partir del nivel del mar) que el polo Norte.

En 1961, una información más amplia, basada en las órbitas del *Vanguard I* y del *Vanguard II* (este último, lanzado el 17 de febrero de 1959), indica que el nivel del mar en el ecuador no es un círculo perfecto. El diámetro ecuatorial es 420 m (casi medio kilómetro) más largo en unos lugares que en otros.

La Tierra ha sido descrita como «piriforme» y el ecuador, como «ovoide». En realidad, estas desviaciones de la curva perfecta son perceptibles sólo gracias a las más sutiles mediciones. Ninguna visión de la Tierra desde el espacio podría mostrar algo parecido a una pera o a un huevo; lo máximo que podría verse sería algo semejante a una esfera perfecta. Además, detallados estudios del geoide han mostrado muchas regiones de ligeros achatamiento y ensanchamiento, por lo cual, si tuviésemos que describir adecuadamente la Tierra, podríamos decir que es parecida a una «mora».

Un conocimiento del tamaño y forma exactos de la Tierra permite calcular su volumen, que es de  $1.083.319 \times 10^6 \text{ km}^3$ ). Sin embargo, el cálculo de la masa de la Tierra es un problema mucho más complejo, aunque la ley de la gravitación, de

Newton, nos proporciona algo para comenzar. Según Newton, la fuerza de la gravitación ( $f$ ) entre dos objetos en el Universo puede ser expresada así:

$$f = \frac{gm_1m_2}{d^2}$$

donde  $m_1$  y  $m_2$  son las masas de los cuerpos considerados, y  $d$ , la distancia entre ellos, de centro a centro. Por lo que respecta a  $g$ , representa la «constante gravitatoria».

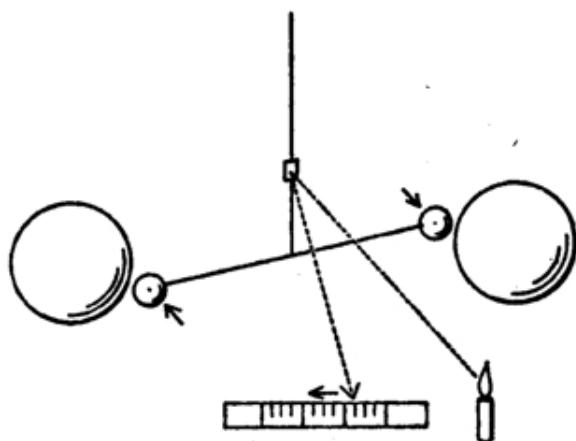
Newton no pudo precisar cuál era el valor de esta constante. No obstante, si conocemos los valores de los otros factores de la ecuación, podemos hallar  $g$ , por transposición de los términos:

$$g = \frac{fd^2}{m_1m_2}$$

Por tanto, para hallar el valor de  $g$  hemos de medir la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos de masa conocida, a una determinada distancia entre sí. El problema radica en que la fuerza gravitatoria es la más débil que conocemos. Y la atracción gravitatoria entre dos masas de un tamaño corriente, manejables, es casi imposible de medir.

Sin embargo, en 1798, el físico inglés Henry Cavendish, opulento y neurótico genio que vivió y murió en una soledad casi completa, pero que realizó algunos de los experimentos más interesantes en la historia de la Ciencia- consiguió realizar esta medición. Cavendish ató una bola, de masa conocida, a cada una de las dos puntas de una barra, y suspendió de un delgado hilo esta especie de pesa de gimnasio. Luego colocó un par de bolas más grandes, también de masa conocida, cada una de ellas cerca de una de las bolas de la barra, en lugares opuestos, de forma que la atracción gravitatoria entre las bolas grandes, fijas, y las bolas pequeñas, suspendidas, determinara el giro horizontal de la pesa colgada, con lo cual giraría también el hilo. Y, en realidad, la pesa giró, aunque muy levemente. Cavendish midió entonces la fuerza que producía esta torsión del hilo, lo cual le dio el valor de  $f$ . Conocía también  $m_1$  y  $m_2$ , las masas de las bolas, y  $d$ , la distancia entre las bolas atraídas. De esta forma pudo calcular el valor de  $g$ . Una vez obtenido éste, pudo

determinar la masa de la Tierra, ya que puede medirse la atracción gravitatoria ( $f$ ) de la Tierra sobre un cuerpo dado. Así, Cavendish «pesó la Tierra por primera vez». Desde entonces, los sistemas de medición se han perfeccionado sensiblemente. En 1928, el físico americano Paul R. Heyl, del «United States Bureau of Standards», determinó que el valor de  $g$  era de 0,00000006673 dinas/ cm<sup>2</sup>/gr<sup>2</sup>. Aunque no nos interesen estos tipos de unidades, observemos la pequeñez de la cifra. Es una medida de la débil intensidad de la fuerza gravitatoria. Dos pesas de 500 gr, colocadas a 30 cm de distancia, se atraen la una a la otra con una fuerza de sólo media milmillonésima de 28 gr.



*Aparato de Herry Cavendish para la medición de la gravedad. Las dos bolas pequeñas son atraídas por las dos grandes, dando lugar a la torsión del hilo del que están suspendidas. El espejo muestra el grado de este ligero balanceo, gracias a la desviación de la luz reflejada sobre la escala.*

El hecho que la Tierra misma atraiga tal peso con la fuerza de 500 gr, incluso a una distancia de 6.000 km de su centro, subraya cuán grande es la masa de la Tierra. En efecto, es de  $5,98 \times 10^{21}$  Tm.

A partir de la masa y el volumen de la Tierra, su densidad media puede calcularse fácilmente. Es de unos 5,522 gr/cm<sup>3</sup> (5,522 veces la densidad del agua). La densidad de las rocas en la superficie de la Tierra alcanza una media de sólo 2,8 gr/cm<sup>3</sup>), por lo cual debe ser mucho mayor la densidad del interior. ¿Aumenta uniforme y lentamente hacia el centro de la Tierra? La primera prueba que no

ocurre esto, es decir, que la Tierra está compuesta por una serie de capas diferentes- nos la brinda el estudio de los terremotos.

### Las Capas del Planeta

El 1º de noviembre de 1755, un formidable terremoto, posiblemente, el más violento de los tiempos modernos- destruyó la ciudad de Lisboa, derribando todas las casas de la parte baja de la ciudad. Posteriormente, una enorme marea la barrió desde el océano. Sesenta mil personas murieron, y la ciudad quedó convertida en un escenario dantesco.

El seísmo se dejó notar en un área de 1,6 millones de kilómetros cuadrados y causó importantes daños en Marruecos y Portugal. Debido a que era el día de Todos los Santos, la gente estaba en la iglesia, y se afirma que, en el sur de Europa, los fieles vieron cómo se balanceaban e inclinaban los candelabros en los templos.

El desastre de Lisboa causó una gran impresión en los científicos de aquel tiempo. Se trataba de una época optimista en la que muchos pensadores creían que la nueva ciencia de Galileo y de Newton pondría en manos del hombre los medios para convertir la Tierra en un paraíso. Este desastre reveló que existían fuerzas demasiado gigantescas, imprevisibles, y en apariencia malignas, que se escapaban al dominio de hombre. El terremoto inspiró a Voltaire la famosa sátira pesimista *Candide*, con su irónico refrán que «todo ocurre para lo mejor en este mejor de todos los mundos posibles».

Estamos acostumbrados a aceptar el hecho de la tierra firme trastornada por los efectos de un terremoto; pero también puede temblar, con efectos aún más devastadores, el fondo de los océanos. La vibración levanta enormes y lentas olas en el océano, las cuales, al alcanzar los bajíos superficiales en las proximidades de tierra firme, forman verdaderas torres de agua, que alcanzan alturas de 15 a 30 m. Si estas olas caen de improviso sobre zonas habitadas, pueden perecer miles de personas. El nombre popular de estas olas causadas por los terremotos es el de «desbordamientos de la marea», si bien se trata de un término erróneo. Pueden parecer enormes mareas, aunque sus causas son completamente distintas. Hoy se conocen con el nombre japonés de *tsunami*, denominación bien justificada, ya que las costas del Japón son especialmente vulnerables a tales olas.

Después del desastre de Lisboa, al que un *tsunami* contribuyó en parte, los científicos empezaron a considerar seriamente las causas de los terremotos. A este respecto, la mejor teoría aportada por los antiguos griegos fue la de Aristóteles, quien afirmaba que los temblores de tierra eran causados por las masas de aire aprisionadas en el interior de la Tierra, que trataban de escapar. No obstante, los sabios modernos sospecharon que podrían ser el resultado de la acción del calor interno de la Tierra sobre las tensiones operantes en el seno de las rocas sólidas.

El geólogo inglés John Michell, que había estudiado las fuerzas implicadas en la «torsión», utilizadas más tarde por Cavendish para medir la masa de la Tierra-sugirió, en 1760, que los movimientos sísmicos eran ondas emitidas por el deslizamiento de masas de rocas a algunos kilómetros de distancia de la superficie. A fin de estudiar con propiedad los terremotos, tenía que desarrollarse un instrumento para detectar y medir dichas ondas, lo cual no se consiguió hasta un siglo después del desastre de Lisboa. En 1855, el físico italiano Luigi Palmieri desarrolló el primer «sismógrafo» (del griego *seismós* [agitación] y *grafo* [describir], o sea, «registro gráfico del terremoto»).

En su forma más simple, el sismógrafo consiste en un bloque de gran masa, suspendido, por un muelle relativamente débil, de un soporte fijado firmemente al suelo rocoso. Cuando la Tierra se mueve, el bloque suspendido permanece inmóvil, debido a su inercia. Sin embargo, el muelle fijado al suelo rocoso se distiende o se contrae en cierto grado, según el movimiento de la Tierra, movimiento que es registrado sobre un tambor, el cual gira lentamente mediante una, plumilla acoplada al bloque estacionario, y que traza el gráfico sobre un papel especial. Hoy se utilizan dos bloques: uno, para registrar las ondas de los terremotos que cruzan de Norte a Sur, y el otro, para las de Este a Oeste. Actualmente, los sismógrafos más sensibles, como el de la Universidad de Fordham, utilizan un rayo de luz en vez de la plumilla, para evitar la fricción de ésta sobre el papel. El rayo incide sobre papel sensibilizado, y luego el trazado se revela como una fotografía.

El ingeniero inglés John Milne, utilizando sismógrafos de diseño propio, demostró, en 1890, de forma concluyente, lo correcto de la hipótesis de Michell respecto a que los terremotos eran causados por ondas, que se propagaban a través del cuerpo de la Tierra. Milne colocó instrumentos en diversas estaciones para el estudio de los

temblores terrestres, e informó acerca de fenómenos en diversas partes del mundo, particularmente en el Japón. En 1900 había trece estaciones sismográficas, y hoy existen unas 500, esparcidas por todos los continentes, incluida la Antártica.

La Tierra sufre cada año un millón de seísmos, entre los cuales se dan, por lo menos, diez de carácter catastrófico y un centenar menos catastróficos, pero de graves consecuencias. Unas 15.000 personas mueren anualmente víctimas de los terremotos. El más devastador de todos se produjo en la China Septentrional, en 1556; causó unos 830.000 muertos. Y en fecha tan reciente como 1923, murieron en Tokio 143.000 personas a causa de un seísmo.

Se calcula que los terremotos más violentos liberan una energía igual a la de 100.000 bombas atómicas corrientes, o bien la equivalente a un centenar de grandes bombas de hidrógeno, y sólo gracias a que se extienden por un área inmensa, su poder destructor queda atenuado en cierta forma. Pueden hacer vibrar la Tierra como si se tratara de un gigantesco diapasón. El terremoto que sacudió a Chile en 1960 produjo en el Planeta una vibración de una frecuencia ligeramente inferior a una vez por hora (20 octavas por debajo de la escala media y completamente inaudible).

La intensidad sísmica se mide con ayuda de una escala, que va del 0 al 9 y en la que cada número representa una liberación de energía diez veces mayor que la del precedente. (Hasta ahora no se ha registrado ningún seísmo de intensidad superior a 9; pero el terremoto que se produjo en Alaska el Viernes Santo de 1964, alcanzó una intensidad de 8,5) Tal sistema de medición se denomina «escala Richter» porque la propuso, en 1935, el sismólogo americano Charles Francis Richter.

Cerca del 80 % de la energía de los terremotos se libera en las áreas que bordean el vasto océano Pacífico. Otro 15 % lo hace en una faja que cruza el Mediterráneo, y que lo barre de Este a Oeste. Estas zonas de terremotos (véase el mapa de la página 55) aparecen estrechamente asociadas con las áreas volcánicas, razón por la cual se asoció con los movimientos sísmicos el efecto del calor interno.

Los volcanes son fenómenos naturales tan aterradores como los terremotos y mucho más duraderos, aunque sus efectos quedan circunscritos, por lo general, a áreas más reducidas. Se sabe de unos 500 volcanes que se han mantenido activos

durante los tiempos históricos; dos terceras partes de ellos se hallan en las márgenes del Pacífico.

Cuando un volcán apresa y recalienta formidables cantidades de agua desencadena tremendas catástrofes, si bien ocurre raras veces. El 26-27 de agosto de 1883, la pequeña isla volcánica de Krakatoa en el estrecho entre Sumatra y Java, hizo explosión con un impresionante estampido que, al parecer, ha sido el más fragoroso de la Tierra durante los tiempos históricos. Se oyó a 4.800 km de distancia, y, desde luego, lo registraron también muy diversos instrumentos, diseminados por todo el Globo terráqueo. Las ondas sonoras dieron varias vueltas al planeta. Volaron por los aires 8 km<sup>3</sup> de roca. Las cenizas oscurecieron el cielo, cubrieron centenares de kilómetros cuadrados y dejaron en la estratosfera un polvillo que hizo brillar las puestas de Sol durante largos años. El *tsunami* con sus olas de 30 m de altura, causó la muerte a 36.000 personas en las playas de Sumatra y Java. Su oleaje se detectó en todos los rincones del mundo.

Es muy probable que un acontecimiento similar, de consecuencias más graves aún, se produjera hace 3.000 años en el Mediterráneo. En 1967, varios arqueólogos americanos descubrieron vestigios de una ciudad enterrada bajo cenizas, en la pequeña isla de Thera, unos 128 km al norte de Creta. Al parecer estalló, como el Krakatoa, allá por el 1400 a. de J.C. El *tsunami* resultante asoló la isla de Creta, sede de una floreciente civilización, cuyo desarrollo databa de fechas muy remotas. No se recuperó jamás de tan tremendo golpe. Ello acabó con el dominio marítimo de Creta, el cual fue seguido por un período inquieto y tenebroso, y pasarían muchos siglos para que aquella zona lograse recuperar una mínima parte de su pasado esplendor. La dramática desaparición de Thera quedó grabada en la memoria de los supervivientes, y su leyenda pasó de unas generaciones a otras, con los consiguientes aditamentos. Tal vez diera origen al relato de Platón sobre la Atlántida, la cual se refería once siglos después de la desaparición de Thera y la civilización cretense.

Sin embargo, quizá la más famosa de las erupciones volcánicas sea una bastante pequeña comparada con la de Krakatoa o Thera. Fue la erupción del Vesubio (considerado entonces como un volcán apagado) que sepultó Pompeya y Herculano, dos localidades veraniegas de los romanos. El famoso enciclopedista Cayo Plinio

Secundo (más conocido como Plinio) murió en aquella catástrofe, que fue descrita por un testigo de excepción: Plinio *el Joven*, sobrino suyo.

En 1763 se iniciaron las excavaciones metódicas de las dos ciudades sepultadas. Tales trabajos ofrecieron una insólita oportunidad para estudiar los restos, relativamente bien conservados, de una ciudad del período más floreciente de la Antigüedad.

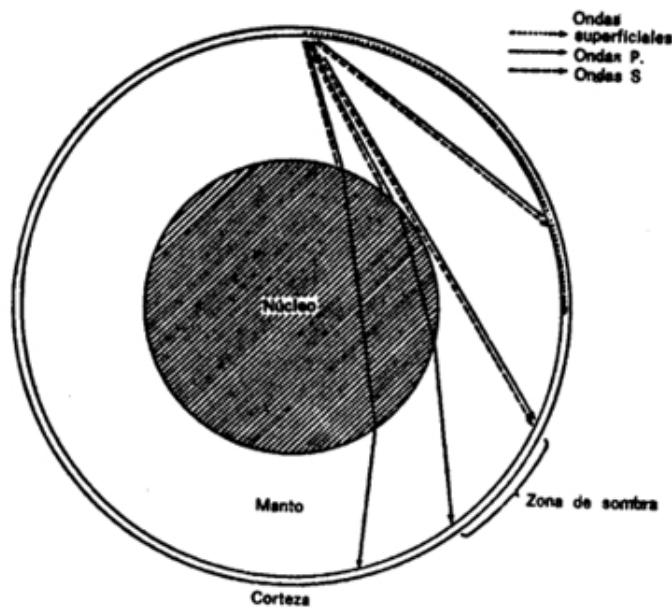
Otro fenómeno poco corriente es el nacimiento de un volcán. El 20 de febrero de 1943 se presenció en México tan impresionante fenómeno. En efecto, surgió lentamente un volcán en lo que había sido hasta entonces un idílico trigal de Paricutín, aldea situada 321 km al oeste de la capital mexicana. Ocho meses después se había transformado en un ceniciente cono, de 450 m de altura. Naturalmente, hubo que evacuar a los habitantes de la aldea.

La investigación moderna sobre los volcanes y el papel que desempeñan en la formación de la mayor parte de la corteza terrestre la inició el geólogo francés Jean-Étienne Guettard, a mediados del siglo XVIII. A finales del mismo siglo, los solitarios esfuerzos del geólogo alemán Abraham Gottlob Werner popularizaron la falsa noción que la mayor parte de las rocas tenían un origen sedimentario, a partir del océano, que en tiempos remotos había sido el «ancho mundo» («neptunismo»). Sin embargo, el peso de la evidencia, particularmente la presentada por Hutton, demostró que la mayor parte de las rocas habían sido formadas a través de la acción volcánica («plutonismo»). Tanto los volcanes como los terremotos podrían ser la expresión de la energía interna de la Tierra, que se origina, en su mayoría, a partir de la radiactividad (capítulo VI).

Una vez los sismógrafos proporcionaron datos suficientes de las ondas sísmicas, comprobóse que las que podían estudiarse con más facilidad se dividían en dos grandes grupos: «ondas superficiales» y «ondas profundas». Las superficiales siguen la curva de la Tierra; en cambio, las profundas viajan por el interior del Globo y, gracias a que siguen un camino más corto, son las primeras en llegar al sismógrafo. Estas ondas profundas se dividen, a su vez, en dos tipos: primarias («ondas P») y secundarias («ondas S»). Las primarias, al igual que las sonoras, se mueven en virtud de la compresión y expansión alternativas del medio (para representárnoslas podemos imaginar, por un momento, el movimiento de un

acordeón, en que se dan fases alternas de compresión y extensión). Tales ondas pueden desplazarse a través de cualquier medio, sólido o fluido. Por el contrario, las ondas secundarias siguen la forma familiar de los movimientos de una serpiente, o sea, que progresan en ángulos rectos a la dirección del camino, por lo cual no pueden avanzar a través de líquidos o gases.

Las ondas primarias se mueven más rápidamente que las secundarias y, en consecuencia, alcanzan más pronto la estación sismográfica. A partir del retraso de las ondas secundarias, se puede determinar la distancia a que se ha producido el terremoto. Y su localización, o «epicentro», lugar de la superficie de la Tierra situado directamente sobre el fenómeno- puede precisarse con todo detalle midiendo las distancias relativas a partir de tres o más estaciones: los tres radios originan otros tantos círculos, que tienen su intersección en un punto único.



*Rutas que siguen las ondas sísmicas en el interior de la Tierra. Las ondas superficiales se desplazan a lo largo de la corteza. El núcleo líquido de la Tierra refracta las ondas profundas de tipo P. Las ondas S no pueden desplazarse a través del núcleo.*

La velocidad, tanto de las ondas P como de las S, viene afectada por el tipo de roca; la temperatura y la presión, como han demostrado los estudios de laboratorio. Por

tanto, las ondas sísmicas pueden ser utilizadas como sondas para investigar las condiciones existentes bajo la superficie de la Tierra.

Una onda primaria que corra cerca de la superficie, se desplaza a una velocidad de 8 km/seg. A 1.600 km por debajo de la superficie y a juzgar por sus tiempos de llegada, correría a 12 km/seg. De modo semejante, una onda secundaria se mueve a una velocidad de menos de 5 km/seg cerca de la superficie, y a 6 km/seg a una profundidad de 1.600 km. Dado que un incremento en la velocidad revela un aumento en la densidad, podemos calcular la densidad de la roca debajo de la superficie. En la superficie, como ya hemos dicho, la densidad media es de 2,8 gr/cm<sup>3</sup>. A 1.600 km por debajo, aumenta a 5 gr/cm<sup>3</sup> y a 2.800 km es ya de unos 6 gr/cm<sup>3</sup>.

Al alcanzar la profundidad de 2.800 km se produce un cambio brusco. Las ondas secundarias desaparecen. En 1906, el geólogo británico R. D. Oldham supuso que esto se debería a que la región existente debajo de esta cota es líquida: las ondas alcanzarían en ella la frontera del «núcleo líquido» de la Tierra. Al mismo tiempo, las ondas primarias que alcanzan este nivel cambian repentinamente de dirección, al parecer, son refractadas al penetrar en dicho núcleo líquido.

El límite del núcleo líquido se llama «discontinuidad de Gutenberg», en honor del geólogo americano Beno Gutenberg, quien, en 1914, lo definió y mostró que el núcleo se extiende hasta los 3.475 km a partir del centro de la Tierra. En 1936, el matemático australiano Keith Edward Bullen estudió las diversas capas profundas de la tierra y calculó su densidad tomando como referencia los datos sobre seísmos. Confirmaron este resultado los datos obtenidos tras el formidable terremoto de Chile en 1960. Así, pues, podemos afirmar que, en la discontinuidad de Gutenberg, la densidad de la materia salta de 6 a 9, y desde aquí, hasta el centro, aumenta paulatinamente a razón de 11.5 gr/cm<sup>3</sup>.

¿Cuál es la naturaleza del núcleo líquido? Debe de estar compuesto por una sustancia cuya densidad sea de 9 a 11,5 gr/cm<sup>3</sup> en las condiciones de temperatura y presión reinantes en el núcleo. Se estima que la presión va desde las 20.000 Tm/cm<sup>2</sup> en el límite del núcleo líquido, hasta las 50.000 Tm/cm<sup>2</sup> en el centro de la Tierra. La temperatura es, sin duda, menor. Basándose en el conocimiento de la proporción en que se incrementa la temperatura con la profundidad en las minas, y

en la medida en que las rocas pueden conducir el calor, los geólogos estiman, aproximadamente, que las temperaturas en el núcleo líquido pueden alcanzar los 5.000º C. (El centro del planeta Júpiter, mucho mayor, puede llegar a los 500.000º C.)

La sustancia del núcleo debe estar constituida por algún elemento lo bastante corriente como para poder formar una esfera de la mitad del diámetro de la Tierra y un tercio de su masa. El único elemento pesado corriente en el Universo es el hierro. En la superficie de la Tierra, su densidad es sólo de 7,86 gr/cm<sup>3</sup>; pero bajo las enormes presiones del núcleo podría alcanzar una densidad del orden antes indicado, o sea, de 9 a 12 gr/cm<sup>3</sup>. Más aún, en las condiciones del centro de la Tierra sería líquido.

Por si fuera necesaria una mayor evidencia, ésta es aportada por los meteoritos, los cuales pueden dividirse en dos amplias clases: meteoritos «rocosos», formados principalmente por silicatos, y meteoritos «férreos», compuestos de un 90 % de hierro, un 9 % de níquel y un 1 % de otros elementos. Muchos científicos opinan que los meteoritos son restos de planetas desintegrados; si fuese así, los meteoritos de hierro podrían ser partes del núcleo líquido del planeta en cuestión, y los meteoritos rocosos, fragmentos de su manto. (Ya en 1866, o sea, mucho tiempo antes que los sismólogos demostraran la naturaleza del núcleo de la Tierra, la composición de los meteoritos de hierro sugirió al geólogo francés Gabriel-Auguste Daubrée, que el núcleo de nuestro planeta estaba formado por hierro.)

La mayoría de los geólogos aceptan hoy como una realidad el hecho de un núcleo líquido de níquel-hierro, por lo que se refiere a la estructura de la Tierra, idea que fue más elaborada posteriormente. En 1936, el geólogo danés I. Lehmann, al tratar de explicar el desconcertante hecho que algunas ondas primarias aparezcan en una «zona de sombras», de la mayor parte de cuya superficie quedan excluidas tales ondas, sugirió que lo que determinaba una nueva inflexión en las ondas era una discontinuidad en el interior del núcleo, a unos 1.290 km del centro, de forma que algunas de ellas penetraban en la zona de sombra. Gutenberg propugnó esta teoría, y en la actualidad muchos geólogos distinguen un «núcleo externo», formado por níquel y hierro líquidos, y un «núcleo interno», que difiere del anterior en algún aspecto, quizás en su naturaleza sólida o en su composición química, ligeramente

distinta. Como resultado de los grandes temblores de tierra en Chile, en 1969, todo el globo terrestre experimentó lentes vibraciones, a frecuencias que eran iguales a las previstas si se tenía en cuenta sólo el núcleo interno. Esto constituyó una sólida prueba en favor de su existencia.

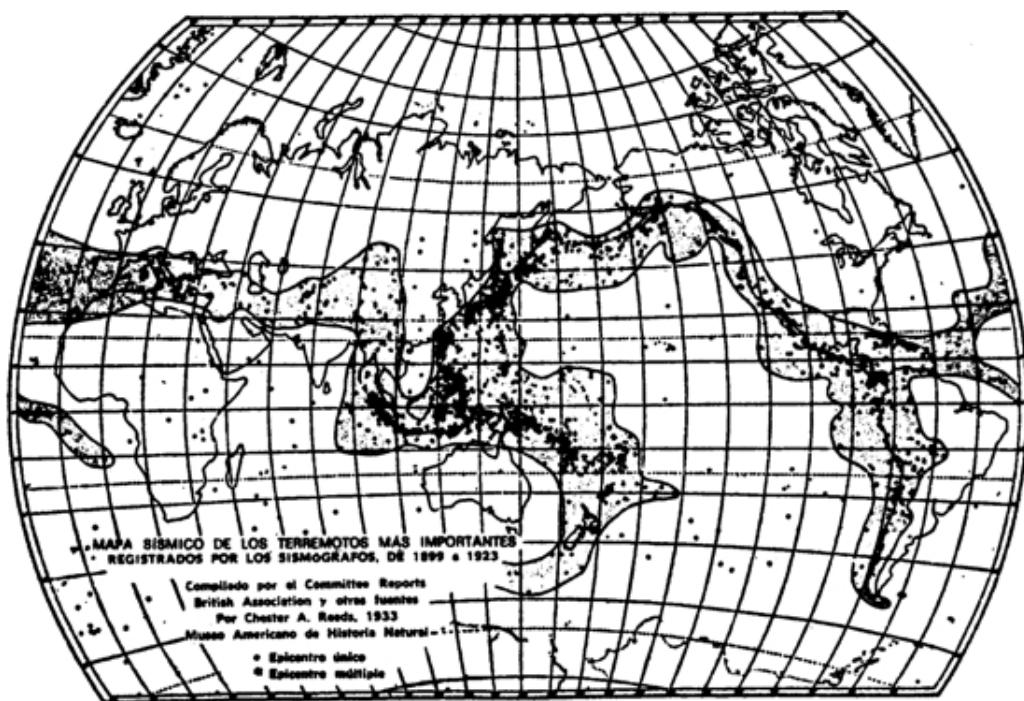
La porción de la Tierra que circunda el núcleo de níquel-hierro se denomina «manto». En apariencia está compuesto por silicatos, pero, a juzgar por la velocidad de las ondas sísmicas que discurren a través de ellos, estos silicatos difieren de las típicas rocas de la superficie de la Tierra, algo que demostró por vez primera, en 1919, el físico-químico americano Leason Heberling Adams. Sus propiedades sugieren que son rocas de tipo «olivino» (de un color verde oliva, como indica su nombre), las cuales son, comparativamente, ricas en magnesio y hierro y pobres en aluminio.

El manto no se extiende hasta la superficie de la Tierra. Un geólogo croata, Andrija Mohorovicic, mientras estudiaba las ondas causadas por un terremoto en los Balcanes en 1909, llegó a la conclusión que existía un claro incremento en la velocidad de las ondas en un punto que se hallaría a unos 32 km de profundidad. Esta «discontinuidad de Mohorovicic» (llamada, simplemente, «Moho») se acepta hoy como la superficie límite de la «corteza» terrestre.

La índole de esta corteza y del manto superior ha podido explorarse mejor gracias a las «ondas superficiales». Ya nos hemos referido a esto. Al igual que las «ondas profundas», las superficiales se dividen en dos tipos. Uno de ellos lo constituyen las llamadas «ondas Love» (en honor de su descubridor A. E. H. Love). Las tales ondas son ondulaciones horizontales semejantes, por su trazado, al movimiento de la serpiente al reptar. La otra variedad, la componen las «ondas Rayleigh» (llamadas así en honor del físico inglés John William Strutt, Lord Rayleigh). En este caso, las ondulaciones son verticales, como las de una serpiente marina al moverse en el agua.

El análisis de estas ondas superficiales, en particular, el realizado por Maurice Ewing, de la Universidad de Columbia- muestra que la corteza tiene un espesor variable. Su parte más delgada se encuentra bajo las fosas oceánicas, donde la discontinuidad de Moho se halla en algunos puntos, sólo a 13-16 km bajo el nivel del mar. Dado que los océanos tienen en algunos lugares, de 8 a 11 km de

profundidad, la corteza sólida puede alcanzar un espesor de sólo unos 5 km bajo las profundidades oceánicas. Por otra parte, la discontinuidad de Moho discurre, bajo los continentes, a una profundidad media de 32 km por debajo del nivel del mar (por ejemplo, bajo Nueva York es de unos 35 km), para descender hasta los 64 km bajo las cadenas montañosas. Este hecho, combinado con las pruebas obtenidas a partir de mediciones de la gravedad, muestra que la roca es menos densa que el promedio en las cadenas montañosas.



*Los cinturones sísmicos de la Tierra. Éstos siguen las zonas principales de la formación de nuevos sistemas montañosos.*

El aspecto general de la corteza es el de una estructura compuesta por dos tipos principales de roca: basalto y granito; este último, de densidad inferior, que cabalga sobre el basalto, forma los continentes y, en los lugares en que el granito es particularmente denso- las montañas (al igual que un gran iceberg emerge a mayor altura del agua que otro más pequeño). Las montañas jóvenes hunden profundamente sus raíces graníticas en el basalto; pero a medida que las montañas son desgastadas por la erosión, se adaptan ascendiendo lentamente (para mantener el equilibrio de masas llamado «isostasis», nombre sugerido, en 1889, por el

geólogo americano Clarence Edward Dutton). En los Apalaches, una cadena montañosa muy antigua, la raíz casi ha aflorado ya.

El basalto que se extiende bajo los océanos está cubierto por una capa de roca sedimentaria de unos 400 a 800 m de espesor. En cambio, hay muy poco o ningún granito, por ejemplo, el fondo de Pacífico está completamente libre del mismo. El delgado espesor de la corteza sólida bajo los océanos ha sugerido un espectacular proyecto. ¿Por qué no abrir un agujero a través de la corteza, hasta llegar a la discontinuidad de Moho, y obtener una muestra del manto, con objeto de conocer su composición? No sería una tarea fácil; para ello habría que anclar un barco sobre un sector abisal del océano, bajar la máquina perforadora a través de varios kilómetros de agua y taladrar el mayor espesor de roca que nunca haya sido perforado jamás. Pero se ha perdido el antiguo entusiasmo por el proyecto.

La «flotación» del granito sobre el basalto sugiere, inevitablemente, la posibilidad de una «traslación o deriva continental». En 1912, el geólogo alemán Alfred Lothar Wegener sugirió que los continentes formaban al principio una única masa de granito, a la que denominó «pangea» («Toda la Tierra»). Dicha masa se fragmentaría en algún estadio precoz de la historia de la Tierra, lo cual de terminaría la separación de los continentes. Según dicho investigador, las masas de tierra firme seguirían separándose entre sí. Por ejemplo, Groenlandia se alejaría de Europa a razón de casi 1 m por año. Lo que sugirió la idea de la deriva de los continentes fue principalmente el hecho que la costa Este de Sudamérica parecía encajar, como los dientes de una sierra, en la forma de la costa Oeste de África, lo cual, por otra parte, había hecho concebir a Francis Bacon, ya hacia 1620, ideas semejantes.

Durante medio siglo, la teoría de Wegener no gozó de gran aceptación. Incluso en fechas tan recientes como 1960, cuando se publicó la primera edición de este libro, me creí obligado a rechazarla categóricamente, dejándome guiar por la opinión geofísica predominante en aquellas fechas. El argumento más convincente entre los muchos esgrimidos contra ella fue el que el basalto subyacente en ambos océanos y continentes era demasiado rígido para tolerar la derivación oblicua del granito continental.

Y, sin embargo, adquirieron una preponderancia impresionante las pruebas aportadas para sustentar la suposición que el océano Atlántico no existía en tiempos remotos y que, por tanto, los continentes hoy separados constituían entonces una sola masa continental. Si se acoplaran ambos continentes no por los perfiles de sus costas, accidentes, al fin y al cabo, debidos al nivel corriente del mar, sino por el punto central de la plataforma continental, prolongación submarina de los continentes que estuvo al descubierto durante las edades de bajo nivel marino, el encaje sería muy satisfactorio a todo lo largo del Atlántico, tanto en la parte Norte como en la parte Sur. Por añadidura, las formaciones rocosas del África Occidental se emparejan a la perfección con las correspondientes formaciones de la Sudamérica Oriental. La traslación pretérita de los polos magnéticos nos parecerá menos sorprendente si consideramos que dicho movimiento errático no es de los polos, sino de los continentes.

Entre todas estas pruebas, quizá la más abrumadora sea la de 1968, cuando se encontró en la Antártica un hueso fosilizado, de 6 dm, perteneciente a un anfibio extinto. Una criatura semejante no pudo haber vivido tan cerca del polo Sur, por lo cual podemos suponer que la Antártica estaría otrora bastante más lejos del Polo o, al menos, gozó de un clima más benigno. Por otra parte, dicho anfibio no pudo haber cruzado un brazo de agua salobre, ni siquiera estrecho. Así, pues, la Antártica debió de formar parte de un cuerpo continental más extenso, en el que probablemente habría zonas templadas.

Sin embargo, aún falta por averiguar lo que causó la fragmentación de ese supercontinente original. Hacia 1960 el geólogo americano Harry Hammond Hess sugirió que tal vez la materia fundida del manto hubiese surgido a borbotones, aprovechando, por ejemplo, la línea de fracturas a lo largo del océano Atlántico, y al tropezar con la capa superior del manto se extendería, para enfriarse y endurecerse. De esta forma se fragmentaría y dilataría el fondo oceánico. Así, pues, no habría deriva de los continentes, sino separación entre ellos, a causa de la acción de un fondo marino expansivo.

Por tanto, es posible que haya existido la pangea, incluso hasta fechas geológicamente recientes, es decir, hasta hace 225 millones de años, cuando empezaba el predominio de los dinosaurios. A juzgar por la distribución de plantas y

animales, la fragmentación se intensificaría hace unos 200 millones de años. Entonces se fragmentaría en tres partes la pangea. La parte septentrional (Norteamérica, Europa y Asia), denominada «Laurasia»; la parte meridional (Sudamérica, África y la India), llamada «Gondwana», nombre que tomó de una provincia india; la Antártica y Australia formarían la tercera parte.

Hace unos 65 millones de años, cuando los dinosaurios ya se habían extinguido y reinaban los mamíferos. Sudamérica se separó de África por el Oeste y la India, por el Este, para trasladarse hacia el Asia Meridional. Por último, Norteamérica se desprendió de Europa, la India se unió a Asia (con el plegamiento himalayo en la conjunción). Australia rompió su conexión con la Antártica y surgieron las características continentales que hoy conocemos.

Se hizo otra sugerencia más sorprendente aún acerca de los cambios que pudieran haberse producido en la Tierra a lo largo de los períodos geológicos. Tal sugerencia se remonta a 1879, cuando el astrónomo británico George Howard Darwin (hijo de Charles Darwin) insinuó que la Luna podría ser un trozo de la Tierra desgajado de ésta en tiempos primigenios y que dejaría como cicatriz de tal separación el océano Pacífico.

Esta idea es muy sugestiva, puesto que la Luna representa algo más del 1 % de la masa combinada Tierra-Luna, y es lo suficientemente pequeña como para que su diámetro encaje en la fosa del Pacífico. Si la Luna estuviese compuesta por los estratos externos de la Tierra, sería explicable la circunstancia que el satélite no tenga un núcleo férreo y su densidad sea muy inferior a la terrestre, así como la inexistencia de granito continental en el fondo del Pacífico.

Ahora bien, la separación Tierra-Luna parece improbable por diversas razones, y hoy prácticamente ningún astrónomo ni geólogo cree que pueda haber ocurrido tal cosa (recordemos, no obstante, el destino reservado a la teoría sobre la deriva de los continentes). Sea como fuere, la Luna parece haber estado antes más cerca de nosotros que ahora.

La atracción gravitatoria de la Luna origina mareas tanto en los océanos como en la corteza terrestre. Mientras la Tierra gira, el agua oceánica experimenta una acción de arrastre en zonas poco profundas y, por otra parte, las capas rocosas se frotan entre sí, con sus movimientos ascendentes y descendentes. Esa fricción implica una

lenta conversión, en calor, de la energía terrestre de rotación, y, por tanto, el período rotatorio se acrecienta gradualmente. El efecto no es grande en términos humanos puesto que el día se alarga un segundo cada cien mil años. Como quiera que la Tierra pierde energía rotatoria, se debe conservar el momento angular. La Luna gana lo que pierde la Tierra. Su velocidad aumenta al girar alrededor de la Tierra, lo cual significa que se aleja de ella y que, al hacerlo deriva con gran lentitud.

Si retrocedemos en el tiempo hacia el lejano pasado geológico, observamos que la rotación terrestre se acelera, el día se acorta significativamente, la Luna se halla bastante más cerca, y el efecto, en general, causa una impresión de mayor rapidez. Darwin hizo cálculos retroactivos con objeto de determinar cuándo estuvo la Luna lo suficientemente cerca de la Tierra como para formar un solo cuerpo. Pero sin ir tan lejos, quizás encontraríamos pruebas de que, en el pasado, los días eran más cortos que hoy. Por ejemplo, hace unos 570 millones de años, época de los fósiles más antiguos, el día pudo tener algo más de 20 horas, y tal vez el año constara de 428 días.

Ahora bien, esto no es sólo teoría. Algunos corales depositan capas de carbonato cálcico con más actividad en ciertas temporadas, de tal forma que podemos contar las capas anuales como los anillos de los troncos de los árboles. Asimismo, algunos depositan más carbonato cálcico de día que de noche, por lo cual se puede hablar de capas diurnas muy finas. En 1963, el paleontólogo americano John West Wells contó las sutiles capas de ciertos corales fósiles, e informó que los corales cuya antigüedad se cifraba en 400 millones de años depositaban, como promedio anual, 400 capas diurnas, mientras que otros corales, cuya antigüedad era sólo de 320 millones de años, acumulaban por año 380 capas diurnas.



PÉRMICO: hace 225 millones de años



TRIÁSICO: hace 200 millones de años



JURÁSICO: hace 135 millones de años



CRETÁCICO: hace 65 millones de años



Pérmico, hace 225 millones de años. Triásico, hace 200 millones de años. Jurásico, hace 135 millones de años. Cretácico, hace 65 millones de años. Cenozoico, actual.

Resumiendo: Si la Luna estaba entonces mucho más cerca de la Tierra y ésta giraba con mayor rapidez. ¿qué sucedió en períodos más antiguos aún? Y si la teoría de Darwin sobre una disociación Tierra-Luna no es cierta, ¿dónde hay que buscar esta certeza?

Una posibilidad es la que la Luna fuese capturada por la Tierra en alguna fase del pasado. Si dicha captura se produjo, por ejemplo, hace 600 millones de años, sería explicable el hecho que justamente por aquella época aparecieran numerosos fósiles en las rocas, mientras que las rocas anteriores muestran sólo algunos vestigios de carbono. Las formidables mareas que acompañarían a la captura de la Luna, pulirían por completo las rocas más primitivas. (Por entonces no había vida animal, y si la hubiese habido, no habría quedado ni rastro de ella.) De haberse producido esa captura, la Luna habría estado entonces más cerca de la Tierra que hoy y se habría producido un retroceso lunar, así como un alargamiento del día, aunque nada de ello con anterioridad.

Según otra hipótesis, tendría su origen en la misma nube de polvo cósmico, y se formaría en los contornos de la Tierra para alejarse desde entonces, sin formar nunca parte de nuestro planeta. Lo cierto es que los astrónomos ignoran aún los hechos, si bien esperan descubrirlos mediante una incesante exploración de la superficie lunar, gracias al envío alternativo de hombres y máquinas a nuestra compañera espacial.

El hecho que la Tierra esté formada por dos componentes fundamentales, el manto de silicatos y el núcleo níquel-hierro, cuyas proporciones se asemejan mucho a las de la clara y la yema en un huevo- ha convencido a casi todos los geólogos que el globo terráqueo debió de haber sido líquido en algún tiempo de su historia primigenia. Entonces su composición pudo haber constado de dos elementos líquidos, mutuamente insolubles. El silicato líquido formaría una capa externa, que flotaría a causa de su mayor ligereza y, al enfriarse, irradiaría su calor al espacio. El hierro líquido subyacente, al abrigo de la exposición directa, liberaría su calor con mucha más lentitud, por lo cual ha podido conservarse hasta ahora en tal estado. Como mínimo podemos considerar tres procesos a cuyo través pudo la Tierra haber adquirido el calor suficiente para fundirse, aún partiendo de un estado totalmente frío, como una agrupación de planetesimales. Estos cuerpos, al chocar entre sí y unirse, liberarían, en forma de calor, su energía de movimiento («energía cinética»). Entonces, el nuevo planeta sufriría la compresión de la fuerza gravitatoria y desprendería más calor aún. En tercer lugar; las sustancias radiactivas de la Tierra, uranio, torio y potasio- producirían grandes cantidades de

calor, para desintegrarse a lo largo de las edades geológicas. Durante las primeras fases, cuando la materia radiactiva era mucho más abundante que ahora, la radiactividad pudo haber proporcionado el calor suficiente para licuar la Tierra.

Pero no todos los científicos aceptan el hecho de esa fase líquida como una condición absoluta. Particularmente el químico americano Harold Clayton Urey cree que la mayor parte de la Tierra fue siempre sólida. Según él, en una Tierra sólida en su mayor parte podría formarse también un núcleo de hierro mediante una lenta disociación de éste. Incluso hoy puede seguir emigrando el hierro desde el manto hacia el núcleo, a razón de 50.000 Tm/seg.

El enfriamiento de la Tierra desde un estado inicial de fusión o semifusión contribuiría a explicar su rugosidad externa. Cuando la Tierra se contrajo como consecuencia del enfriamiento, su corteza se plegaría ocasionalmente. Los plegamientos menores desencadenarían terremotos; los mayores, o constante acumulación de pequeños ajustes, determinarían corrimientos de montañas. Sin embargo, sería relativamente breve la Era de formación de las grandes cadenas montañosas. Una vez formadas, las montañas sufrirían los efectos de la erosión, en una secuencia bastante limitada, con arreglo a la escala geológica del tiempo. Luego seguiría un largo período de estabilidad, hasta que las fuerzas orogénicas llegaran a crear una tensión lo suficientemente intensa como para iniciar una nueva fase de plegamientos. Así, pues, la Tierra sería, durante la mayor parte de su vida, un planeta más bien monótono y prosaico, con mares poco profundos y continentes aplazados.

Pero a esta teoría se opone un grave obstáculo: el hecho de que, al parecer, la Tierra no se enfriá realmente. Quienes piensan lo contrario se fundan en la lógica suposición que un cuerpo se enfriá, *por fuerza*, cuando no hay una fuente de calor continuo. En efecto. Pero en el caso de la Tierra *existe* esa fuente de calor continuo, de lo cual no se tuvo conocimiento antes del siglo XX. Esa nueva fuente salió a luz con el descubrimiento de la radiactividad, en 1896, cuando se comprobó que entre los recovecos del átomo yacía oculta una nueva forma de energía absolutamente insospechada hasta entonces.

Según parece, durante los últimos centenares de millones de años, la radiactividad ha ido generando en la corteza y el manto el calor suficiente para evitar, por lo

menos, un descenso de temperatura en el interior terrestre. Lo más probable es todo lo contrario, o sea, que la Tierra se siga caldeando con lentitud. Ahora bien, pese a todo, nos hallamos en las postrimerías de una Era orogénica. Pues si la Tierra no se hubiese enfriado ni contraído durante ese período, ¿cuál sería ahora el aspecto de nuestras montañas?

Hace un par de décadas, el físico israelí Chaim L. Perkeris expuso una teoría en cuya elaboración participó el geólogo americano D. T. Briggs. Dicha teoría, bastante parecida al concepto moderno sobre la dilatación del fondo oceánico, empieza por suponer que el calor procedente del núcleo desencadena periódicamente una serie de remolinos en el manto. Estos torbellinos de materia caldeada se elevan hasta la corteza y descienden de nuevo tan pronto como se enfrián allí. Puesto que el manto no es líquido, sino plástico, dicho movimiento es de gran lentitud; quizás no comporte más de 5 cm por año.

Ahora bien, cuando dos torbellinos contiguos se mueven hacia abajo, arrastran consigo una porción de corteza y dejan una ligera materia costrosa en el manto más denso, que el calor convierte en granito. Más tarde, la isóstasis determina la elevación de esa materia, que da origen a una cadena montañosa. Al período de formación orogénica, cuya duración alcanzaría tal vez los 60 millones de años, siguió un estadio estacionario, de 500 millones de años, durante el cual se acumuló en el manto el calor suficiente para la iniciación de otro ciclo. Esto significa que quizás exista una correlación entre la formación orogénica y la deriva de los continentes.

## El Océano

La Tierra constituye una excepción entre los planetas del Sistema Solar, ya que su temperatura superficial permite que exista el agua en sus tres estados: líquido, sólido y gaseoso. Por lo que sabemos, la Tierra es también el único miembro del Sistema Solar que posee océanos. En realidad tendríamos que decir «océano», pues los océanos Pacífico, Atlántico, Índico, Ártico y Antártico forman, en conjunto, un cuerpo de agua salada en el que pueden ser consideradas como islas la masa de Europa-Asia-África, los continentes americanos y las masas pequeñas, tales como la Antártica y Australia.

Las cifras estadísticas referentes a este «océano» son impresionantes. Tiene un área total de 205 millones de kilómetros cuadrados y cubre más del 71 % de la superficie de la Tierra. Su volumen, considerando que la profundidad media de los océanos tiene 3.750 m, es, aproximadamente, de 524 millones de kilómetros cúbicos, o sea, 0,15 % del volumen total del Planeta. Contiene el 97.2 % del agua de la Tierra, y es también nuestra reserva de líquido, dado que cada año se evaporan 128.000 km de agua, que revierten a la Tierra en forma de lluvia o nieve. Como resultado de tales precipitaciones, tenemos que hay unos 320.000 km<sup>3</sup> de agua bajo la superficie de los continentes, y unos 48.000 km<sup>3</sup> sobre la superficie, en forma de lagos y ríos.

El océano tiene una peculiar importancia para la vida. Casi con certeza, las primeras formas vivas tuvieron su origen en él. Y, desde el punto de vista cuantitativo, en los océanos se desarrolla aún la mayor parte de la vida de nuestro planeta. Sobre la Tierra firme, la vida está confinada a escasos metros de distancia de la superficie de las aguas (aunque aves y aviones realicen salidas temporales desde esta base). En los océanos, la vida ocupa de forma permanente una zona cuya profundidad es de unos 11 km o más en algunos lugares. Y, sin embargo, hasta años recientes, el hombre ha ignorado no poco de los océanos y, en particular, del suelo oceánico, como si se tratara de otro planeta. Incluso hoy, los astrónomos saben más acerca de la superficie lunar, que los geólogos sobre la superficie de la tierra que hay bajo los océanos.

El fundador de la oceanografía moderna fue un oficial de Marina americano llamado Matthew Fontaine Maury. A sus 30 años se lesionó en un accidente, desgracia personal que trajo beneficios a la Humanidad. Nombrado jefe del depósito de mapas e instrumentos (sin duda, una sinecura), se obligó a sí mismo a la tarea de cartografiar las corrientes oceánicas. En particular estudió el curso de la Corriente del Golfo, que investigó por vez primera en 1769. el sabio americano Benjamin Franklin. La descripción de Maury se ha hecho clásica en oceanografía: «Es un río en el océano». Desde luego, se trata de un río mucho más grande que cualquier otro. Acarrea mil veces más agua por segundo que el Mississippi. Tiene una anchura de 80 km al principio, casi 800 m de profundidad, y corre a una velocidad superior a los 6 km por hora. Sus efectos de caldeamiento llegan hasta el lejano y

septentrional archipiélago de las Spitzberg.

Maury inició también la cooperación internacional en el estudio del océano. Fue la inquieta figura que se movió entre bastidores en una histórica conferencia internacional celebrada en Bruselas en 1853. En 1855 publicó el primer libro de oceanografía: *Geografía física del mar*. La Academia Naval en Annápolis honró a este investigador tomando, a su muerte, el nombre de Maury. Desde la época de Maury, las corrientes oceánicas han sido cuidadosamente cartografiadas. Describen amplios círculos, hacia la derecha, en los océanos del hemisferio Norte, y, hacia la izquierda en los mares del hemisferio Sur, ello en virtud del efecto Coriolis. Una corriente que se mueve a lo largo del ecuador no está sometida a dicho efecto, por lo cual sigue una línea recta. En el océano Pacífico se localizó una corriente de este tipo, estrecha y recta, que corre hacia el Este, del modo esperado, durante varios centenares de kilómetros a lo largo del ecuador. Se llama «Corriente Cromwell», en gracia a su descubridor, el oceanógrafo americano Townsend Cromwell. En 1961 el oceanógrafo americano Arthur D. Voorhis localizó una corriente similar, aunque algo más lenta, en el Atlántico.

Los oceanógrafos han empezado incluso a explorar la circulación más lenta de las profundidades oceánicas. Que en las profundidades no puede mantenerse una calma chicha lo demuestran varias pruebas indirectas. Por una parte, los seres que viven en las aguas superficiales consumen sin cesar sus principios alimenticios de naturaleza mineral, fosfatos y nitratos, que luego, al morir, llevan hacia las profundidades. Si no existiera ninguna circulación en sentido contrario que los impulsara de nuevo a la superficie, ésta quedaría desprovista, en poco tiempo, de tales sustancias minerales. Además, el oxígeno aportado por el aire de los océanos no podría filtrarse hacia las profundidades a una velocidad suficiente como para mantener la vida en él, si no existiera una corriente que actuase como vehículo. En realidad se ha encontrado la concentración adecuada, hasta en el fondo de los mares. Esto puede explicarse únicamente suponiendo que hay regiones del océano en que las aguas superficiales, ricas en oxígeno, pasan a las profundidades.

Lo que determina esta circulación vertical es la diferencia de temperatura. El agua superficial del océano se enfriá en las regiones árticas y, por tanto, desciende. Este continuo flujo de agua profunda se distribuye a todo lo largo del suelo oceánico, por

lo cual, incluso en los trópicos, los niveles más profundos del mar son muy fríos (se hallan cerca del punto de congelación). Eventualmente, el agua fría de las profundidades reemerge. Una vez en la superficie, se calienta y es impulsada hacia el Ártico o el Antártico, donde vuelve a descender. Puede afirmarse que la circulación resultante determinaría una dispersión total, en el océano Atlántico, en unos 1.000 años, de cualquier producto que se hubiera vertido en algún lugar del mismo. En el océano Pacífico, más extenso, esta dispersión tardaría unos 2.000 años en realizarse por completo.

Las barreras continentales complican esta imagen general. Para seguir las corrientes actuales, los oceanógrafos han acudido al oxígeno como elemento trazador. El agua fría absorbe más oxígeno que la caliente. Por tanto, el agua superficial ártica es particularmente rica en oxígeno. Al descender, invariablemente cede su oxígeno a los organismos que se alimentan de él. De esta forma, midiendo la concentración en oxígeno del agua profunda en diversos lugares, se puede comprobar la dirección de las corrientes marinas profundas.

Este tipo de cartografía ha demostrado que una importante corriente fluye desde el Ártico hacia el Atlántico bajo la Corriente del Golfo, y otra en dirección opuesta, desde el Antártico hacia el Atlántico Sur. El océano Pacífico no recibe ninguna corriente directa del Ártico, porque el único «orificio» de desagüe hasta él es el angosto y poco profundo estrecho de Bering. He aquí por qué constituye el final del camino para las corrientes profundas. Que el Pacífico Norte representa, en efecto, el término de todas las corrientes, viene demostrado por el hecho que sus aguas profundas son pobres en oxígeno. Debido a ello, amplias zonas de este inmenso océano están muy espaciadamente pobladas de seres vivos y constituyen la equivalencia de las áreas desérticas en tierra firme. Lo mismo puede decirse de los mares casi interiores, como el Mediterráneo, donde queda parcialmente obstaculizada la circulación total del oxígeno y los alimentos.

En 1957 se obtuvo una prueba más directa de esta imagen de las corrientes profundas, durante una expedición oceanográfica conjunta británico-americana. Los investigadores utilizaron una boya especial, ideada por el oceanógrafo británico John C. Swallow. Mantenía su nivel a poco más de 1,6 km de profundidad e iba provista de un dispositivo para emitir ondas sonoras de onda corta. Gracias a estas

señales, la boyas podían rastrearse al ser movidas por la corriente de la profundidad. De esta forma, la expedición consiguió trazar el curso de la corriente profunda bajo el Atlántico, a lo largo de su sector Oeste.

Toda esta información adquirirá una importancia práctica cuando la expansión del hombre obligue a dirigirse al océano en busca de más alimentos. Una «granja marina» científica requerirá el conocimiento de estas corrientes fertilizantes, al igual que las granjas terrestres exigen el conocimiento de los cursos de los ríos, las corrientes subterráneas y las precipitaciones. Mediante una gestión prudente y eficaz se podrá aumentar la cosecha actual de alimentos marinos, de unos 55 millones de toneladas anuales, hasta 200 millones de toneladas, siempre que se dé a la fauna marina cierto margen para sustentarse adecuadamente. (Como es natural, esto presupone el cese de nuestra insensata conducta, que tiende a contaminar el océano, particularmente las regiones oceánicas más próximas, a los litorales, que contienen la mayor cantidad de organismos marinos. Hasta ahora no sólo no hemos racionalizado la explotación del mar como fuente de alimentos, sino que, por el contrario, vamos mermando su capacidad para alimentarnos.)

Pero los alimentos no constituyen el único recurso importante del océano. El agua marina contiene, en inmensas cantidades, soluciones de casi todos los elementos conocidos. Así, hay en ellas 4.000 millones de toneladas de uranio, 300 millones de toneladas de plata y 4 millones de toneladas de oro, si bien su dilución es excesiva para poder llevar a cabo una extracción industrial rentable. Sin embargo, hoy se obtienen ya del agua marina, a escala comercial, magnesio y bromo. Hacia fines de la década de 1960, el valor del magnesio arrebatado al océano alcanzó los 70 millones de dólares anuales; por otra parte, el 75 % del bromo obtenido en todo el mundo proviene del mar. Por añadidura, las algas marinas secas constituyen una importante fuente de yodo, pues la planta viva absorbe del agua marina este elemento y lo concentra con una perfección que el hombre ha sido incapaz de igualar hasta ahora.

También, se extraen del mar otras materias más corrientes. En las aguas relativamente poco profundas que bordean el litoral estadounidense, se obtienen cada año unos 20 millones de toneladas de ostras, cuyas conchas constituyen una

valiosa fuente de caliza. De la misma forma se obtienen arena y grava, cuya cantidad total se acerca a los 50 millones de metros cúbicos.

Dispersos en regiones más profundas del fondo oceánico hay nódulos metálicos que se han precipitado alrededor de algún núcleo, bien sea un guijarro o un diente de tiburón. (Este proceso es análogo a la formación de una perla en torno a un grano de arena dentro de la ostra.)

Suelen llamarse nódulos de manganeso, porque son muy ricos en este metal. Se calcula que hay unas 25.000 toneladas de estos nódulos por kilómetro cuadrado en el fondo del Pacífico. Desde luego, su extracción industrial resultaría muy complicada, y, por otra parte, tampoco sería rentable si tuviese como único objetivo el contenido en manganeso. Sin embargo, esos nódulos contienen también un 1 % de níquel, un 0,5 % de cobre y un 0,5 % de cobalto, componentes menores que hacen mucho más interesante la posible extracción de tales nódulos.

También es importante el 97 % de la sustancia oceánica, o sea, el agua. La Humanidad consume con creciente apetencia las limitadas reservas de agua dulce del Planeta; será preciso emplear cada vez más el agua oceánica purificada de sus sales, proceso conocido con el nombre de «desalinización». Y hay en el mundo unas 700 plantas desalinizadoras con capacidad para producir 120.000 litros diarios de agua dulce. Desde luego, el agua dulce de origen marino no puede competir aún con la de lluvia, problema común a casi todas las regiones del mundo; pero la tecnología de este sector es aún joven y tiene mucho camino por delante.

El hombre empezó a sondar las grandes profundidades del océano cuando ya estaba muy avanzado nuestro siglo. El suelo marino se convirtió en un asunto de interés comercial cuando se decidió tender un cable telegráfico a través del Atlántico. Con tal objeto, en 1850, Maury trazó un mapa del fondo del Atlántico. Transcurrieron 15 años, jalonados por numerosas interrupciones y fracasos, antes que el cable atlántico fuese tendido, al fin, gracias, sobre todo, al impulso, increíblemente perseverante, del financiero americano Cyrus West Field, quien perdió en ello una fortuna. (Hoy cruzan el Atlántico más de veinte cables.)

La exploración sistemática del fondo marino inicióse con la famosa expedición alrededor del mundo del buque británico *Challenger*, en 1870. Para medir la profundidad de los océanos, el *Challenger* empleó el método tradicional de arriar 6

km de cable, con un peso en su extremo, hasta alcanzar el fondo. De esta forma se realizaron más de 360 sondeos. Este procedimiento no es sólo enormemente laborioso, sino también poco exacto. La exploración del suelo oceánico experimentó una auténtica revolución en 1922, al introducirse el método de emisión de ondas sonoras y recepción de sus ecos. Permítasenos una pequeña digresión acerca del sonido, para explicar los principios de este método.

Las vibraciones mecánicas envían ondas longitudinales a través de la materia (por ejemplo, el aire), y podemos detectar algunas de ellas en forma de sonidos. Percibimos las diferentes longitudes de onda como sonidos de tono diferente. Los sonidos más graves que podemos captar tienen una longitud de onda de 22 m y una frecuencia de 15 ciclos/seg. El sonido más agudo que puede detectar un adulto normal tiene una longitud de onda de 2,2 cm y una frecuencia de 15.000 ciclos/seg. (Los niños pueden oír sonidos algo más agudos.) La absorción del sonido por la atmósfera depende de su longitud de onda. Cuanto mayor sea la longitud de onda, tanto menor será la cantidad de sonido absorbida por un determinado espesor de aire. A los sonidos de las sirenas se les da un registro tan bajo, para que puedan oírse a la mayor distancia posible. La sirena del *Queen Mary* emitía 127 vibraciones por segundo, o sea, casi las mismas que la nota más grave del piano. Puede oírse a una distancia de 16 km, y los instrumentos especializados pueden detectarla incluso a 160-240 km.

Pero también hay sonidos de tono más profundo que el que podemos percibir. Algunos de los sonidos que emiten los terremotos y los volcanes están situados en esta zona «infrasónica». Tales vibraciones pueden dar la vuelta a la Tierra, en ocasiones, varias veces, antes de quedar completamente absorbidas. La eficacia con que se refleja el sonido depende también de la longitud de onda, aunque en sentido contrario. Cuanto menor sea la longitud de onda, tanto más eficaz será la reflexión. Las ondas sonoras de frecuencias superiores a los sonidos más agudos que podemos captar, son reflejadas incluso con más eficacia. Algunos animales pueden percibir sonidos más agudos que nosotros y hacer uso de ellos. Los murciélagos, al chillar, emiten ondas sonoras cuyas frecuencias «ultrasónicas» son de 130.000 ciclos/seg, ondas que son reflejadas y oídas por estos animales. Según la dirección de la que son reflejadas y el tiempo que transcurre entre el chillido y el eco, los

animales pueden «deducir» la localización de los insectos cuya caza persiguen y los obstáculos que han de evitar. (De aquí que puedan volar perfectamente aún siendo ciegos, lo cual no podrían hacer si estuviesen privados del oído. El biólogo italiano Lázaro Spallanzani fue el primero en observar, en 1793, que los murciélagos pueden «ver» con los oídos.)

Las marsopas, al igual que los guácharos (aves que viven en cuevas en Venezuela) utilizan también los sonidos para «localizar mediante el eco». Puesto que sus presas son más grandes, emplean ondas sonoras situadas en la región audible, que bastan para su propósito. (Los complejos sonidos que emiten los animales de cerebro mayor, como las marsopas y los delfines, pueden incluso, y así se sospecha hoy ser utilizados para un tipo de comunicación general, o sea, para «conversar». El biólogo americano John C. Lilly ha investigado de forma exhaustiva esta posibilidad.)

Para utilizar las propiedades de las ondas sonoras ultrasónicas, el hombre debe, ante todo, producirlas. Una muestra de ello, a pequeña escala, la tenemos en el silbato de perro, (construido, por vez primera, en 1883). Emite un sonido situado casi en la zona ultrasónica, que puede ser oído por los perros, pero no por los seres humanos.

Un camino más prometedor parecía ser el abierto por el químico francés Pierre Curie y su hermano, Jacques, quienes, en 1880, descubrieron que las presiones ejercidas sobre ciertos cristales determinaban un potencial eléctrico («piezoelectricidad»). La acción contraria también es válida. Aplicando un potencial eléctrico a un cristal de este tipo, se produce una ligera constricción, como si se aplicara la presión («electrostricción»). Cuando se desarrolló la técnica para producir un potencial que fluctuaba más rápidamente, se logró hacer vibrar los cristales con la suficiente rapidez como para emitir ondas ultrasónicas. Esto lo realizó por vez primera, en 1917, el físico francés Paul Langevin, quien aplicó en seguida a la detección de los submarinos los excelentes poderes de reflexión de este sonido de onda corta. Durante la Segunda Guerra Mundial, este método, perfeccionado, se transformó en el «sonar» («Sound navigation and ranging» [o sea, navegación y localización por el sonido]; «ranging» significa «determinación de la distancia»).

En la determinación de la distancia del suelo marino, el método de la reflexión de las ondas sonoras ultrasónicas remplazó a la sondaleza. El intervalo de tiempo entre el envío de la señal (un determinado impulso) y el retorno de su eco mide la distancia hasta el fondo. Lo único que el operador ha de tener en cuenta es la posibilidad que la lectura refleje un falso eco procedente de un banco de peces o de algún obstáculo. (Naturalmente, este instrumento es útil para las flotas pesqueras.) El método de sondeo por el eco no es sólo rápido y adecuado, sino que permite también trazar un perfil continuo del suelo sobre el que se mueve el barco, de forma que los oceanógrafos obtienen una imagen de la tipografía del suelo oceánico. Éste ha resultado ser más irregular, más accidentado que la superficie terrestre. Hay mesetas del tamaño de un continente, y cadenas montañosas más largas y elevadas que las de la tierra emergida. La isla de Hawái es la cumbre de una montaña submarina de 9.900 m de altura, más alta que cualquiera del Himalaya, por lo cual Hawái puede ser llamada, con toda propiedad, la montaña más alta de la Tierra. Existen también numerosos conos truncados, llamados «montes marinos» o *guyots*. Se les dijo el nombre de *guyot* en honor del geógrafo suizo-americano Arnold Henry Guyot, que introdujo la Geografía científica en Estados Unidos cuando emigró a América, en 1848. Los «montes marinos» los descubrió, durante la Segunda Guerra Mundial, el geólogo americano Harry Hammond Hess, el cual localizó 19 de ellos, en rápida sucesión. Hay, por lo menos, unos 10.000, la mayor parte situados en el Pacífico. Uno de ellos, descubierto en 1964, al sur de la isla de Wake, tiene una altura superior a los 4.200 m.

Hay también profundos abismos (fosas) en los que el Gran Cañón sería un simple barranco. Las fosas, todas ellas localizadas a lo largo de archipiélagos, tienen, en conjunto, un área de cerca del 1 % del suelo oceánico. Esto, puede no parecer mucho, pero en realidad equivale a la mitad del área de los Estados Unidos, y las fosas contienen 15 veces más agua que todos los ríos y lagos del mundo. La más profunda de ellas está situada en el Pacífico. Estas fosas se hallan a lo largo de los archipiélagos de las Filipinas, Marianas, Kuriles, Salomón y Aleutianas. Existen también otros grandes abismos en el Atlántico, cerca de las Indias Occidentales y en las Islas Sandwich del Sur, y uno en el océano Índico, junto a las Indias Orientales.

Además de las fosas, los oceanógrafos han descubierto en el suelo oceánico la presencia de cañones, algunos de centenares de kilómetros de longitud, semejantes a los lechos de los ríos. Determinados cañones parecen ser realmente la continuación de ríos terrestres, en especial uno que se extiende desde el río Hudson hasta el Atlántico. Por lo menos 20 de tales enormes hendiduras han sido localizadas sólo en la bahía de Bengala, como resultado de los estudios oceanográficos efectuados en el Índico durante la década de 1960. Podemos suponer que fueron en otro tiempo lechos de ríos terrestres, cuando el océano estaba a un nivel más bajo que hoy. Pero algunos de estos cañones submarinos se hallan tan por debajo del actual nivel del mar, que parece del todo improbable que hayan podido encontrarse nunca situados por encima del océano. En años recientes, varios oceanógrafos, en especial Maurice Ewing y Bruce C. Essen- han desarrollado otra teoría: la que los cañones submarinos fueron excavados por corrientes turbulentas («corrientes turbias») de agua cenagosa que, en alud, bajaron desde las escarpaduras continentales a más de 96 km/hora. En 1929, una corriente turbia llamó la atención de los científicos sobre este problema. Se observó después de un terremoto en las costas de Terranova. La corriente rompió gran número de cables, con el consiguiente trastorno.

Sin embargo, el hallazgo más espectacular referente al fondo marino tuvo ya una premonición en fechas muy anteriores, allá por el año 1853, cuando se trabajaba en el proyecto del cable atlántico. Se hicieron sondeos para medir la profundidad oceánica y, a su debido tiempo, se informó que las señales revelaban la presencia de una meseta submarina en pleno océano. El centro del océano parecía menos profundo que los costados.

Como es de suponer, entonces se creyeron necesarios sólo algunos sondeos a lo largo de la línea, hasta que, en 1922, el buque oceanográfico alemán *Meteor*, inició el sondeo metódico del Atlántico con instrumentos ultrasónicos. Durante 1925, los científicos pudieron ya informar sobre la existencia de una vasta cordillera submarina que serpenteaba a lo largo del Atlántico. Los picos más altos atravesaban la superficie del agua y aparecían como islas, entre ellas, las Azores, Ascensión y Tristán da Cunha.

Ulteriores sondeos en otras regiones marítimas demostraron que la cadena montañosa no se limitaba al Atlántico, pues su extremo meridional contorneaba África y Nueva Zelanda, para tomar luego la dirección Norte y trazar un vasto círculo alrededor del océano Pacífico. Lo que al principio se creyó que era la dorsal del Atlántico Central resultó ser la dorsal transoceánica. Y, por lo que atañía a la constitución básica, dicha dorsal transoceánica no era como las cadenas montañosas del continente, pues mientras las montañas continentales están compuestas por rocas sedimentarias estratificadas, el oceánico es de basalto prensado desde la cúspide hasta las grandes y caldeadas simas.

Después de la Segunda Guerra Mundial, Ewing y Heezen exploraron con redoblado afán los accidentes del fondo oceánico. Para sorpresa suya, diversos y minuciosos sondeos, realizados en 1953, les mostraron que a lo largo de la dorsal, y justamente por su centro, corría un profundo barranco. A su debido tiempo se descubrió también esta particularidad en todas las porciones de la dorsal transoceánica. Ello condujo a que algunos lo denominaron «la Gran Hendidura del Globo». Hay lugares donde ésta se acerca mucho a la Tierra: sube por el mar Rojo, entre África y Arabia, bordea las costas del Pacífico, atraviesa el golfo de California y contornea el litoral del Estado de California.

Al principio parecía como si tal Hendidura fuese continua (una grieta de 65.000 km en la corteza terrestre). Sin embargo, una exploración más detenida demostró que estaba compuesta por breves secciones rectas separadas entre sí, como si unas sacudidas sísmicas hubiesen desconectado cada sección de la siguiente. Y, en efecto, a lo largo de la Hendidura es donde suelen originarse los terremotos y los volcanes.

En su día, tal Hendidura era una falla por la que emergía lentamente, desde el interior, la roca fundida, o «magma». Allí se enfriaba y se aglomeraba para formar la dorsal; e incluso se extendía más allá de la misma. Esta difusión puede alcanzar velocidades de 16 cm/año; en consecuencia, todo el fondo del océano Pacífico podría quedar cubierto por una nueva capa en 100 millones de años. Por cierto que los sedimentos extraídos del fondo oceánico son muy raras veces más antiguos, lo cual puede parecer asombroso en una vida planetaria que sería cuarenta y cinco

veces más vieja si no mediara ese concepto del «desparramamiento sobre el suelo marino».

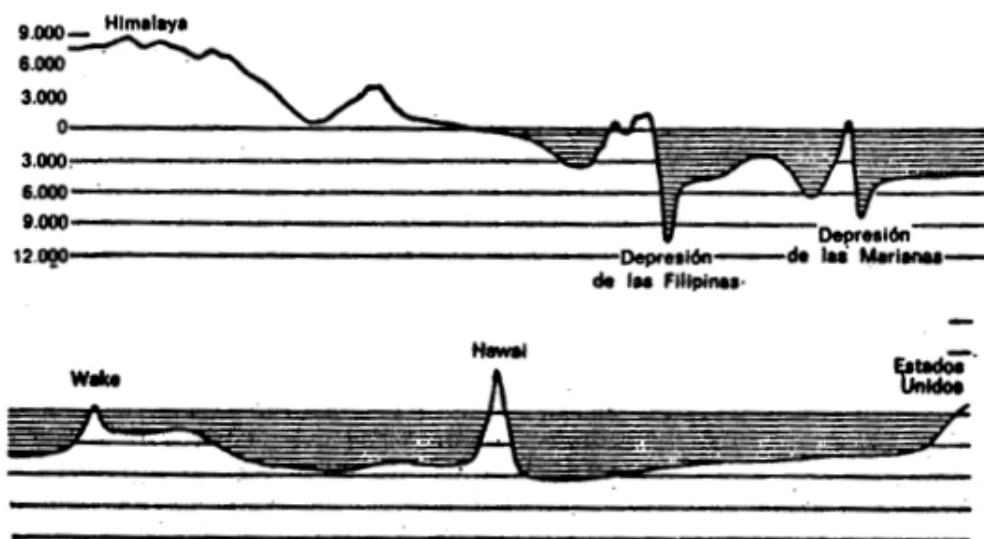
La Hendidura y sus ramificaciones parecen dividir la corteza terrestre en seis inmensos zócalos y algunos otros más pequeños. Estos zócalos se mueven impulsados por la actividad reinante a lo largo de la Hendidura, pero lo hacen como unidades independientes, es decir, que no se produce ningún movimiento apreciable en los accidentes de un determinado zócalo. La remoción de tales zócalos explica la rotura de la pangea y la deriva continental producida desde entonces. Nada parece indicar que tal deriva no pueda determinar algún día una nueva reunión de los continentes, aunque quizá con otra disposición. En la vida de la Tierra se habrán formado y fragmentado probablemente muchas pangreas; la fragmentación más reciente se muestra con mayor claridad en nuestros archivos por la sencilla razón que es la última. Este concepto sobre el movimiento de los zócalos puede servir para ilustrar muchas peculiaridades de la corteza terrestre cuyo origen se veía antes muy incierto. Cuando dos zócalos se unen lentamente, la corteza se arruga y alabea tanto arriba como abajo, y determina las montadas y sus «raíces». Así parece haber nacido el Himalaya cuando el zócalo portador de la India estableció lento contacto con el zócalo donde se asentaba el resto de Asia.

Por otra parte, cuando dos zócalos se unen con demasiada rapidez para permitir la corrupción, la superficie de uno puede abrirse camino bajo el otro y formar una fosa, un rosario de islas y una disposición favorable a la actividad volcánica. Tales fosas e islas se encuentran, por ejemplo, en el Pacífico Occidental.

Los zócalos pueden unirse o separarse indistintamente cuando el desparramamiento del suelo marino ejerce su influencia sobre ellos. La Hendidura atraviesa la región occidental de Islandia, isla que se va desintegrando con gran lentitud. Otro punto de fragmentación se encuentra en el mar Rojo, que es de formación más bien reciente y debe su existencia a la separación, ya iniciada, entre África y Arabia. (Si se unieran las dos orillas del mar Rojo coincidirían con exactitud.) Este proceso es incesante, de tal forma que el mar Rojo constituye un nuevo océano en período de formación. Su actividad evolutiva viene demostrada por el hecho que en su fondo hay sectores (según se descubrió el año 1965) con una temperatura de 56º C y una concentración salina cinco veces superior a la normal.

Como es natural, la existencia de la Hendidura tiene la máxima importancia para los pueblos establecidos en lugares próximos a ella. Por ejemplo, la falla de San Andreas, en California, forma parte de la Hendidura, y precisamente el resquebrajamiento de la misma fue lo que ocasionó el terremoto de San Francisco en 1906 y el seísmo del Viernes Santo en Alaska el año 1964. Sorprendentemente, en las profundidades marinas hay vida. Hasta hace casi un siglo se creía que la vida en el océano estaba limitada a la región superficial. El Mediterráneo, durante mucho tiempo principal centro de la civilización- carece prácticamente de vida en sus niveles profundos. Pero aunque este mar sea un semidesierto, cálido y pobre en oxígeno, el naturalista inglés Edward Forbes, en la década de 1840, consiguió sacar a la superficie equinodermos vivientes desde una profundidad de 400 m. Más tarde, en 1860, se rompió un cable telegráfico depositado en el fondo del Mediterráneo, a 1.600 m, y al sacarlo se hallaron incrustados en él corales y otras formas de vida. En 1872, el *Challenger*, bajo la dirección del naturalista británico Charles Wyville Thomson, en un viaje de más de 100.000 km, realizó el primer intento sistemático de obtener formas de vida de suelo oceánico. Lo halló pletórico de las mismas. El mundo de la vida submarina no es, en modo alguno, una región de tenebroso silencio. Un procedimiento para escuchar bajo el agua, el «hidrófono», ha demostrado, en años recientes, que las criaturas marinas producen ruidos secos, gruñen, chasquean, gimen y, en general, convierten las profundidades oceánicas en un lugar tan enloquecedoramente ruidoso como la tierra emergida.

Desde la Segunda Guerra Mundial, numerosas expediciones han explorado los abismos submarinos. Un nuevo *Challenger*, en 1951, sondeó la fosa de las Marianas, en el Pacífico Oeste, y comprobó que era ésta (y no la situada junto a las Islas Filipinas) la más profunda de la Tierra. La parte más honda se conoce hoy con el nombre de «Profundidad Challenger». Tiene más de 10.000 m. Si se colocara el monte Everest en su interior, aún quedaría por encima de su cumbre más de 1 km de agua. También el *Challenger* consiguió extraer bacterias del suelo abisal. Se parecían sensiblemente a las de la tierra emergida, pero no podían vivir a una presión inferior a las 1.000 atmósferas.



*Perfil del suelo del Pacífico. Las grandes fosas en el suelo marino alcanzan una profundidad bajo el nivel del mar mayor que la altura del Himalaya, y la cumbre de las Hawái se eleva sobre el suelo oceánico a mayor altura que la montaña terrestre más elevada.*

Las criaturas de estas simas se hallan tan asociadas a las enormes presiones que reinan en las grandes profundidades, que son incapaces de escapar de su fosa; en realidad están como aprisionadas en una isla. Estas criaturas han seguido una evolución independiente. Sin embargo, en muchos aspectos se hallan tan estrechamente relacionadas con otros organismos vivientes, que, al parecer, su evolución en los abismos no data de mucho tiempo. Es posible que algunos grupos de criaturas oceánicas fueron obligadas a bajar cada vez a mayor profundidad a causa de la lucha competitiva, mientras que otros grupos se veían forzados, por el contrario, a subir cada vez más, empujados por la depresión continental, hasta llegar aemerger a la tierra. El primer grupo tuvo que acomodarse a las altas presiones, y el segundo, a la ausencia de agua. En general, la segunda adaptación fue probablemente la más difícil, por lo cual no debe extrañarnos que haya vida en los abismos.

Desde luego, la vida no es tan rica en las profundidades como cerca de la superficie. La masa de materia viviente que se halla por debajo de los 7.000 m ocupa sólo la décima parte, por unidad de volumen de océano, respecto a la que se estima para los 3.000 m. Además, por debajo de los 7.000 m de profundidad hay muy pocos

carnívoros, si es que hay alguno, ya que no circulan suficientes presas para su subsistencia. En su lugar, hay seres que se alimentan de cualquier detrito orgánico que puedan hallar. Cuán poco tiempo ha transcurrido desde la colonización de los abismos puede demostrarse por el hecho que ningún antecesor de las criaturas halladas se ha desarrollado a partir de un período anterior a 200 millones de años, y que el origen de la mayor parte de ellos no se remonta a más de 50 millones de años. Se produjo sólo al comienzo de la Era de los dinosaurios, cuando el mar profundo, hasta entonces libre de todo organismo, vióse invadido, finalmente, por la vida.

No obstante, algunos de los organismos que invadieron las profundidades sobrevivieron en ellas, en tanto que perecieron sus parientes más próximos a la superficie. Esto se demostró de forma espectacular, a finales de la década de 1930. El 25 de diciembre de 1938, un pescador de arrastre que efectuaba su trabajo en las costas de África del Sur capturó un extraño pez, de 1,5 m de longitud aproximadamente. Lo más raro de aquel animal era que tenía las aletas adosadas a lóbulos carnosos, en vez de tenerlas directamente unidas al cuerpo. Un zoólogo sudafricano, J. L. B. Smith, que tuvo la oportunidad de examinarlo, lo recibió como un magnífico regalo de Navidad. Se trataba de un celacanto, pez primitivo que los zoólogos habían considerado extinto hacía 70 millones de años. Era el espécimen viviente de un animal que se suponía había desaparecido de la Tierra antes que los dinosaurios alcanzaran su hegemonía.

La Segunda Guerra Mundial constituyó un paréntesis en la búsqueda de más celacantos. En 1952 fue pescado, en las costas de Madagascar, otro ejemplar de un género diferente. Posteriormente se pescaron otros muchos. Como está adaptado a la vida en aguas bastante profundas, el celacanto muere rápidamente cuando es izado a la superficie.

Los evolucionistas han tenido un particular interés en estudiar este espécimen de celacanto, ya que a partir de él se desarrollaron los primeros anfibios. En otras palabras, el celacanto es más bien un descendiente directo de nuestros antepasados pisciformes.

Del mismo modo que la forma ideal de estudiar el espacio exterior consiste en enviar hombres hasta él, así, el mejor sistema para investigar las profundidades del océano es también el de enviar hombres a dichas profundidades.

En el año 1830, Augustus Siebe ideó el primer traje de buzo. Un buzo con un traje apropiado puede alcanzar sólo unos 90 m. En 1934, Charles William Beebe consiguió llegar hasta unos 900 m en su «batisfera», pequeña nave de gruesas paredes, equipada con oxígeno y productos químicos para absorber el anhídrido carbónico. Su colaborador, Otis Barton, alcanzó una profundidad de 1.350 m en 1948, utilizando una batisfera modificada: el «bentoscopo».

Básicamente, la batisfera es un objeto inerte, suspendido de un buque de superficie mediante un cable (un cable roto significaba el final de la aventura). Por tanto, lo que se precisaba, era una nave abisal maniobrable. Tal nave, el «batiscafo», fue inventada, en 1947, por el físico suizo Auguste Piccard. Construido para soportar grandes presiones, utilizaba un pesado lastre de bolas de hierro (que, en caso de emergencia, eran soltadas automáticamente) para sumergirse, y un «globo» con gasolina (que es más ligera que el agua), para procurar la flotación y la estabilidad. En su primer ensayo, en las costas de Dakar, al oeste de África, en 1948, el batiscafo (no tripulado) descendió hasta los 1.350 m.

Posteriormente, Piccard y su hijo Jacques construyeron una versión mejorada del batiscafo. Esta nave fue llamada *Trieste* en honor de la que más tarde sería Ciudad Libre de Trieste, que había ayudado a financiar su construcción. En 1953, Piccard descendió hasta los 4.000 m en aguas del Mediterráneo.

El *Trieste* fue adquirido por la Marina de los Estados Unidos, con destino a la investigación. El 14 de enero de 1960, Jacques Piccard y un miembro de dicha Marina, Don Walsh, tocaron el suelo de la fosa de las Marianas, o sea, que descendieron hasta los 11.263 m, la mayor profundidad abisal. Allí, donde la presión era de 1.100 atmósferas, descubrieron corrientes de agua y criaturas vivientes. La primera criatura observada era un vertebrado, un pez en forma de lenguado, de unos 30 cm de longitud y provisto de ojos.

En 1964, el batiscafo *Arquímedes*, de propiedad francesa, descendió diez veces al fondo de la sima de Puerto Rico, la cual, con una profundidad de 8.445 m- es la más

honda del Atlántico. También allí, cada metro cuadrado de suelo oceánico tenía su propia forma de vida.

De modo bastante curioso, el terreno no descendía uniformemente hacia el abismo, sino que parecía más bien dispuesto en forma de terrazas, como una gigantesca escalera.

### **Los Casquetes Polares**

Siempre han fascinado a la Humanidad los lugares más extremos de nuestro planeta, y uno de los más esforzados capítulos de la historia de la Ciencia ha sido la exploración de las regiones polares. Estas zonas están cargadas de fábulas, fenómenos espectaculares y elementos del destino humano: las extrañas auroras boreales, el frío intenso y, especialmente los inmensos casquetes polares, que determinan el clima terrestre y el sistema de vida del hombre.

Las regiones polares atrajeron la atención algo tardíamente en la historia de la Humanidad. Fue durante la edad de las grandes exploraciones, tras el descubrimiento de América por Cristóbal Colón. Los primeros exploradores del Ártico estaban interesados, principalmente, en hallar una vía marítima que permitiera bordear Norteamérica por su parte más alta. Persiguiendo este fuego fatuo, el navegante inglés Henry Hudson (al servicio de Holanda), en 1610, encontró la bahía que hoy lleva su nombre, lo cual le costó la vida. Seis años después, otro navegante inglés, William Baffin, descubrió lo que más tarde sería la bahía de Baffin y llegó, en su penetración, a unos 1.200 km del polo Norte. De forma casual, en 1846 a 1848, el explorador británico John Franklin emprendió su ruta a través de la costa norte del Canadá y descubrió el «Paso del Noroeste» (paso que luego resultó absolutamente impracticable para los barcos). Murió durante el viaje.

Siguió luego medio siglo de esfuerzos por alcanzar el polo Norte, movidos casi siempre por la simple aventura o por el deseo de ser los primeros en conseguirlo. En 1873, los exploradores austriacos Julius Payer y Carl Weyprecht lograron llegar a unos 900 km del Polo. Descubrieron un archipiélago, que denominaron Tierra de Francisco José, en honor del emperador de Austria. En 1896, el explorador noruego

Fridtjof Nansen llegó, en su viaje sobre el hielo ártico, hasta una distancia de 500 km del Polo.

Finalmente, el 6 de abril de 1909, el explorador americano Robert Edwin Peary alcanzó el Polo propiamente dicho.

El polo Norte ha perdido hoy gran parte de su misterio. Ha sido explorado desde el hielo, por el aire y bajo el agua. Richard Evelyn Byrd y Floyd Bennett fueron los primeros en volar sobre él en 1926, y los submarinos han atravesado también sus aguas.

Entretanto, la masa de hielo más grande del Norte, concentrada en Groenlandia, ha sido objeto de cierto número de expediciones científicas. Se ha comprobado que el glaciar de Groenlandia cubre 1.833.900 de los 2.175.600 km<sup>2</sup> de aquella isla, y se sabe también que su hielo alcanza un espesor de más de 1,5 km en algunos lugares.

A medida que se acumula el hielo, es impulsado hacia el mar, donde los bordes se fragmentan, para formar los icebergs. Unos 16.000 icebergs se forman por tal motivo cada año en el hemisferio Norte, el 90 % de los cuales procede de la masa de hielo de Groenlandia. Los icebergs se desplazan lentamente hacia el Sur, en particular hacia el Atlántico Oeste. Aproximadamente unos 400 por año rebasan Terranova y amenazan las rutas de navegación. Entre 1870 y 1890, catorce barcos se fueron a pique y otros cuarenta resultaron dañados a consecuencia de colisiones con icebergs.

El clímax se alcanzó en 1912, cuando el lujoso buque de línea *Titanic* chocó con un iceberg y se hundió, en su viaje inaugural. Desde entonces se ha mantenido una vigilancia internacional de las posiciones de estos monstruos inanimados. Durante los años que lleva de existencia esta «Patrulla del Hielo», ningún barco se ha vuelto a hundir por esta causa.

Mucho mayor que Groenlandia es el gran glaciar continental del polo Sur. La masa del hielo de la Antártica cubre 7 veces el área del glaciar de Groenlandia, y tiene un espesor medio de 1.600 a 2.400 m. Esto se debe a la gran extensión del continente antártico, que se calcula entre los 13.500.000 y los 14.107.600 km<sup>2</sup>, aunque todavía no se sabe con certeza qué parte es realmente tierra y qué cantidad corresponde al mar cubierto por el hielo. Algunos exploradores creen que la

Antártica es un grupo de grandes islas unidas entre sí por el hielo, aunque, por el momento, parece predominar la teoría continental.

El famoso explorador inglés James Cook (más conocido como capitán Cook) fue el primer europeo que rebasó el círculo antártico. En 1773 circunnavegó las regiones antárticas. (Tal vez fue este viaje el que inspiró *The Rime of the Ancient Mariner*, de Samuel Taylor Coleridge, publicada en 1798, que describe un viaje desde el Atlántico hasta el Pacífico, atravesando las heladas regiones de la Antártica.)

En 1819, el explorador británico Williams Smith descubrió las islas Shetland del Sur, justamente a 80 km de la costa de la Antártica. En 1821, una expedición rusa avistó una pequeña isla («Isla de Pedro I»), dentro ya del círculo Antártico; y, en el mismo año, el inglés George Powell y el norteamericano Nathaniel B. Palmer vieron por primera vez una península del continente antártico propiamente dicho, llamada hoy Península de Palmer.

En las décadas siguientes, los exploradores progresaron lentamente hacia el polo Sur. En 1840, el oficial de Marina americano Charles Wilkes indicó que aquellas nuevas tierras formaban una masa continental, teoría que se confirmó posteriormente. El inglés James Weddell penetró en una ensenada (llamada hoy mar de Weddell) al este de la Península de Palmer, a unos 1.400 km del polo Sur. El explorador británico James Clark Ross descubrió la otra ensenada mayor de la Antártica (mar de Ross) y llegó a 1.150 km de distancia del Polo. En 1902-1904, un tercer súbdito británico, Robert Falcon Scott, viajó a través de los hielos del mar de Ross, hasta una distancia de 800 km del Polo. Y en 1909, otro inglés, Ernest Shackleton, cruzó el hielo y llegó a 160 km del Polo.

Finalmente el 16 de diciembre de 1911, alcanzó el éxito el explorador noruego Roald Amundsen. Por su parte, Scott, que realizó un segundo intento, halló el polo Sur justamente tres semanas más tarde, sólo para encontrarse con el pabellón de Amundsen plantado ya en aquel lugar. Scott y sus hombres perecieron en medio del hielo durante el viaje de retorno.

A finales de la década de 1920, el aeroplano contribuyó en gran manera a la conquista de la Antártica. El explorador australiano George Hubert Wilkins recorrió, en vuelo, 1.900 km de su costa, y Richard Evelyn Byrd, en 1929, voló sobre el polo Sur propiamente dicho. Por aquel tiempo se estableció en la Antártica la primera

base: «Pequeña América I».

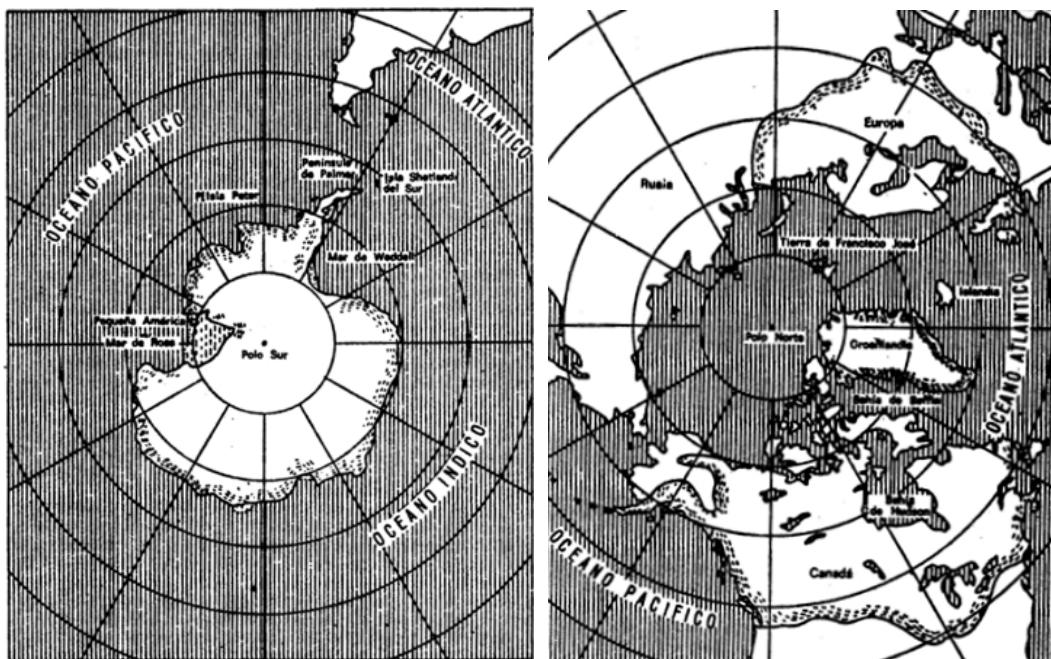
Las regiones polares Norte y Sur se transformaron en puntos focales del mayor proyecto internacional científico de los tiempos modernos. Dicho, proyecto tuvo su origen en 1882-1883, cuando cierto número de naciones se agruparon en un «Año Polar Internacional», destinado a la investigación y exploración científica de fenómenos como las auroras, el magnetismo terrestre, etc. Alcanzó tal éxito, que en 1932-1933, se repitió un segundo Año Polar Internacional. En 1950; el geofísico estadounidense Lloyd Berkner (que había tomado parte en la primera expedición de Byrd a la Antártica) propuso un tercer año de este tipo. La sugerencia fue aceptada entusiásticamente por el International Council of Scientific Unions. Por aquel tiempo, los científicos disponían ya de poderosos instrumentos de investigación y se planteaban nuevos problemas acerca de los rayos cósmicos, de la atmósfera superior, de las profundidades del océano e incluso de la posibilidad de la exploración del espacio. Se preparó un ambicioso «Año Geofísico Internacional», que duraría desde el 1º de Julio de 1957, hasta el 31 de Diciembre de 1958 (período de máxima actividad de las manchas solares). La empresa recibió una decidida colaboración internacional. Incluso los antagonistas de la guerra fría, la Unión Soviética, y los Estados Unidos- procedieron a enterrar el hacha de la guerra, en consideración de la Ciencia.

Aunque el éxito más espectacular del Año Geofísico Internacional, desde el punto de vista del interés público, fue el satisfactorio lanzamiento de satélites artificiales por parte de la Unión Soviética y los Estados Unidos, la Ciencia obtuvo otros muchos frutos de no menor importancia. De entre ellos, el más destacado fue una vasta exploración internacional de la Antártica. Sólo los Estados Unidos establecieron siete estaciones, que sondaron la profundidad del hielo y sacaron a la superficie, desde una profundidad de varios kilómetros, muestras del aire atrapado en él, aire que tendría una antigüedad de varios millones de años, así como restos de bacterias. Algunas de éstas, congeladas a unos 30 m bajo la superficie del hielo y que tendrían tal vez un siglo de edad, fueron revividas y se desarrollaron normalmente. Por su parte, el grupo soviético estableció una base en el «Polo de la Inaccesibilidad» o sea, el lugar situado más en el interior de la Antártica, donde registraron nuevas mínimas de temperatura. En agosto de 1960, el semiinvierno antártico- se registró

una temperatura de  $-115^{\circ}$  C, suficiente como para congelar el anhídrido carbónico. En el curso de la siguiente década operaron en la Antártica docenas de estaciones. En la más espectacular hazaña realizada en la Antártica, un grupo de exploración británico, dirigido por Vivian Ernest Fuchs y Edmund Hillary, cruzó el continente por primera vez en la Historia, si bien con vehículos especiales y con todos los recursos de la Ciencia moderna a su disposición. Por su parte, Hillary había sido también el primero, junto con el *sherpa* Tensing Norgay- en escalar el monte Everest, el punto más alto de la Tierra, en 1953.

El éxito del Año Geofísico Internacional y el entusiasmo despertado por esta demostración de cooperación en plena guerra fría, se tradujeron, en 1959, en un convenio firmado por doce naciones, destinado a excluir de la Antártica todas las actividades militares (entre ellas, las explosiones nucleares y el depósito de desechos radiactivos). Gracias a ello, este continente quedará reservado a las actividades científicas.

La masa de hielo de la Tierra, con un volumen de más de 14 millones de kilómetros cúbicos, cubre, aproximadamente, el 10 % del área terrestre emergida. Casi el 86 % de este hielo está concentrado en el glaciar continental de la Antártica, y un 10 %, en el glaciar de Groenlandia. El restante 4 % constituye los pequeños glaciares de Islandia, Alaska, Himalaya, los Alpes y otros lugares del Globo.



*Los mayores glaciares continentales están hoy día ampliamente restringidos a Groenlandia y la Antártica. En el período cumbre de la última era glacial, los glaciares se extendieron sobre la mayor parte del norte y oeste de Europa y al sur de los Grandes Lagos, en el continente norteamericano.*

En particular los glaciares alpinos han sido objeto de estudio durante mucho tiempo. En la década de 1820 dos geólogos suizos, J. Venetz y Jean de Charpentier, comunicaron que las características rocas de los Alpes centrales estaban también esparcidas por las llanuras del Norte ¿Cómo habían podido llegar hasta allí? Los geólogos especularon sobre la posibilidad que los glaciares montañosos hubieran cubierto en otro tiempo un área mucho mayor para dejar abandonados, al retirarse, peñascos y restos de rocas.

Un zoólogo suizo, Jean-Louis-Rodolphe Agassiz, profundizó en esta teoría. Colocó líneas de estacas en los glaciares para comprobar si se movían realmente. En 1840 había demostrado, más allá de toda duda, que los glaciares fluían, como verdaderos ríos lentos, a una velocidad aproximada de 67,5 m por Año. Entretanto, Agassiz había viajado por Europa y hallado señales de glaciares en Francia e Inglaterra. En otras áreas descubrió rocas extrañas a su entorno y observó en ellas señales que sólo podían haber sido hechas por la acción abrasiva de los glaciares, mediante los guijarros que transportaban incrustados en sus lechos.

Agassiz marchó a los Estados Unidos en 1846 y se convirtió en profesor de Harvard. Descubrió signos de glaciación en Nueva Inglaterra y en el Medio Oeste. En 1850 era ya del todo evidente que debió de haber existido una época en que gran parte del hemisferio Norte había estado bajo un enorme glaciar continental. Los depósitos dejados por este glaciar han sido estudiados con detalle desde los tiempos de Agassiz. Estas investigaciones han puesto de relieve que el hielo ha avanzado y retrocedido en cuatro ocasiones. En su desplazamiento hacia el Sur, los hielos llegaron hasta Cincinnati hace sólo 18.000 años. Al avanzar los glaciares, el clima, en el Sur, debió de ser más húmedo y frío; al retirarse (para dejar tras sí lagos, de los cuales, los mayores que existen en la actualidad son los Grandes Lagos), el clima en el Sur se hizo más caluroso y seco.

El último retroceso de los hielos se produjo entre 8.000 y 12.000 años atrás. Antes de estas Eras de glaciación hubo un período de clima suave, que se mantuvo por lo

menos 100 millones de años. Durante este tiempo no se formaron glaciares continentales, ni siquiera en los Polos. Testifican este hecho los depósitos de carbón en las Spitzberg, e incluso indicios del mismo en la Antártica, ya que el carbón indica que existieron frondosos bosques.

El avance y retroceso de los glaciares dejó su huella no sólo en el clima del resto de la Tierra, sino también en la fisonomía de los continentes. Por ejemplo, si se fundieran del todo los glaciares de Groenlandia y la Antártica, ahora en fase de retracción, el nivel del océano alcanzaría una altura casi 60 m superior a la actual. Sumergiría las zonas costeras de todos los continentes, incluyendo muchas de las más importantes ciudades del mundo. Por otra parte, Alaska, Canadá, Siberia, Groenlandia e incluso la Antártica se transformarían en lugares más habitables.

La situación inversa se produjo en la culminación del período glacial. Había tanta agua inmovilizada en forma de heleros y glaciares, cuyo número cuadruplicaba el de los actuales, que el nivel del mar era 132 m inferior al de nuestros días. Por consiguiente, las plataformas litorales se hallaban emergidas.

Tales plataformas son porciones relativamente poco profundas de océano, contiguas a los continentes. El fondo marino desciende con una inclinación más o menos gradual, hasta alcanzar unos 132 m de profundidad. A partir de aquí, la pendiente es ya mucho más abrupta, y entonces se precipitan de repente las grandes simas. Por su estructura, las plataformas continentales son parte integrante de los continentes anejos: prácticamente constituyen el resalte de la plataforma que establece la verdadera divisoria del continente. Ello equivale a decir que por el momento hay suficiente agua en las cuencas oceánicas para inundar los bordes del continente.

Además, el área de la plataforma continental no es reducida, ni mucho menos. Su amplitud varía según los lugares: en el litoral oriental de los Estados Unidos tienen una considerable extensión, mientras que ante la costa occidental es muy exigua. Ahora bien, en términos generales, la plataforma continental tiene una anchura de 65 km en promedio, y su área total es de más de 17 millones de kilómetros cuadrados. Dicho de otra forma: se trata de un área continental «potencial» algo mayor que la Unión Soviética y sumergida bajo las aguas oceánicas.

Precisamente esa área es la que se hallaba al descubierto durante los períodos de máxima glaciación, y, sin duda, la que quedó emergida en la última de las grandes edades glaciales. Fósiles y restos de fauna terrestre (tales como colmillos de elefantes) han aparecido bajo varios metros de agua, a muchos kilómetros de tierra firme, y que fueron arrastrados desde las plataformas continentales. Por añadidura, tales regiones septentrionales heladas provocaban lluvias en las tierras meridionales con mucha mayor frecuencia que ahora, e incluso el desierto del Sahara era entonces un inmenso pastizal. El desecamiento del Sahara, que empezó cuando se retiraron los glaciares, se produjo no mucho antes que se iniciaran los tiempos históricos.

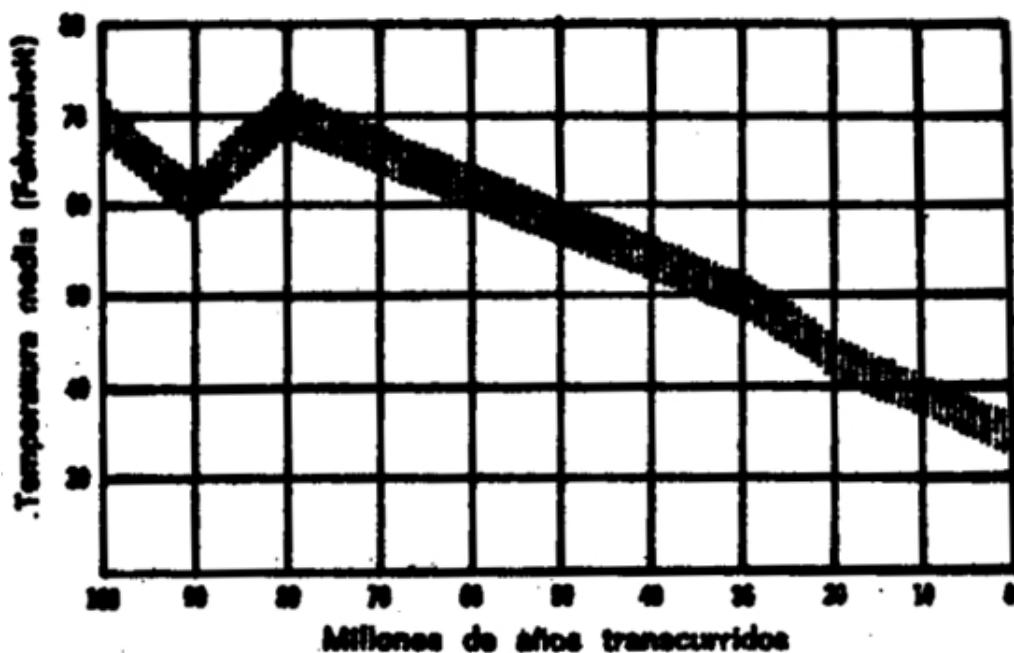
Así, pues, tenemos un movimiento pendular de la habitabilidad. Cuando descendía el nivel del mar, grandes áreas continentales se transformaban en helados desiertos, y las plataformas continentales se hacían habitables tal como los desiertos de nuestros días. Por el contrario, cuando subía el nivel de las aguas, se tenía una inundación de las tierras bajas, y las regiones polares se convertían en habitables, mientras que los desiertos emprendían el retroceso.

Al considerar las Eras glaciales, la cuestión más importante que se plantea es la de averiguar su causa. ¿Por qué el hielo avanza o retrocede, y por qué las glaciaciones han tenido una duración tan relativamente breve, pues la actual ocupó sólo 1 millón de los últimos 100 millones de años?

Sólo se necesita un pequeño cambio térmico para que se inicie o termine una Era glacial: un simple descenso en la temperatura, suficiente para acumular durante el invierno una cantidad de nieve superior a la que se puede fundir en verano, o, a la inversa, una elevación de la temperatura que baste para fundir durante el verano más nieve de la que ha caído en invierno. Se calcula que un descenso, en el promedio anual de temperatura, de sólo 3,5º C, basta para que crezcan los glaciares, en tanto que una elevación de la misma magnitud fundiría los hielos en la Antártica y Groenlandia, las cuales quedarían convertidas en desnudas rocas en sólo unos siglos.

Tales cambios térmicos se produjeron realmente en el pasado. Hoy se ha desarrollado un método que permite medir con asombrosa exactitud aquellas temperaturas primitivas. El químico americano Jacob Bigeleisen, en colaboración

con H. C. Urey, demostró en 1947, que la relación entre la variedad más común de oxígeno (oxígeno-16) y sus isótopos más raros (por ejemplo, oxígeno-18), presente en la combinación, variaría según la temperatura. En consecuencia, si se medía la relación oxígeno-16/oxígeno-18 en el fósil antiguo de un animal marino, podía averiguararse la temperatura del agua oceánica en el tiempo en que vivió el animal. En 1950, Urey y su grupo de trabajo perfeccionaron hasta tal punto la técnica que, mediante el análisis de las capas de la concha de un fósil de 1 millón de años de edad (una forma extinguida de calamar), pudieron determinar que aquella criatura había nacido durante un verano, vivido 4 años y muerto en primavera.



*El registro de las temperaturas oceánicas durante los últimos 100 millones de años.*

Este «termómetro» ha establecido que, hace 100 millones de años, el promedio de la temperatura del océano en todo el mundo era, aproximadamente, de  $21,11^{\circ}$  C. Fue enfriándose con lentitud hasta alcanzar, 10 millones de años más tarde, los  $16,11^{\circ}$  C, para ascender de nuevo hasta los  $21,11^{\circ}$  C al cabo de otros 10 millones de años. Desde entonces, la temperatura del océano ha ido bajando lenta y progresivamente. Tal vez este descenso térmico fue el que causó la desaparición de los dinosaurios (los cuales estaban probablemente adaptados a climas suaves y constantes), que supuso una ventaja para las aves de sangre caliente y los

mamíferos, que pueden mantener una temperatura interna constante. Cesare Emiliani, utilizando la técnica de Urey, estudió los caparazones de los foraminíferos sacados a la superficie junto con los fragmentos del suelo oceánico. Comprobó que la temperatura en la superficie del océano era de unos 10º C hace 30 millones de años y de unos 6,11º C hace 20 millones de años, mientras que en la actualidad es de 1,66º C.

¿Qué determina estos cambios, a largo plazo, en la temperatura? Una posible explicación sería el llamado «efecto de invernadero» del anhídrido carbónico. El anhídrido carbónico absorbe, en considerable proporción, las radiaciones infrarrojas. Esto significa que cuando hay apreciables cantidades del índice de este gas en la atmósfera, tiende a bloquearse la pérdida nocturna de calor a partir de la tierra calentada por el sol. En consecuencia, el calor se acumula. Por el contrario, cuando desciende el contenido de anhídrido carbónico en la atmósfera, la tierra se enfriá progresivamente.

Si la concentración usual de anhídrido carbónico en el aire aumentara hasta el doble (desde 0,3 % hasta 0,6 %), este pequeño cambio bastaría para elevar la temperatura superficial en unos 3º C y conduciría a la rápida y total fusión de los glaciares continentales. Y si tal concentración descendiera a la mitad de su valor actual, la temperatura bajaría, a su vez, lo bastante como para extender nuevamente los glaciares hasta Nueva York.

Los volcanes proyectan a la atmósfera grandes cantidades de anhídrido carbónico. La meteorización de las rocas absorbe el anhídrido carbónico (por lo cual se forma la piedra caliza). Por tanto, aquí son posibles ambos mecanismos de cambios climáticos a largo plazo. Un período de actividad volcánica superior al normal podría originar un notable aumento del anhídrido carbónico en el aire e iniciar así un calentamiento de la Tierra. Por el contrario, en una Era de formación de montañas, en la que grandes áreas de nuevas y aún no desgastadas rocas están expuestas al aire, podría descender la concentración de anhídrido carbónico en la atmósfera. Esto es lo que posiblemente ocurrió en las postrimerías del Mesozoico (la edad de los reptiles), hace unos 80 millones de años, cuando se inició el largo descenso de la temperatura terrestre.

Pero, ¿qué podemos decir acerca de los avances y retrocesos de las cuatro Eras

glaciales subseguidas en el último millón de años? ¿Por qué se produjo esta rápida alternancia de glaciación y fusión, en períodos comparativamente pequeños de una decena de milares de años? Precisas determinaciones de la edad de arrecifes de coral y de profundos sedimentos marinos han mostrado tales cambios de temperatura.

En 1920, el físico serbio Milutin Milankovich sugirió que esta situación podía explicarse por lentes variaciones en la relación Tierra-Sol. En ocasiones, la inclinación de la Tierra variaba ligeramente; en otras, su perihelio (período de máxima aproximación al Sol en su órbita) se acercaba algo más. Una combinación de estos factores, argumentaba Milankovich- podría afectar de tal forma la cantidad de calor recibido del Sol por el hemisferio Norte, que se producirían ascensos y descensos cíclicos de su temperatura media. Opinaba que tal ciclo tendría una extensión de unos 40.000 años, lo cual proporcionaría a la Tierra una «Gran Primavera», un «Gran verano», un «Gran Otoño» y un «Gran Invierno», cada uno de ellos con una duración de 10.000 años.

La diferencia entre un Gran Verano y un Gran Invierno es realmente pequeña, y la teoría supone que, sólo tras un largo período de progresiva reducción de la temperatura global, la pequeña caída de temperatura adicional del Gran Invierno bastaría para disminuir la temperatura del hemisferio Norte hasta el punto de dar inicio a las Eras glaciales, hace un millón de años. De acuerdo con la teoría de Milankovich. ahora estamos viviendo en un Gran Verano y, de aquí a unos 10.000 años aproximadamente, entraremos en otro «Gran Invierno».

La teoría de Milankovich no ha acabado de satisfacer a los geólogos, en especial porque supone que las Eras glaciales de los hemisferios Norte y Sur se iniciaron en distintos momentos, lo cual no se ha demostrado. Recientemente se han propuesto muchas otras teorías: que el Sol sigue ciclos de lenta fluctuación en su emisión de calor; que el polvo procedente de las erupciones volcánicas, más que el anhídrido carbónico, ha determinado el efecto de calentamiento «invernadero», etc. Por el momento, la hipótesis más interesante es la presentada por Maurice Ewing, del observatorio geológico Lamont- y un colega suyo, William Donn.

Ewing y Donn atribuyen la sucesión de las Eras glaciales en el hemisferio Norte a las condiciones geográficas que rodean al polo Norte. El océano Ártico está casi rodeado

por tierra. En los períodos de clima benigno, antes que empezaran las recientes Eras glaciales, cuando este océano ofrecía sus aguas abiertas, los vientos que las barrían captaron el vapor de agua que cayó luego en forma de nieve sobre el Canadá y Siberia. Al formarse glaciares, de acuerdo con la teoría Ewing-Donn, el Planeta absorbió menos calor procedente del Sol, porque el manto de hielo, al igual que las nubes en los períodos tormentosos, reflejaba parte de la luz solar. En consecuencia, disminuyó la temperatura general de la Tierra. Pero, al hacerlo, se congeló el océano Ártico y, por tanto, los vientos captaron menos humedad del mismo. Y menos humedad en el aire significa menos nieve en invierno. Así, pues, se invirtió el proceso: al nevar menos en invierno, durante el verano se fundía toda la nieve caída. Los glaciares se retiraron, hasta que la Tierra se calentó lo suficiente como para fundir el océano Ártico y dejar de nuevo las aguas libres, momento en el cual se reanudó el ciclo, con la nueva formación de los glaciares.

Resulta una paradoja que la fusión del océano Ártico, más que su congelación, fuese el origen de una Era glacial. No obstante, los geofísicos hallaron la teoría plausible y capaz de resolver muchas cuestiones. El problema principal acerca de esta teoría radicaba en que convertía en un misterio mayor que antes la ausencia de Eras glaciales en el último millón de años. Pero Ewing y Donn tienen una respuesta para ello. Sugieren que durante el largo período de clima benigno anterior a las Eras glaciales, el polo Norte pudo haber estado localizado en el océano Pacífico. En tal caso, la mayor parte de la nieve habría caído en el océano, en vez de hacerlo en la tierra por lo cual no se formarían glaciares importantes.

Desde luego, el polo Norte experimenta un movimiento pequeño, pero constante: se desplaza, en círculos irregulares de 9 m, en un período de 435 días más o menos, tal como descubrió, a principios del siglo XX, el astrónomo americano Seth Carlo Chandler. También se ha corrido otros 9 m hacia Groenlandia desde 1900. No obstante, tales cambios, ocasionados, quizás, por terremotos, con los consiguientes cambios en la distribución de la masa del Globo- son cuestiones sin importancia.

Lo que se necesita para apoyar la teoría de Ewin-Donn eran trastornos de gran magnitud, causados, posiblemente, por la deriva continental. Según se mueva la corteza terrestre, el polo Norte puede quedar rodeado de tierra, o solitario en medio

de las aguas. Sin embargo, ¿pueden tener relación los cambios causados por la deriva, con los períodos de glaciación?

Cualquiera que haya sido la causa de las Eras glaciales, parece ser que el hombre, en lo futuro, podrá introducir cambios climáticos. Según el físico americano Gilbert N. Plass, estamos viviendo la última de las Eras glaciales, puesto que los hornos de la civilización invaden la atmósfera de anhídrido carbónico. Cien millones de chimeneas aportan anhídrido carbónico al aire incesantemente; el volumen total de estas emanaciones es de unos 6.000 millones de toneladas por año (unas 200 veces la cantidad procedente de los volcanes). Plass ha puesto de manifiesto que, desde 1900, el contenido de nuestra atmósfera en anhídrido carbónico se ha incrementado en un 10 % aproximadamente. Calculó que esa adición al «invernadero» de la Tierra, que ha impedido la pérdida de calor, habría elevado la temperatura media en un 1,1º C por siglo. Durante la primera mitad del siglo XX, el promedio de temperatura ha experimentado realmente este aumento, de acuerdo con los registros disponibles (la mayor parte de ellos, procedentes de Norteamérica y Europa). Si prosigue en la misma proporción el calentamiento, los glaciares continentales podrían desaparecer en un siglo o dos.

Las investigaciones realizadas durante el Año Geofísico Internacional parecen demostrar que los glaciales están retrocediendo casi en todas partes. En 1959 pudo comprobarse que uno de los mayores glaciares del Himalaya había experimentado, desde 1935, un retroceso de 210 m. Otros han retrocedido 300 e incluso 600 m. Los peces adaptados a las aguas frías emigran hacia el Norte, y los árboles de climas cálidos avanzan, igualmente, en la misma dirección. El nivel del mar crece lentamente con los años, lo cual es lógico si se están fundiendo los glaciares. Dicho nivel tiene ya una altura tal que, en los momentos de violentas tormentas y altas mareas, el océano amenaza con inundar el Metro de Nueva York.

No obstante, y considerando el aspecto más optimista, parece ser que se ha comprobado un ligero descenso en la temperatura desde principios de 1940, de modo que el aumento de temperatura experimentado entre 1880 y 1940 se ha anulado en un 50 %. Esto puede obedecer a una mayor presencia de polvo y humo en el aire desde 1940: las partículas tamizan la luz del sol y, en cierto modo, dan sombra a la Tierra. Parece como si dos tipos distintos de contaminación atmosférica

provocada por el hombre anulasen sus respectivos efectos, por lo menos en este sentido y temporalmente.

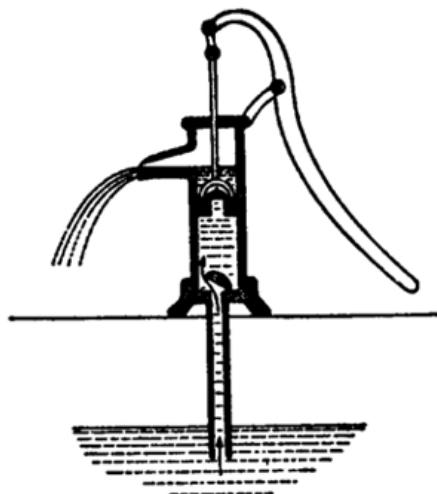
## Capítulo 4

### La Atmósfera

#### **Capas de Aire**

Aristóteles imaginaba el mundo formado por cuatro capas, que constituían los cuatro elementos de la materia: tierra (la esfera sólida), agua (el océano), aire (la atmósfera) y fuego (una capa exterior invisible, que ocasionalmente se mostraba en forma de relámpagos). Más allá de estas capas, decía, el Universo estaba compuesto por un quinto elemento, no terrestre, al que llamó «éter» (a partir de un derivado latino, el nombre se convirtió en «quintaesencia», que significa «quinto elemento»).

En este esquema no había lugar para la nada; donde acababa la tierra, empezaba el agua; donde ambas terminaban, comenzaba el aire; donde éste finalizaba, se iniciaba el fuego, y donde acababa el fuego, empezaba el éter, que seguía hasta el fin del Universo. «La Naturaleza, decían los antiguos, aborrece el vacío» (el *horror vacui* de los latinos, el miedo a «la nada»).



*Principio de la bomba de agua. Cuando la empuñadura eleva el pistón, se crea un vacío parcial en el cilindro, y el agua asciende penetrando en él a través de una válvula de una sola dirección. A medida que se va repitiendo el bombeo, el nivel del agua va subiendo hasta que surge por el caño.*

La bomba aspirante, un antiguo invento para sacar el agua de los pozos, parecía ilustrar admirablemente este horror al vacío. Un pistón se halla estrechamente

ajustado en el interior del cilindro; cuando se empuja hacia abajo el mango de la bomba, el pistón es proyectado hacia arriba, lo cual deja un vacío en la parte inferior del cilindro. Pero, dado que la Naturaleza aborrece el vacío, el agua penetra por una válvula, de una sola dirección, situada en el fondo del cilindro, y corre hacia el vacío. Repetidos bombeos hacen subir cada vez más el agua al cilindro, hasta que, por fin, sale el líquido por el caño de la bomba.

De acuerdo con la teoría aristotélica, de este modo sería siempre posible hacer subir el agua a cualquier altura. Pero los mineros que habían de bombear el agua del fondo de las minas, comprobaron que por mucho y muy fuerte que bombearan, nunca podían hacer subir el agua a una altura superior a los 10 m sobre su nivel natural.

Hacia el final de su larga e inquieta vida de investigador, Galileo sintió interés por este problema, y su conclusión fue la de que, en efecto, la Naturaleza aborrecía el vacío, pero sólo hasta ciertos límites. Se preguntó si tales límites serían menores empleando un líquido más denso que el agua; pero murió antes de poder realizar este experimento.

Evangelista Torricelli y Vincenzo Viviani, alumnos de Galileo, lo llevaron a cabo en 1644. Escogieron el mercurio (que es treinta y una veces y media más denso que el agua), del que llenaron un tubo de vidrio, de 1 m de longitud aproximadamente, y, cerrando el extremo abierto introdujeron el tubo en una cubeta con mercurio y quitaron el tapón. El mercurio empezó a salir del tubo y a llenar la cubeta; pero cuando su nivel hubo descendido hasta 726 mm sobre el nivel de la cubeta, el metal dejó de salir del tubo y permaneció a dicho nivel.

Así se construyó el primer «barómetro». Los modernos barómetros de mercurio no son esencialmente distintos. No transcurrió mucho tiempo en descubrirse que la altura del mercurio no era siempre la misma. Hacia 1660, el científico inglés Robert Hooke señaló que la altura de la columna de mercurio disminuía antes de una tormenta. Con ello se abrió el camino a la predicción del tiempo, o «meteorología». ¿Qué era lo que sostenía al mercurio? Según Viviani, sería el peso de la atmósfera, que presionaría sobre el líquido de la cubeta. Esto constituía una idea revolucionaria, puesto que la teoría aristotélica afirmaba que el aire no tenía peso y estaba sujeto sólo a su propia esfera alrededor de la Tierra. Entonces se demostró

claramente que una columna de 10 m de agua, u otra de 762 mm de mercurio, medían el peso de la atmósfera, es decir, el peso de una columna de aire, del mismo diámetro, desde el nivel del mar hasta la altura de la atmósfera.

El experimento demostró que la Naturaleza no aborrecía necesariamente el vacío en cualquier circunstancia. El espacio que quedaba en el extremo cerrado del tubo, tras la caída del mercurio era un vacío, que contenía sólo una pequeña cantidad de vapor de mercurio. Este «vacío de Torricelli» era el primero que producía el hombre. Casi inmediatamente, el vacío se puso al servicio de la Ciencia. En 1650, el estudiante alemán Athanasius Kircher demostró que el sonido no se podía transmitir a través del vacío, con lo cual, por vez primera, se apoyaba una teoría aristotélica. En la década siguiente, Robert Boyle demostró que los objetos ligeros caían con la misma rapidez que los pesados en el vacío, corroborando así las teorías de Galileo sobre el movimiento, contra los puntos de vista de Aristóteles.

Si el aire tenía un peso limitado, también debía poseer una altura limitada. El peso de la atmósfera resultó ser de  $0,33041 \text{ kg/cm}^2$ . Partiendo de esta base, la atmósfera alcanzaría una altura de 8 km, suponiendo que tuviese la misma densidad en toda su longitud. Pero, en 1662, Boyle demostró que podía ser así, ya que la presión aumentaba la densidad del aire. Cogió un tubo en forma de J e introdujo mercurio por el extremo más largo. El mercurio dejaba un poco de aire atrapado en el extremo cerrado del brazo más corto. Al verter más mercurio en el tubo, la bolsa de aire se contraía. Al mismo tiempo descubrió que aumentaba su presión, puesto que, a medida que se incrementaba el peso del mercurio, el aire se contraía cada vez menos. En sucesivas mediciones, Boyle demostró que, al reducirse el volumen del gas hasta su mitad, se duplicaba la presión de éste. En otras palabras, el volumen variaba en relación inversa a la presión. Este histórico descubrimiento, llamado «ley de Boyle», fue el primer paso de una serie de descubrimientos sobre la materia que condujeron, eventualmente, hasta la teoría atómica.

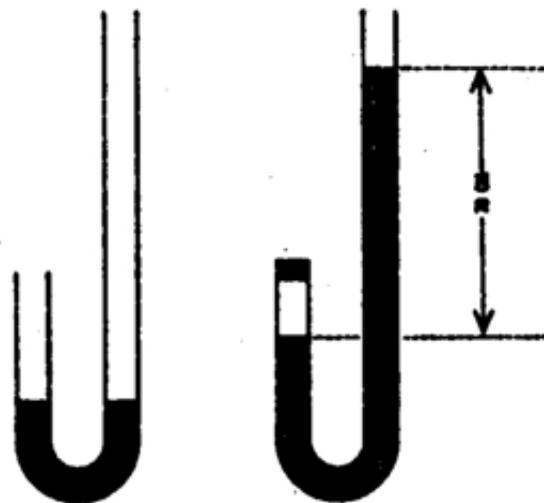
Puesto que el aire se contrae bajo la presión, debe alcanzar su mayor densidad a nivel del mar y hacerse gradualmente más ligero, a medida que va disminuyendo el peso del aire situado encima, al acercarse a los niveles más altos de la atmósfera. Ello lo demostró por vez primera el matemático francés Blas Pascal, quien, en 1648,

dijo a su cuñado que subiera a una montaña de unos 1.600 m de altura, provisto de un barómetro, y que anotara la forma en que bajaba el nivel del mercurio a medida que aumentaba la altitud.

Cálculos teóricos indicaban que si la temperatura era la misma en todo el recorrido de subida, la presión del aire se dividiría por 10, cada 19 km de altura. En otras palabras, a una altura de 19 km, la columna de mercurio habría descendido, de 762, a 76,2 mm; a los 38 km sería de 7,62 mm; a los 57 km, de 0,762 mm, y así sucesivamente. A los 173 km, la presión del aire sería sólo de 0,000000762 mm de mercurio. Tal vez no parezca mucho, pero, sobre la totalidad de la superficie de la Tierra, el peso del aire situado encima de ella, hasta 173 km de altura, representa un total de 6 millones de toneladas.

En realidad, todas estas cifras son sólo aproximadas, ya que la temperatura del aire varía con la altura. Sin embargo, ayudan a formarse una idea, y, así, podemos comprobar que la atmósfera no tiene límites definidos, sino que, simplemente, se desvanece de forma gradual hasta el vacío casi absoluto del espacio. Se han detectado colas de meteoros a alturas de 160 km, lo cual significa que aún queda el aire suficiente como para hacer que, mediante la fricción, estas pequeñas partículas lleguen a la incandescencia. Y la aurora boreal, formada por brillantes jirones de gas, bombardeados por partículas del espacio exterior, ha sido localizada a alturas de hasta 800, 900 y más kilómetros, sobre el nivel del mar.

Hasta finales del siglo XVIII, parecía que lo más cerca que el hombre conseguiría estar nunca de la atmósfera superior era la cumbre de las montañas. La montaña más alta que se hallaba cerca de los centros de investigación científica era el Mont Blanc, en el sudeste de Francia; pero sólo llegaba a los 5.000 m. En 1749, Alexander Wilson, un astrónomo escocés, acopló termómetros a cometas, en la confianza de poder medir con ello las temperaturas atmosféricas a cierta altura.



*Diagrama del experimento de Boyle. Cuando el brazo izquierdo del tubo es taponado y se va introduciendo más mercurio por el brazo derecho, el aire atrapado se comprime. Boyle demostró que el volumen de este aire varía inversamente a la presión. Esta es la «ley de Boyle».*

En 1782, dos hermanos franceses, Joseph-Michel y Jacques-Étienne Montgolfier consiguieron elevar estas fronteras. Encendieron fuego bajo un enorme globo, con una abertura en su parte inferior, y de este modo lo llenaron de aire caliente. El ingenio ascendió con lentitud: los Montgolfier habían logrado, por primera vez, que se elevara un globo! Al cabo de unos meses, los globos se llenaban con hidrógeno, un gas cuya densidad es 14 veces menor que la del aire, de modo que 1 Kg de hidrógeno podía soportar una carga de 6 kg. Luego se idearon las barquillas, capaces de llevar animales y, más tarde, hombres.

Un año después de esta ascensión, el americano John Jeffries realizó un viaje en globo sobre Londres, provisto de barómetro y otros instrumentos, así como de un dispositivo para recoger muestras de aire a diversas alturas. En 1804, el científico francés Joseph-Louis Gay-Lussac ascendió hasta una altura de 6.800 m y bajó con muestras de aire rarificado. Tal tipo de aventuras se pudieron realizar con mayor seguridad gracias al francés Jean-Pierre Blanchard, que inventó el paracaídas en 1785.

Éste era casi el límite para los seres humanos en una barquilla abierta; en 1875, tres hombres lograron subir hasta los 9.600 m, pero sólo uno de ellos, Gaston Tissandier, sobrevivió a la falta de oxígeno. Este superviviente describió los

síntomas de la falta del aire, y así nació la «Medicina aeronáutica». En 1892 se diseñaron y lanzaron globos no tripulados, provistos de instrumentos. Podían ser enviados a mayor altitud y volver con una inapreciable información sobre la temperatura y presión de regiones inexploradas hasta entonces.

Tal como se esperaba, la temperatura descendía en los primeros kilómetros de ascenso. A una altura de 11 km era de  $-55^{\circ}$  C. Pero entonces se produjo un hecho sorprendente. Más allá de esta altura no descendía ya.

El meteorólogo francés Léon-Phillipe Teisserenc de Bort sugirió que la atmósfera podía tener dos capas:

1. Una capa inferior, turbulenta, que contendría las nubes, los vientos, las tormentas y todos los cambios de tiempo familiares (capa a la que llamó «troposfera», que, en griego, significa «esfera del cambio»)
2. Una capa superior, tranquila, formada por subcapas de dos gases ligeros, helio e hidrógeno (a la que dio el nombre de «estratosfera», o sea, «esfera de capas»). Al nivel al que la temperatura dejaba de descender lo llamó «tropopausa» («final del cambio», o límite entre troposfera y estratosfera).

Desde entonces se ha comprobado que la tropopausa varía desde unos 16 km sobre el nivel del mar, en el ecuador, a sólo 8 km en los polos.

Durante la Segunda Guerra Mundial, los bombarderos estadounidenses de gran altura descubrieron un espectacular fenómeno, justamente por debajo de la tropopausa: la «corriente en chorro», que consiste en vientos fuertes y constantes, los cuales soplan de Oeste a Este a velocidades superiores a los 800 km/hora. Hay dos corrientes de este tipo: una, en el hemisferio Norte, a la latitud general de los Estados Unidos, Mediterráneo y norte de China, y otra en el hemisferio Sur, a la altitud de Nueva Zelanda y Argentina. Éstas corrientes forman meandros y, a menudo, originan remolinos mucho más al norte o al sur de su curso habitual. Actualmente, los aviones aprovechan la oportunidad de «cabalgar» sobre estos fuertes vientos. Pero mucho más importante es el descubrimiento que las corrientes en chorro ejercen una poderosa influencia sobre el movimiento de las masas de aire a niveles más bajos.

Este conocimiento ha permitido progresar en el arte de la predicción meteorológica. Pero el hombre no se conformó con que los instrumentos realizaran su personal deseo de exploración. Sin embargo, nadie podía sobrevivir en la ligera y fría atmósfera de las grandes alturas. Pero, ¿por qué exponerse a semejante atmósfera? ¿Por qué no utilizar cabinas selladas en las que se pudieran mantener las presiones y temperaturas de la superficie terrestre?

En los años 30, utilizando cabinas herméticas, el hombre alcanzó la estratosfera. En 1931, los hermanos Piccard (Auguste y Jean-Felix), el primero de los cuales inventaría luego el batíscafo, llegaron hasta los 17 km en un globo con una barquilla cerrada. Los nuevos globos, hechos de material plástico más ligero y menos poroso que la seda, permitieron subir más alto y permanecer más tiempo en el espacio. En 1938, un globo, llamado *Explorer II*, llegó hasta los 20 km, y en 1960, los globos tripulados habían alcanzado ya alturas de más de 34 km, mientras que los no tripulados ascendieron hasta cerca de los 47 km.

Todos estos vuelos a grandes alturas demostraron que la zona de temperatura constante no se extendía indefinidamente hacia arriba. La estratosfera alcanzaba su límite a unos 32 km de altura, por encima de la cual, la temperatura empezaba a ascender.

Esta «atmósfera superior», que contiene sólo un 2 % de la masa de aire total de la Tierra fue estudiada, a su vez, hacia 1940. Pero entonces el hombre necesitó un nuevo tipo de vehículo: el cohete.

Ya en el siglo XIII, los chinos habían inventado y empleado pequeños cohetes para la guerra psicológica, con objeto de asustar al enemigo. La moderna civilización occidental aplicó los cohetes a fines más cruentos. En 1801, un experto británico en artillería, William Congreve, que había conocido los cohetes en Oriente, cuando las tropas indias los emplearon contra los británicos hacia 1780, desarrolló una serie de proyectiles mortales. Algunos fueron empleados contra los Estados Unidos en la guerra de 1812, de un modo especial en el bombardeo de Fort McHenry, en 1814, lo cual inspiró a Francis Scott Key su *Star-Spangled Banner*, que canta «la estela rojiza de los cohetes». El cohete como arma perdió su importancia frente a los progresos de la artillería convencional en cuanto a alcance, exactitud y potencia. Sin embargo, en la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron el *bazooka* americano y el

*Katiusha* soviético, constituidos ambos, esencialmente, por cargas explosivas, impulsadas por cohetes. A mayor escala, los aviones reactores emplean el principio de acción y reacción de estos cohetes.

Hacia los comienzos del siglo XX, dos hombres, independientemente entre sí, dieron un nuevo y más positivo uso a los cohetes: la exploración de la parte superior de la atmósfera y del espacio. Estos hombres fueron un ruso (Konstantin Eduardovich Tsiolkovski) y un americano (Robert Hutchings Goddard). (Es realmente singular, teniendo en cuenta los posteriores acontecimientos, que un ruso y un americano fuesen los primeros heraldos de la Era de los cohetes, aunque un imaginativo inventor alemán, Hermann Ganswindt, también hizo especulaciones muy ambiciosas en este sentido, si bien menos sistemáticas y científicas.)

El ruso fue el primero en publicar sus trabajos, que imprimió entre 1903 y 1913, mientras que Goddard no los publicó hasta 1919. Sin embargo, éste fue el primero en pasar de la teoría a la práctica. El 16 de marzo de 1926, en una granja cubierta de nieve, en Auburn (Massachusetts), lanzó un cohete que alcanzó los 60 m de altura. Lo más notable de este artefacto era que lo impulsaba un combustible líquido, en vez de pólvora. Además, en tanto que los cohetes normales, bazookas, reactores y aparatos similares empleaban el oxígeno del aire circundante, el cohete de Goddard, diseñado para volar en el espacio exterior, debía transportar su propio oxidante en forma de oxígeno líquido (*lox*, tal como se denomina en el argot espacial).

Julio Verne, en sus obras de ciencia-ficción, había imaginado un cañón con un dispositivo de lanzamiento, para su viaje a la Luna; pero un cañón emplea toda su potencia de una sola vez, al comienzo, cuando la atmósfera es más densa y ofrece la mayor resistencia. Los cohetes de Goddard ascendían lentamente al principio, para ir ganando en velocidad y emplear sus últimos restos de potencia a gran altura, en una atmósfera poco densa donde la resistencia es ligera. La gradual obtención de velocidad significa que la aceleración se mantiene a niveles soportables, detalle muy importante en los vehículos tripulados.

Por desgracia, el logro de Goddard no fue reconocido en absoluto, aparte de ganarse la indignación de sus vecinos, quienes consiguieron que se le ordenara realizar sus experimentos en otro lugar. Goddard siguió disparando sus cohetes en

el mayor aislamiento, y, entre 1930 y 1935, sus vehículos consiguieron alcanzar velocidades de hasta 884 km/hora, y alturas de más de 2 km. Desarrolló sistemas para gobernar el cohete durante el vuelo y giroscopios para mantener su punta en la dirección adecuada. Goddard patentó asimismo la idea de los cohetes de varias fases. Puesto que cada fase se desprende de la masa del conjunto original y comienza su impulso a la alta velocidad impartida por la fase precedente, un cohete dividido en una serie de fases puede alcanzar velocidades muy superiores y alturas mayores de las que alcanzaría otro con la misma cantidad de combustible almacenada en una sola fase.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la Marina de los Estados Unidos financió a disgusto otros experimentos más amplios de Goddard. Mientras tanto, el Gobierno alemán dedicaba un gran esfuerzo a la investigación de cohetes, utilizando como instrumento de trabajo a un grupo de jóvenes que habían sido inspirados, en principio, por Hermann Oberth, matemático romano que, en 1923, había escrito sobre los cohetes y vehículos espaciales, sin conocer los trabajos de Tsiolkovski y Goddard. Las investigaciones alemanas se iniciaron en 1935 y culminaron en el desarrollo de la V-2. Bajo el mando del experto en cohetes Werner von Braun, quien, después de la Segunda Guerra Mundial, puso su talento a disposición de los Estados Unidos, se lanzó, en 1942, el primer cohete propiamente dicho. La V-2 entró en combate en 1944, demasiado tarde para inclinar la guerra en favor de los nazis, pese a que dispararon un total de 4.300 de ellas, de las cuales, 1.230 alcanzaron Londres. Los cohetes de Von Braun mataron a 2.511 ingleses e hirieron gravemente a otros 5.869.

El 10 de agosto de 1945, casi el mismo día en que acababa la guerra, murió Goddard, aunque pudo ver germinar su semilla. Los Estados Unidos y la Unión Soviética, estimulados por los éxitos de las V-2, se lanzaron a la investigación sobre cohetes, y cada uno de ellos se llevó a tantos científicos alemanes como pudo.

Para 1949, los Estados Unidos habían lanzado ya una V-2, capturada a los alemanes, que alcanzó los 205 km de altura. En el mismo año, los expertos en cohetes lanzaron un «WAC-Corporal», el segundo elemento de un cohete de dos fases, que ascendió a los 402 km. Había empezado la exploración de la atmósfera superior.

Por sí mismos, los cohetes no hubiesen conseguido muchos progresos en la exploración espacial, de no haber sido por una invención paralela: la telemetría, que fue aplicada por vez primera, en 1925, a la investigación atmosférica en un globo, por el científico ruso Piotr A. Moljanov.

Básicamente, esta técnica de «medir a distancia» implica la conversión de las condiciones que se han de medir (por ejemplo, la temperatura), a impulsos eléctricos, que son transmitidos por radio a la tierra. Las observaciones adquieren la forma de cambios en la intensidad o espaciamiento en los impulsos. Por ejemplo, un cambio de temperatura afecta la resistencia eléctrica de un cable, por lo cual modifica la naturaleza del impulso; un cambio en la presión de aire es convertido a cierto tipo de impulso por el hecho que el aire enfriá el cable, grado de enfriamiento que depende de la presión; la radiación se transforma en impulsos en un detector, etc. Actualmente se ha perfeccionado tanto la telemetría, que los cohetes parecen capaces de hacerlo todo, menos hablar, y sus intrincados mensajes han de ser interpretados por rápidas computadoras.

Así, pues, los cohetes y los telemeteorógrafos demostraron que, sobre la estratosfera, la temperatura alcanzaba un máximo de  $-10^{\circ}$  C, y luego descendía de nuevo hasta un mínimo de  $-90^{\circ}$  C a los 80 km de altura. Esa región de ascensos y descensos térmicos se denomina «mesosfera», voz creada en 1950 por el geofísico británico Sydney Chapman.

Más allá de la mesosfera, el aire es muy tenue y constituye sólo algunas milésimas del 1 % de la masa total de la atmósfera. Pero esta dispersión de átomos del aire determina un aumento térmico hasta de unos  $1.000^{\circ}$  C a los 482 km de altura, y, probablemente alcanza niveles más elevados aún por encima de ésta. Por eso se llama «termosfera» («esfera del calor»), curioso eco de la esfera de fuego aristotélica. Desde luego, aquí temperatura no significa calor en el sentido usual del término; es, simplemente, una medición de la velocidad de las partículas.

Más allá de los 482 km llegamos a la «exosfera», término creado por Lyman Spitzer en 1949, que puede extenderse hasta alturas de 1.600 km, para continuar gradualmente en el espacio interplanetario. Quizás algún día el creciente conocimiento sobre la atmósfera pueda permitir al hombre manipular el clima, en vez de hablar simplemente de él. Hasta ahora se ha realizado un pequeño intento. A

principios de la década de 1940, los químicos americanos Vincent Joseph Schaefer e Irving Langmuir observaron que las temperaturas muy bajas podían originar núcleos, en torno a los cuales se agrupaban gotas de lluvia. En 1946, un avión arrojó anhídrido carbónico en polvo sobre un banco de nubes, con lo que se formaron los primeros núcleos y las consiguientes gotas de lluvia («siembra de nubes»). Media hora más tarde llovía. Bernard Vonnegut mejoró posteriormente esta técnica al descubrir que el polvo de yoduro de plata era más efectivo aún en este sentido. Hoy se emplean estimulantes de lluvia de una nueva variedad científica, para acabar con las sequías, o, por lo menos, tratar de hacerlo, aunque para ello es necesario que haya nubes. En 1961, los astrónomos soviéticos emplearon la siembra de nubes para despejar una parte de cielo, a cuyo través habían de observar un eclipse. El intento fue parcialmente satisfactorio.

Quienes se interesaron por los cohetes persiguieron con ahínco nuevos y mejores resultados. Hasta 1952 se utilizaron las V-2 alemanas capturadas, mas por entonces se inició la fabricación de propulsores más potentes en los Estados Unidos y la Unión Soviética, por lo cual no se interrumpió el progreso, inicióse una nueva Era cuando, el 4 de octubre de 1957, un mes antes del centenario del nacimiento de Tsiolkovski, la Unión Soviética puso en órbita el primer satélite. El *Sputnik I* viajó alrededor de la Tierra describiendo una órbita elíptica: 251 km sobre la superficie (o 6.600 km partiendo del centro de la Tierra) de perigeo y 900 km de apogeo. Una órbita elíptica es algo parecido al camino que recorre la vagoneta de una montaña rusa. Yendo desde el apogeo, el punto más alto, al perigeo, el satélite se «desliza», por así decirlo, hacia abajo, y pierde potencial gravitatorio. Ello se traduce en un aumento de la velocidad, de modo que en el perigeo el satélite empieza a alcanzar de nuevo su máxima velocidad, del mismo modo que la vagoneta de la montaña rusa. El satélite pierde velocidad a medida que va subiendo (al igual que la vagoneta), y en el apogeo se mueve a su mínima velocidad, antes de empezar de nuevo el descenso. En el perigeo, el *Sputnik I* alcanzaba la mesosfera, donde la resistencia del aire, aunque pequeña, bastaba para reducir particularmente su velocidad por órbita. En cada una de sus órbitas sucesivas no lograba alcanzar su anterior altura de apogeo. Lentamente recorría su camino en espiral hacia abajo. Al fin perdió tanta energía que, por último, quedó capturado por la atracción terrestre;

con ello penetró en una atmósfera más densa, donde, al entrar en fricción con el aire, ardió.

La relación de la caída o descenso de la órbita del satélite depende, en parte, de la masa del mismo, de su forma y de la densidad del aire que atraviesa. Así, pues, la densidad de la atmósfera a este nivel puede calcularse perfectamente. Los satélites han proporcionado al hombre las primeras mediciones directas de la densidad de la atmósfera superior, la cual es mayor de lo que se había pensado; pero a una altura de 240 km, por ejemplo, es sólo una diezmillonésima de la que se encuentra a nivel del mar, y, a 362 km, sólo de una trillónésima.

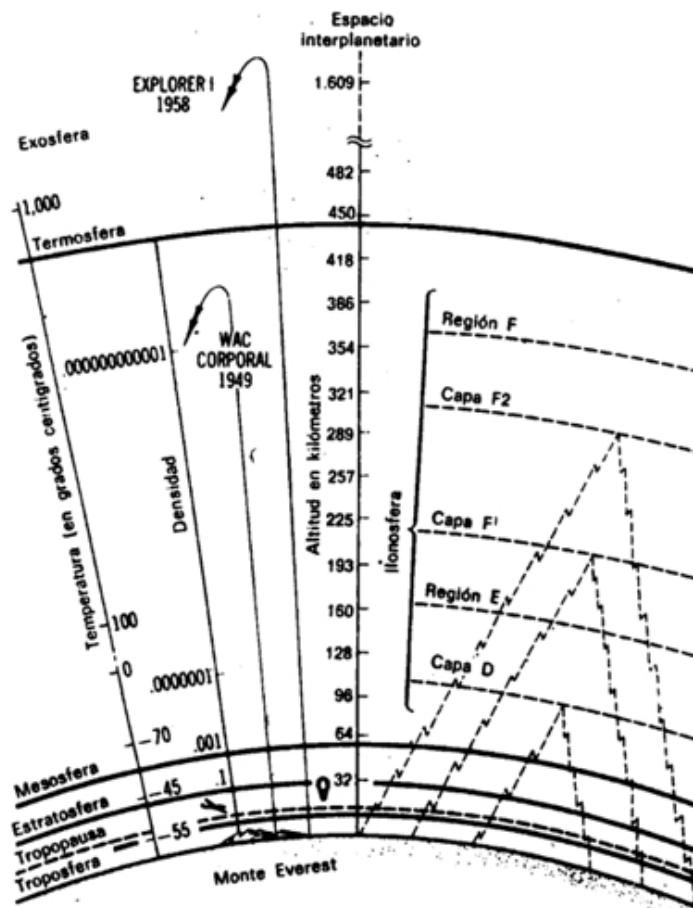
Sin embargo, estos jirones de aire no deben ser despreciados a la ligera. Incluso a 1.600 km de altura, donde la densidad atmosférica es sólo de una cuatrillónésima parte de la que se encuentra a nivel del mar, el ligero soplo de aire es mil millones de veces más denso que los gases que se encuentran en el propio espacio exterior. La envoltura de gases que rodea la Tierra se extiende mucho más allá.

Desde luego, la Unión Soviética no permaneció sola en este campo. Al cabo de cuatro meses se le incorporaron los Estados Unidos, que pusieron en órbita su primer satélite, el *Explorer I*, el 30 de enero de 1958. Desde entonces, ambas naciones han lanzado centenares de satélites que han puesto en órbita en torno a la Tierra con muy diversos fines. Mediante los instrumentos incorporados a dichos satélites se ha explorado la atmósfera superior y la porción de espacio en la vecindad del globo terráqueo; la propia Tierra ha sido objeto de minuciosos estudios. Para comenzar, el satélite hizo posible por vez primera contemplar a nuestro planeta (o, al menos, una mitad primero y la otra después) como una unidad, a la vez que permitió el estudio de las corrientes aéreas en su conjunto.

El 1º de abril de 1960, los Estados Unidos lanzaron el primer satélite «observador del tiempo», el *Tiros I* (*Tiros* es la sigla de «*Television Infra-Red Observation Satellite*») y, seguidamente (en noviembre) el *Tiros II*, que, durante diez semanas, envió 20.000 fotografías de la superficie terrestre y su techo nuboso, incluyendo algunas de un ciclón en Nueva Zelanda y un conglomerado de nubes sobre Oklahoma que, aparentemente, engendraba tornados. El *Tiros III*, lanzado en julio de 1961, fotografió dieciocho tormentas tropicales, y en septiembre mostró la formación del huracán *Esther* en el Caribe, dos días antes que fuera localizado con

métodos más convencionales. El satélite *Nimbus I*, bastante más sensible, lanzado el 28 de agosto de 1964, envió fotografías de nubes tomadas durante la noche. Hacia fines de los años 1960, las estaciones meteorológicas utilizaron ya con regularidad, para hacer sus predicciones, los datos transmitidos por satélites.

Entretanto se perfeccionaron también otras aplicaciones de los satélites relacionadas con la Tierra. En 1945, Arthur C. Clarke, escritor británico de ciencia-ficción, había sugerido ya que se utilizaran los satélites como relés para retransmitir mensajes radiofónicos como otros tantos puentes entre continentes y océanos; aseguraba que tres de esos satélites emplazados estratégicamente, bastarían para enlazar el mundo entero. Lo que entonces parecía una visión disparatada se hizo realidad quince años después. El 12 de agosto de 1960, los Estados Unidos lanzaron el *Echo I*, un globo de sutil poliéster, revestido de aluminio, que se inflaba en el espacio hasta alcanzar un diámetro de 30 m y actuaba como reflector pasivo de las radioondas. Entre los forjadores de tan afortunado proyecto figuró John Robinson Pierce, de los «Bell Telephone Laboratories», que también había escrito obras de ciencia-ficción firmadas con un seudónimo.



*Perfil de la atmósfera. Las líneas quebradas indican la reflexión de las señales de radio a partir de las capas Kennelly-Heaviside y Appleton, de la ionosfera. La densidad del aire disminuye con la altura y se expresa en porcentajes de la presión barométrica al nivel del mar.*

El 10 de julio de 1962 fue lanzado el *Telstar I*, otro satélite estadounidense, el cual hizo algo más que reflejar ondas. Las recibió y amplificó, para retransmitirlas seguidamente. Gracias al *Telstar*, los programas de televisión cruzaron los océanos por vez primera (aunque, desde luego, el nuevo ingenio no pudo mejorar su calidad). El 26 de julio de 1963 se lanzó el *Syncom II*, satélite que orbitaba la superficie terrestre a una distancia de 35.880 km. Su período orbital era de 24 horas exactas, de modo que «flotaba» fijamente sobre el océano Atlántico, sincronizado con la Tierra. El *Syncom III*, «colocado» sobre el Océano Índico y con idéntica sincronización, retransmitió a los Estados Unidos, en octubre de 1964, la Olimpiada del Japón.

El 6 de abril de 1965 se lanzó otro satélite de comunicaciones más complejo aún: el *Early Bird*, que permitió el funcionamiento de 240 circuitos radiofónicos y un canal de televisión. (Durante dicho año, la Unión Soviética empezó a lanzar también satélites de comunicación.) Ya se ha ideado una programación mucho más amplia para la década de 1970-1980, con lo cual la Tierra parece en camino de convertirse en «un mundo íntegro» por cuanto se refiere a comunicaciones.

Se han lanzado asimismo satélites con la finalidad específica de determinar la posición sobre la Tierra. El primero de estos satélites, el *Transit 1B*, fue lanzado el 13 de abril de 1960.

### Gases del Aire

Hasta los tiempos modernos se consideraba el aire como una sustancia simple y homogénea. A principios del siglo XVII, el químico flamenco Jan Baptista van Helmont empezó a sospechar que existía cierto número de gases químicamente diferenciados. Así, estudió el vapor desprendido por la fermentación de los zumos de fruta (anhídrido carbónico) y lo reconoció como una nueva sustancia. De hecho, Van Helmont fue el primero en emplear el término «gas», voz que se supone acuñada a partir de «caos», que empleaban los antiguos para designar la sustancia original de la que se originó el Universo-. En 1756, el químico escocés Joseph Black estudió detenidamente el anhídrido carbónico y llegó a la conclusión que se trataba de un gas distinto del aire. Incluso demostró que en el aire había pequeñas cantidades del mismo. Diez años más tarde, Henry Cavendish estudió un gas inflamable que no se encontraba en la atmósfera. Fue denominado hidrógeno. De este modo se demostraba claramente la multiplicidad de los gases.

El primero en darse cuenta que el aire era una mezcla de gases fue el químico francés Antoine-Laurent Lavoisier. Durante unos experimentos realizados en la década de 1770, calentó mercurio en una retorta y descubrió que este metal, combinado con aire, formaba un polvo rojo (óxido de mercurio), pero cuatro quintas partes del aire permanecían en forma de gas. Por más que aumentó el calor, no hubo modo que se consumiese el gas residual. Ahora bien, en éste no podía arder una vela ni vivir un ratón.

Según Lavoisier, el aire estaba formado por dos gases. La quinta parte, que se combinaba con el mercurio en su experimento, era la porción de aire que sostenía la vida y la combustión, y a la que dio el nombre de «oxígeno». A la parte restante la denominó «ázoe», voz que, en griego, significa «sin vida». Más tarde se llamó «nitrógeno», dado que dicha sustancia estaba presente en el nitrato de sodio, llamado comúnmente «nitro». Ambos gases, habían sido descubiertos en la década anterior: el nitrógeno, en 1772, por el físico escocés Daniel Rutherford, y el oxígeno, en 1774, por el ministro unitario inglés Joseph Priestley.

A mediados del siglo XIX, el químico francés Henri-Victor Regnault analizó muestras de aire de todo el Planeta y descubrió que la composición del mismo era idéntica en todas partes. El contenido en oxígeno representaba el 20,9 %, y se presumía que el resto (a excepción de indicios de anhídrido carbónico) era nitrógeno.

Comparativamente, el nitrógeno es un gas inerte, o sea, que se combina rápidamente con otras sustancias. Sin embargo, puede ser forzado a combinarse, por ejemplo, calentándolo con metal de magnesio, lo cual da nitruro de magnesio, sólido. Años después del descubrimiento de Lavoisier, Henry Cavendish intentó consumir la totalidad del nitrógeno combinándolo con oxígeno, bajo la acción de una chispa eléctrica. No tuvo éxito. Hiciera lo que hiciese, no podía liberarse de una pequeña burbuja de gas residual, que representaba menos del 1 % del volumen original. Cavendish pensó que éste podría ser un gas desconocido, incluso más inerte que el nitrógeno. Pero como no abundan los Cavendish, el rompecabezas permaneció como tal largo tiempo, sin que nadie intentara solucionarlo, de modo que la naturaleza de este aire residual no fue descubierta hasta un siglo más tarde.

En 1882, el físico británico John W. Strutt (Lord Rayleigh) comparó la densidad del nitrógeno obtenido a partir del aire con la densidad del nitrógeno obtenido a partir de ciertos productos químicos, y descubrió, con gran sorpresa, que el nitrógeno del aire era definitivamente más denso. ¿Se debía esto a que el gas obtenido a partir del aire no era puro, sino que contenía pequeñas cantidades de otro más pesado? Un químico escocés, Sir William Ramsay, ayudó a Lord Rayleigh a seguir investigando la cuestión. Por aquel entonces contaban ya, con la ayuda de la espectroscopía. Al calentar el pequeño residuo de gas que quedaba tras la combustión del nitrógeno y examinarlo al espectroscopio, encontraron una nueva

serie de líneas brillantes, líneas que no pertenecían a ningún elemento conocido. Este nuevo y muy inerte elemento recibió el nombre de «argón» (del término griego que significa «inerte»).

El argón suponía casi la totalidad del 1 % del gas desconocido contenido en el aire. Pero seguían existiendo en la atmósfera diversos componentes, cada uno de los cuales constituía sólo algunas partes por millón. Durante la década de 1890, Ramsay descubrió otros cuatro gases inertes: «neón» (nuevo), «criptón» (escondido), «xenón» (extranjero) y «helio», gas este último cuya existencia en el Sol se había descubierto unos 30 años antes.

En décadas recientes, el espectroscopio de rayos infrarrojos ha permitido descubrir otros tres: el óxido nitroso («gas hilarante»), cuyo origen se desconoce; el metano, producto de la descomposición de la materia orgánica y el monóxido de carbono. El metano es liberado por los pantanos, y se ha calculado que cada año se incorporan a la atmósfera unos 45 millones de toneladas de dicho gas, procedente de los gases intestinales de los grandes animales. El monóxido de carbono es, probablemente, de origen humano, resultante de la combustión incompleta de la madera, carbón, gasolina, etc.

Desde luego, todo esto se refiere a la composición de las capas más bajas de la atmósfera. ¿Qué sucede en la estratosfera? Teisserenc de Bort creía que el helio y el hidrógeno podrían existir allí en determinada cantidad, flotando sobre los gases más pesados subyacentes. Estaba en un error. A mediados de la década de 1930, los tripulantes de globos rusos trajeron de la estratosfera superior muestras de aire demostrativas que estaba constituida por oxígeno y nitrógeno en la misma proporción de 1 a 4 que se encuentra en la troposfera.

Pero había razones para creer que en la atmósfera superior existían algunos gases poco corrientes, y una de tales razones era el fenómeno llamado «claridad nocturna». Se trata de una débil iluminación general de todo el cielo nocturno, incluso en ausencia de la Luna. La luz total de la claridad nocturna es mucho mayor que la de las estrellas, pero tan difusa que no puede apreciarse, excepto con los instrumentos fotodetectores empleados por los astrónomos.

La fuente de esta luz había sido un misterio durante muchos años. En 1928, el astrónomo V. M. Slipher consiguió detectar en la claridad nocturna algunas líneas

espectrales, que habían sido ya encontradas en las nebulosas por William Huggins en 1864 y que se pensaba podían representar un elemento poco común, denominado «nebulio». En 1927, y en experimentos de laboratorio, el astrónomo americano Ira Sprague Bowen demostró que las líneas provenían del «oxígeno atómico», es decir, oxígeno que existía en forma de átomos aislados y que no estaba combinado en la forma normal como molécula de dos átomos. Del mismo modo, se descubrió que otras extrañas líneas espectrales de la aurora representaban nitrógeno atómico. Tanto el oxígeno atómico como el nitrógeno atómico de la atmósfera superior son producidos por la radiación solar, de elevada energía, que escinde las moléculas en átomos simples, lo cual fue sugerido ya, en 1931, por Sydney Chapman. Afortunadamente, esta radiación de alta energía es absorbida o debilitada antes que llegue a la atmósfera inferior.

Por tanto, la claridad nocturna, según Chapman, proviene de la nueva unión, durante la noche, de los átomos separados durante el día por la energía solar. Al volverse a unir, los átomos liberan parte de la energía que han absorbido en la división, de tal modo que la claridad nocturna es una especie de renovada emisión de luz solar, retrasada y muy débil, en una forma nueva y especial. Los experimentos realizados con cohetes en la década de 1950 suministraron pruebas directas que esto ocurre así. Los espectroscopios que llevaban los cohetes registraron las líneas verdes del oxígeno atómico con mayor intensidad a 96 km de altura. Sólo una pequeña proporción de nitrógeno se encontraba en forma atómica, debido a que las moléculas de este gas se mantienen unidas más fuertemente que las del oxígeno; aun así, la luz roja del nitrógeno atómico seguía siendo intensa a 144 km de altura.

Slipher había encontrado también en la claridad nocturna líneas sospechosamente parecidas a las que emitía el sodio. La presencia de éste pareció tan improbable, que se descartó el asunto como algo enojoso. ¿Qué podía hacer el sodio en la atmósfera superior? Después de todo no es un gas, sino un metal muy reactivo, que no se encuentra aislado en ningún lugar de la Tierra. Siempre está combinado con otros elementos, la mayor parte de las veces, en forma de cloruro de sodio (sal común). Pero en 1938, los científicos franceses establecieron que las líneas en cuestión eran, sin lugar a dudas, idénticas a las de sodio. Fuera o no probable, tenía

que haber sodio en la atmósfera superior. Los experimentos realizados nuevamente con cohetes dieron la clave para la solución: sus espectroscopios registraron inconfundiblemente la luz amarilla del sodio, y con mucha más fuerza, a unos 88 km de altura. De dónde proviene este sodio, sigue siendo un misterio; puede proceder de la neblina formada por el agua del océano o quizás de meteoros vaporizados. Más sorprendente aún fue el descubrimiento, en 1958, que el litio, un parente muy raro del sodio, contribuía a la claridad nocturna.

En 1956, un equipo de científicos norteamericanos, bajo la dirección de Murray Zelikov, produjo una claridad nocturna artificial. Dispararon un cohete que, a 96 km de altura, liberó una nube de gas de óxido nítrico, el cual aceleró la nueva combinación de átomos de oxígeno en la parte superior de la atmósfera. Observadores situados en tierra pudieron ver fácilmente el brillo que resultaba de ello. También tuvo éxito un experimento similar realizado con vapor de sodio: originó un resplandor amarillo claramente visible. Cuando los científicos soviéticos lanzaron hacia nuestro satélite el *Lunik III*, en octubre de 1959, dispusieron las cosas de forma que expulsara una nube de vapor de sodio como señal visible que había alcanzado su órbita.

A niveles más bajos de la atmósfera, el oxígeno atómico desaparece, pero la radiación solar sigue teniendo la suficiente energía como para formar la variedad de oxígeno triatómico llamada «ozono». La concentración de ozono alcanza su nivel más elevado a 24 km de altura. Incluso aquí, en lo que se llama «ozonosfera» (descubierta, en 1913, por el físico francés Charles Fabry), constituye sólo una parte en 4 millones de aire, cantidad suficiente para absorber la luz ultravioleta y proteger así la vida en la tierra. Cerca de la superficie de ésta, su concentración es muy baja, si bien puede ser lo suficientemente elevada como para formar un componente irritante.

Otros experimentos realizados con cohetes demostraron que no eran erróneas las especulaciones de Teisserenc de Bort respecto a las capas de helio e hidrógeno; simplemente Bort las había situado de una manera equivocada. Desde los 320 hasta los 965 km de altura, donde la atmósfera se atenúa y se acerca al vacío, hay una capa de helio, llamada hoy «heliosfera». En 1961, el físico belga Marcel Nicolet dedujo la existencia de dicha capa al observar la resistencia que oponía al

rozamiento el satélite *Echo 1*. Así lo confirmó el *Explorer XVII* (lanzado el 2 de abril de 1963), que realizó un completo análisis del sutil gas circundante.

Sobre la heliosfera hay otra capa, más tenue aún, de hidrógeno, la «protonosfera», que tal vez se extienda unos 64.000 km hacia arriba, antes de diluirse en la densidad general del espacio interplanetario.

Las altas temperaturas y las radiaciones de elevada energía pueden hacer algo más que forzar a los átomos a separarse o a formar nuevas combinaciones. Pueden sustraer los electrones y, de este modo, «ionizarlos». Lo que resta del átomo se denomina «ion», y difiere de los átomos normales en que se halla cargado eléctricamente. La voz «ion», que procede del griego, significa «viajero». Su origen proviene del hecho que cuando una corriente eléctrica pasa a través de una solución que contiene iones, los cargados positivamente se desplazan en una dirección contraria a los de carga negativa.

Un joven estudiante de Química sueco, Svante August Arrhenius, fue el primero en sugerir que los iones eran átomos cargados, lo cual explicaría el comportamiento de ciertas soluciones conductoras de corriente eléctrica. Sus teorías, expuestas, en 1884, en su tesis doctoral de Ciencias, eran tan revolucionarias, que el tribunal examinador mostró cierta reticencia a la hora de concederle el título. Aún no se habían descubierto las partículas cargadas en el interior del átomo, por lo cual parecía ridículo el concepto de un átomo cargado eléctricamente. Arrhenius consiguió su doctorado, pero con una calificación mínima.

Cuando se descubrió el electrón, a últimos de la década de 1890, la teoría de Arrhenius adquirió de pronto un sentido sorprendente. En 1903 fue galardonado con el premio Nobel de Química por la misma tesis que 19 años antes casi le costara su doctorado. (Debo admitir que esto parece el guión de una película, pero la historia de la Ciencia contiene muchos episodios que harían considerar a los guionistas de Hollywood como faltos de imaginación.)

El descubrimiento de iones en la atmósfera no volvió al primer plano hasta después que Guillermo Marconi iniciara sus experimentos de telegrafía sin hilos. Cuando, el 12 de diciembre de 1901, envió señales desde Cornualles a Terranova, a través de 3.378 km del océano Atlántico, los científicos se quedaron estupefactos. Las ondas

de radio viajan sólo en línea recta. ¿Cómo podían haber superado, pues, la curvatura de la Tierra, para llegar hasta Terranova?

Un físico británico, Oliver Heaviside, y un ingeniero electrónico americano, Arthur Adwin Kennelly, sugirieron, poco después, que las señales de radio podían haber sido reflejadas por una capa de partículas cargadas que se encontrase en la atmósfera, a gran altura. La «capa Kennelly-Heaviside», como se llama desde entonces, fue localizada, finalmente, en la década de 1920. La descubrió el físico británico Edward Victor Appleton, cuando estudiaba el curioso fenómeno del amortiguamiento (*fading*) de la transmisión radiofónica, y llegó a la conclusión que tal amortiguamiento era el resultado de la interferencia entre dos versiones de la misma señal, la que iba directamente del transmisor al receptor y la que seguía a ésta después de su reflexión en la atmósfera superior. La onda retrasada se hallaba desfasada respecto a la primera, de modo que ambas se anulaban parcialmente entre si; de aquí al amortiguamiento.

Partiendo de esta base resultaba fácil determinar la altura de la capa reflectante. Todo lo que se había de hacer era enviar señales de una longitud de onda tal que las directas anulasen por completo a las reflejadas, es decir, que ambas señales llegasen en fases contrapuestas. Partiendo de la longitud de onda de la señal empleada y de la velocidad conocida de las ondas de radio, pudo calcular la diferencia en las distancias que habían recorrido los dos trenes de ondas. De este modo determinó que la capa Kennelly-Heaviside estaba situada a unos 104 km de altura.

El amortiguamiento de las señales de radio solía producirse durante la noche. Appleton descubrió que, poco antes del amanecer, las ondas de radio eran reflejadas por la capa Kennelly-Heaviside sólo a partir de capas situadas a mayores alturas (denominadas hoy, a veces, «capas Appleton») que empezaban a los 225 km de altura.

Por todos estos descubrimientos, Appleton recibió, en 1947, el premio Nobel de Física. Había definido la importante región de la atmósfera llamada «ionosfera», término introducido, en 1930, por el físico escocés Robert Alexander Watson-Watt. Incluye la mesosfera y la termosfera, y hoy se la considera dividida en cierto número de capas. Desde la estratopausa hasta los 104 km de altura

aproximadamente se encuentra la «región D». Por encima de ésta se halla la capa Kennelly-Heaviside, llamada «capa D». Sobre la capa D, hasta una altura de 235 km, tenemos la «región E», un área intermedia relativamente pobre en iones, la cual va seguida por las capas de Appleton: la «capa F<sub>1</sub>», a 235 km, y la «capa F<sub>2</sub>», a, 321 km. La capa F<sub>1</sub> es la más rica en iones, mientras que la F<sub>2</sub> es significativamente intensa durante el día. Por encima de estos estratos se halla la «región F».

Estas capas reflejan y absorben sólo las ondas largas de radio empleadas en las emisiones normales. Las más cortas, como las utilizadas en televisión, pasan, en su mayor parte, a través de las mismas. Ésta es la causa que queden limitadas, en su alcance, las emisiones de televisión, limitación que puede remediararse gracias a las estaciones repetidoras situadas en satélites como el *Early Bird* (o *Pájaro del Alba*), lanzado en 1965, el cual permite que los programas de televisión atraviesen océanos y continentes. Las ondas de radio procedentes del espacio (por ejemplo, de las estrellas) pasan también a través de la ionosfera; y podemos decir que, por fortuna, pues, de lo contrario no existiría la Radioastronomía.

La ionosfera tiene mayor potencia al atardecer, después del efecto ejercido por las radiaciones solares durante todo el día, para debilitarse al amanecer, lo cual se debe a que han vuelto a unirse muchos iones y electrones. Las tormentas solares, al intensificar las corrientes de partículas y las radiaciones de alta energía que llegan a la tierra, determinan un mayor grado de ionización en las capas, a la vez que dan más espesor a las mismas. Las regiones situadas sobre la ionosfera se iluminan también cuando originan las auroras. Durante estas tormentas eléctricas queda interrumpida la transmisión de las ondas de radio a larga distancia, y en ocasiones, desaparecen totalmente.

La ionosfera ha resultado ser sólo uno de los cinturones de radiación que rodea la Tierra. Más allá de la atmósfera, en lo que antes se consideraba espacio «vacío», los satélites artificiales mostraron algo sorprendente en 1958. Mas, para entenderlo, hagamos antes una incursión en el tema del magnetismo.

## Imanes

Los imanes (magnetos) recibieron su nombre de la antigua ciudad griega de Magnesia, cerca de la cual se descubrieron las primeras «piedras-imán». La piedra-imán (magnetita) es un óxido de hierro que tiene propiedades magnéticas naturales. Según la tradición. Tales de Mileto, hacia el 550 a. de J .C. fue el primer filósofo que lo describió.

Los imanes se convirtieron en algo más que una simple curiosidad cuando se descubrió qué una aguja, al entrar en contacto con una piedra-imán, quedaba magnetizada, y que si se permitía que la aguja pivotase libremente en un plano horizontal, señalaba siempre la línea Norte-Sur. Desde luego, la aguja era de gran utilidad para los marinos; tanto, que se hizo indispensable para la navegación oceánica, a pesar que los polinesios se las arreglaban para cruzar el Pacífico sin necesidad de brújula.

No se sabe quién fue el primero en colocar una aguja magnetizada sobre un pivote y encerrarla en una caja, para obtener la brújula. Se supone que fueron los chinos, quienes lo transmitieron a los árabes, los cuales, a su vez, lo introdujeron en Europa. Esto es muy dudoso, y puede ser sólo una leyenda. Sea como fuere, en el siglo XII la brújula fue introducida en Europa y descrita con detalle, en 1269, por un estudiante francés más conocido por el nombre latinizado de Petrus Peregrinus, el cual llamó «polo Norte» al extremo de la aguja imantada que apuntaba al Norte, y «polo Sur al extremo opuesto.

Como es natural, la gente especulaba acerca del motivo por el que apuntaba al Norte una aguja magnetizada. Como quiera que se conocía el hecho que los imanes se atraían entre sí, algunos pensaron que debía de existir una gigantesca montaña magnética en el polo Norte, hacia el que apuntaba la aguja. Otros fueron más románticos y otorgaron a los imanes un «alma» y una especie de vida.

El estudio científico de los imanes inicióse con William Gilbert, médico de la Corte de Isabel I de Inglaterra. Fue éste quien descubrió que la Tierra era, en realidad, un gigantesco imán. Gilbert montó una aguja magnetizada de modo que pudiese pivotar libremente en dirección vertical (una «brújula de inclinación»), y su polo Norte señaló entonces hacia el suelo («inclinación magnética»). Usando un imán esférico como un modelo de la Tierra, descubrió que la aguja se comportaba del

mismo modo cuando era colocada sobre el «hemisferio Norte» de su esfera. En 1600, Gilbert publicó estos descubrimientos en su clásica obra *De Magnete*.

En los tres siglos y medio que han transcurrido desde los trabajos de Gilbert, nadie ha conseguido explicar el magnetismo de la Tierra de forma satisfactoria para todos los especialistas. Durante largo tiempo, los científicos especularon con la posibilidad que la Tierra pudiese tener como núcleo un gigantesco imán de hierro. A pesar de que, en efecto, se descubrió que nuestro planeta tenía un núcleo de hierro, hoy sabemos que tal núcleo no puede ser un imán, puesto que el hierro, cuando se calienta hasta los 760º C, pierde sus grandes propiedades magnéticas, y la temperatura del núcleo de la Tierra debe de ser, por lo menos, de 1.000º C.

La temperatura a la que una sustancia pierde su magnetismo se llama «temperatura Curie», en honor a Pierre Curie, que descubrió este fenómeno en 1895. El cobalto y el níquel, que en muchos aspectos se parecen sensiblemente al hierro, son también ferromagnéticos. La temperatura Curie para el níquel es de 356º C; para el cobalto, de 1.075º C. A temperaturas bajas son también ferromagnéticos otros metales. Por ejemplo, lo es el disprosio a -188º C.

En general, el magnetismo es una propiedad inherente del átomo, aunque en la mayor parte de los materiales los pequeños imanes atómicos están orientados al azar, de modo que resulta anulado casi todo el efecto. Aún así, revelan a menudo ligeras propiedades magnéticas, cuyo resultado es el «paramagnetismo». La fuerza del magnetismo se expresa en términos de «permeabilidad». La permeabilidad en el vacío es de 1,00, y la de las sustancias paramagnéticas está situada entre 1,00 y 1,01.

Las sustancias ferromagnéticas tienen permeabilidad mucho más altas. La del níquel es de 40; la del cobalto, de 55, y la del hierro, de varios miles. En 1907, el físico francés Pierre Weiss postuló la existencia de «regiones» en tales sustancias, se trata de pequeñas áreas, de 0,001 a 0,1 cm de diámetro (que han sido detectados), en la cual los imanes atómicos están dispuestos de tal forma que sus efectos se suman, lo cual determina fuertes campos magnéticos exteriores en el seno de la región. En el hierro normal no magnetizado, las regiones están orientadas al azar y anulan los efectos de las demás. Cuando las regiones quedan alineadas por la acción de otro imán, se magnetiza el hierro. La reorientación de regiones durante el magnetismo

da unos sonidos sibilantes y de «clic», que pueden ser detectados por medio de amplificadores adecuados, lo cual se denomina «efecto Barkhausen», en honor a su descubridor, el físico alemán Heinrich Barkhausen. En las «sustancias antiferromagnéticas», como el manganeso, las regiones se alinean también, pero en direcciones alternas, de modo que se anula la mayor parte del magnetismo. Por encima de una determinada temperatura, las sustancias pierden su antiferromagnetismo y se convierten en paramagnéticas.

Si el núcleo de hierro de la Tierra no constituye, en sí mismo, un imán permanente, por haber sido sobrepasada su temperatura Curie, debe de haber otro modo de explicar la propiedad que tiene la Tierra de afectar la situación de los extremos de la aguja. La posible causa fue descubierta gracias a los trabajos del científico inglés Michael Faraday, quien comprobó la relación que existe entre el magnetismo y la electricidad.

En la década de 1820 Faraday comenzó un experimento que; había descrito por vez primera Petrus Peregrinus, y que aún sigue atrayendo a los jóvenes estudiantes de Física-. Consiste en esparcir finas limaduras de hierro sobre una hoja de papel situada encima de un imán y golpear suavemente el papel. Las limaduras tienden a alinearse alrededor de unos arcos que van del polo norte al polo sur del imán. Según Faraday, estas «líneas magnéticas de fuerza» forman un «campo» magnético.

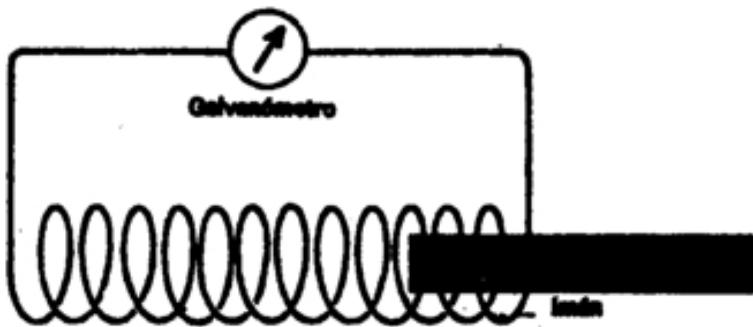
Faraday, que sintióse atraído por el tema del magnetismo al conocer las observaciones hechas, en 1820, por el físico danés Hans Christian Oersted, según las cuales una corriente eléctrica que atravesase un cable desvía la aguja de una brújula situada en su proximidad, llegó a la conclusión que la corriente debía de formar líneas magnéticas de fuerza en torno al cable.

Estuvo aún más seguro de ello al comprobar que el físico francés André-Marie Ampère había proseguido los estudios sobre los cables conductores de electricidad inmediatamente después del descubrimiento de Oersted. Ampère demostró que dos cables paralelos, por los cuales circulara la corriente en la misma dirección, se atraían. En cambio, se repelían cuando las corrientes circulaban en direcciones opuestas. Ello era muy similar a la forma en que se repelían dos polos norte magnéticos (o dos polos sur magnéticos), mientras que un polo norte magnético

atraía a un polo sur magnético. Más aún, Ampère demostró que una bobina cilíndrica de cable atravesada por una corriente eléctrica, se comportaba como una barra imantada. En 1881, y en honor a él, la unidad de intensidad de una corriente eléctrica fue denominada, oficialmente, «amperio».

Pero si todo esto ocurría así, pensó Faraday (quien tuvo una de las intuiciones más positivas en la historia de la Ciencia), y si la electricidad puede establecer un campo magnético tan parecido a uno real, que los cables que transportan una corriente eléctrica pueden actuar como imanes, ¿no sería también cierto el caso inverso? ¿No debería un imán crear una corriente de electricidad que fuese similar a la producida por pilas?

En 1831, Faraday realizó un experimento que cambiaría la historia del hombre. Enrolló una bobina de cable en torno a un segmento de un anillo de hierro, y una segunda bobina, alrededor de otro segmento del anillo. Luego conectó la primera a una batería. Su razonamiento era que si enviaba una corriente a través de la primera bobina, crearía líneas magnéticas de fuerza, que se concentrarían en el anillo de hierro, magnetismo inducido que produciría, a su vez, una corriente en la segunda bobina. Para detectarla conectó la segunda bobina a un galvanómetro, instrumento para medir corrientes eléctricas, que había sido diseñado, en 1820, por el físico alemán Johann Salomo Christoph Schweigger.

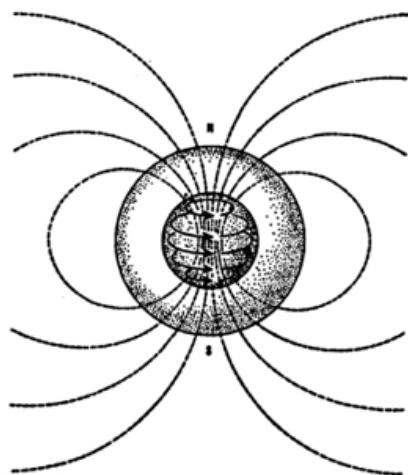


*Un experimento de Faraday, sobre la inducción de la electricidad. Cuando el imán es movido hacia el interior de la bobina de alambre o se retira de ella, la intercepción de sus líneas de fuerza por el alambre da lugar a una corriente eléctrica en la bobina.*

El experimento no se desarrolló tal como había imaginado Faraday. El flujo de corriente en la primera bobina no generó nada en la segunda. Pero Faraday observó que, en el momento en que conectaba la corriente, la aguja del galvanómetro se movía lentamente, y hacia lo mismo aunque en dirección opuesta, cuando cortaba la corriente. Enseguida comprendió que lo que creaba la corriente era el movimiento de las líneas magnéticas de fuerza a través del cable, y no el magnetismo propiamente dicho. Cuando una corriente empezaba a atravesar la primera bobina, se iniciaba un campo magnético que, a medida que se extendía, cruzaba la segunda bobina, en la cual producía una corriente eléctrica momentánea. A la inversa, cuando se cortaba la corriente de la batería, las líneas, a punto de extinguirse, de la fuerza magnética, quedaban suspendidas de nuevo en el cable de la segunda bobina, lo cual determinaba un flujo momentáneo de electricidad en dirección opuesta a la del primero.

De este modo, Faraday descubrió el principio de la inducción eléctrica y creó el primer «transformador». Procedió a demostrar el fenómeno de una forma más clara, para lo cual empleó un imán permanente, que introducía una y otra vez en el interior de una bobina de cable, para sacarlo luego del mismo; pese a que no existía fuente alguna de electricidad, se establecía corriente siempre que las líneas de fuerza del imán atravesaban el cable.

Los descubrimientos de Faraday condujeron directamente no sólo en la creación de la dinamo para generar electricidad, sino que también dieron base a la teoría «electromagnética» de James Clerk Maxwell, la cual agrupaba la luz y otras formas de radiación, tales como la radio-eléctrica, en una sola familia de «radiaciones electromagnéticas».



*Teoría de Elsasser de la generación del campo magnético de la Tierra. Los movimientos de materia en el núcleo fundido de níquel-hierro dan lugar a corrientes eléctricas, las cuales a su vez generan líneas de fuerza magnéticas. Las líneas punteadas muestran el campo magnético de la Tierra.*

La estrecha relación entre el magnetismo y la electricidad ofrece una posible explicación al magnetismo de la Tierra. La brújula ha puesto de relieve sus líneas de fuerza magnéticas, que van desde el «polo Norte magnético», localizado al norte del Canadá, hasta el «polo Sur magnético», situado en el borde de la Antártica, cada uno de ellos a unos 15º de latitud de los polos geográficos. (El campo magnético de la Tierra ha sido detectado a grandes alturas por cohetes provistos de «magnetómetros») Según la nueva teoría, el magnetismo de la Tierra puede originarse en el flujo de corrientes eléctricas situadas profundamente en su interior. El físico Walter Maurice Elsasser ha sugerido que la rotación de la Tierra crea lentes remolinos, que giran de Oeste a Este, en el núcleo de hierro fundido. Estos remolinos generan una corriente eléctrica que, como ellos, circula de Oeste a Este. Del mismo modo que la bobina de cable de Faraday producía líneas magnéticas de fuerza en su interior, la corriente eléctrica circulante lo hace en el núcleo de la Tierra. Por tanto, crea el equivalente de un imán interno, que se extiende hacia el Norte y al Sur. A su vez, este imán es responsable del campo magnético general de la Tierra, orientado, aproximadamente, a lo largo de su eje de rotación, de modo que los polos magnéticos están situados muy cerca de los polos geográficos Norte y Sur.

El Sol posee también un campo magnético general, dos o tres veces más intenso que el de la Tierra, así como campos locales, aparentemente relacionados con las manchas solares, que son miles de veces más intensos. El estudio de estos campos, que ha sido posible gracias a que el intenso magnetismo afecta a la longitud de onda de la luz emitida, sugiere que en el interior del Sol existen corrientes circulares de cargas eléctricas.

En realidad hay hechos verdaderamente chocantes en lo que se refiere a las manchas solares, hechos a los cuales se podrá encontrar explicación cuando se conozcan las causas de los campos magnéticos a escala astronómica. Por ejemplo, el número de manchas solares en la superficie aumenta y disminuye en un ciclo de 11 años y medio. Esto lo estableció, en 1843, el astrónomo alemán Heinrich Samuel Schwabe, quien estudió la superficie del Sol casi a diario durante 17 años. Más aún, las manchas solares aparecen sólo en ciertas latitudes, las cuales varían a medida que avanza el ciclo. Las manchas muestran cierta orientación magnética, que se invierte en cada nuevo ciclo. Se desconoce aún la razón de todo ello.

Pero no es necesario examinar el Sol para hallar misterios relacionados con los campos magnéticos. Ya tenemos suficientes problemas aquí en la Tierra. Por ejemplo, ¿por qué los polos magnéticos no coinciden con los geográficos? El polo norte magnético está situado junto a la costa norte del Canadá, a unos 1.600 km del polo Norte geográfico. Del mismo modo, el polo sur magnético se halla cerca de los bordes de la Antártica, al oeste del mar de Ross, también a unos 1.600 km del polo Sur. Es más, los polos magnéticos no están exactamente opuestos el uno al otro en el Globo. Una línea que atravesase nuestro planeta para unirlos (el «eje magnético»), no pasaría a través del centro de la Tierra.

La desviación de la brújula respecto al «Norte verdadero» (o sea la dirección del polo Norte) varía de forma irregular a medida que nos movemos hacia el Este o hacia el Oeste. Así, la brújula cambió de sentido en el primer viaje de Colón, hecho que éste ocultó a su tripulación, para no causar un pánico que lo hubiese obligado a regresar.

Ésta es una de las razones por las que no resulta enteramente satisfactorio el empleo de la brújula para de terminar una dirección. En 1911, el inventor americano Elmer Ambrose Sperry introdujo un método no basado en el magnetismo

para indicar la dirección. Se trata de una rueda, de borde grueso, que gira a gran velocidad (el «giroscopio», que estudió por vez primera Foucault, quien había demostrado la rotación de la Tierra) y que tiende a resistir los cambios en su plano de rotación. Puede utilizarse como una «brújula giroscópica», ya que es capaz de mantener una referencia fija de dirección, lo cual permite guiar las naves o los cohetes.

Pero aunque la brújula magnética es imperfecta, ha prestado un gran servicio durante muchos siglos. Puede establecerse la desviación de la aguja magnética respecto al Norte geográfico. Un siglo después de Colón, en 1581, el inglés Robert Norman preparó el primer mapa que indicaba la dirección actual marcada por la brújula («declinación magnética») en diversas partes del mundo. Las líneas que unían todos los puntos del planeta que mostraban las mismas declinaciones («líneas isogónicas») seguían una trayectoria curvilínea desde el polo norte al polo sur magnéticos.

Por desgracia, tales mapas habían de ser revisados periódicamente, ya que, incluso para un determinado lugar, la declinación magnética cambia con el tiempo. Por ejemplo, la declinación, en Londres, se desvió  $32^{\circ}$  de arco en dos siglos; era de  $8^{\circ}$  Nordeste en el año 1600, y poco a poco se trasladó, en sentido inverso a las agujas del reloj, hasta situarse, en 1800, en los  $24^{\circ}$  Noroeste. Desde entonces se ha desplazado en sentido inverso, y en 1950 era sólo de  $8^{\circ}$  Noroeste.

También la inclinación magnética cambia lentamente con el tiempo para cualquier lugar de la Tierra, y, en consecuencia, debe ser también constantemente revisado el mapa que muestra las líneas de la misma inclinación («líneas isóclinas»). Además, la intensidad del campo magnético de la Tierra aumenta con la latitud, y es tres veces más fuerte cerca de los polos magnéticos que en las regiones ecuatoriales. Esta intensidad se modifica asimismo de forma constante, de modo que deben someterse, a su vez, a una revisión periódica, los mapas de las «líneas isodinámicas».

Tal como ocurre con todo lo referente al campo magnético, varía la intensidad total del campo. Hace ya, bastante tiempo que tal intensidad viene disminuyendo. Desde 1670, el campo ha perdido el 15 % de su potencia absoluta; si esto sigue así, alcanzará el cero alrededor del año 4.000. ¿Y qué sucederá entonces? ¿Seguirá

decreciendo, es decir, invirtiéndose con el polo norte magnético en la Antártica y el polo sur magnético en el Ártico? Planteándolo de otra forma: ¿Es que el campo magnético terrestre disminuye, se invierte y se intensifica, repitiendo periódicamente la misma secuencia?

Un procedimiento para averiguar si puede ser posible tal cosa es el estudio de las rocas volcánicas. Cuando la lava se enfriá, los cristales se alinean de acuerdo con el campo magnético. Nada menos que hacia 1906 el físico francés Bernard Brunhes advirtió ya que algunas rocas se magnetizaban en dirección *opuesta* al campo magnético real de la Tierra. Por aquellas fechas se desestimó tal hallazgo, pero ahora nadie niega su importancia. Las rocas nos lo hacen saber claramente: el campo magnético terrestre se invierte no sólo ahora, sino que lo ha hecho ya varias veces, para ser exactos nueve, a intervalos irregulares durante los últimos cuatro millones de años.

El hallazgo más espectacular a este respecto se efectuó en el fondo oceánico. Como quiera que la roca fundida que sale, sin duda, a través de la Hendidura del Globo, y se desparrama, si uno se mueve hacia el Este o el Oeste de tal Hendidura, pasará por rocas que se han ido solidificando progresivamente hace largo tiempo. Si estudiamos la alineación magnética, advertiremos inversiones de determinadas fajas, que van alejándose de la Hendidura a intervalos cuya duración oscila entre los 50.000 años y los 20 millones de años. Hasta ahora, la única explicación racional de semejante fenómeno consiste en suponer que hay un suelo marino que se desparrama incessantemente y unas inversiones del campo magnético.

Sin embargo, resulta más fácil admitir tales inversiones que averiguar sus causas.

Además de las variaciones del campo magnético a largo plazo, se producen también pequeños cambios durante el día, los cuales sugieren alguna relación con el Sol. Es más, hay «días agitados» en los que la aguja de la brújula salta con una viveza poco usual. Se dice entonces que la Tierra está sometida a una «tormenta magnética». Las tormentas magnéticas son idénticas a las eléctricas, y en general van acompañadas de un aumento en la intensidad de las auroras, observación ésta hecha ya en 1759 por el físico inglés John Canton.

La aurora boreal (término introducido en 1621 por el filósofo francés Pierre Gassendi) es un maravilloso despliegue de inestables y coloreadas corrientes u

ondulaciones de luz, que causan un efecto de esplendor extraterrestre. Su contrapartida en el Antártico recibe el nombre de aurora austral. Las corrientes de la aurora parecen seguir las líneas de fuerza magnética de la Tierra y concentrarse, para hacerse visibles, en los puntos en que las líneas están más juntas, es decir, en los polos magnéticos. Durante las tormentas magnéticas, la aurora boreal puede verse en puntos tan meridionales como Boston y Nueva York.

No fue difícil entender el porqué de la aurora boreal. Una vez descubierta la ionosfera se comprendió que algo, presuntamente, alguna radiación solar de cualquier tipo, comunicaba energía a los átomos en la atmósfera superior y los transformaba en iones cargados eléctricamente. Por la noche, los iones perdían su carga y su energía, esto último se hacía perceptible mediante la luz de la aurora. Era una especie de singular resplandor aéreo, que seguía las líneas magnéticas de fuerza y se concentraba cerca de los polos magnéticos, porque ése era el comportamiento que se esperaba de los iones cargados eléctricamente. (El resplandor aéreo propiamente dicho se debe a los átomos sin carga eléctrica, por lo cual no reaccionan ante el campo magnético.)

Pero, ¿qué decir de los días agitados y las tormentas magnéticas? Una vez más, el dedo de la sospecha apunta hacia el Sol.

La actividad de las manchas solares parece generar tormentas magnéticas. De qué modo un trastorno causado a 150 millones de kilómetros de distancia podía afectar a la Tierra, constituyó un misterio hasta que la aparición del espectrohelioscopio, inventado por el astrónomo George Ellery Hale, aportó una posible respuesta. Este instrumento permite fotografiar el Sol con luz de un determinado color, por ejemplo, la luz roja del hidrógeno. Más aún, muestra los movimientos o cambios que se producen en la superficie solar. Proporciona buenas imágenes de «prominencias» y «fulguraciones solares», que son grandes explosiones de hidrógeno llameante. Fueron observadas por vez primera durante el eclipse de Sol de 1842, visible en Europa a todo lo largo de una línea, y fue el primer eclipse solar observado de una manera sistemática, y científica.

Antes de la invención del espectrohelioscopio sólo podían verse las fulguraciones que surgían en ángulo recto a la dirección de la Tierra. Sin embargo, el espectrohelioscopio permitió ver también las que venían en dirección a nosotros

desde el centro del disco solar: con la luz de hidrógeno, tales llamaradas, ricas en este elemento, aparecían como manchas de luz contra el fondo más oscuro del resto del disco. Se comprobó, que las fulguraciones solares iban seguidas por tormentas magnéticas en la Tierra, sólo cuando la fulguración apuntaba directamente hacia nuestro planeta.

Así, pues, al parecer, las tormentas magnéticas eran el resultado de explosiones de partículas cargadas, principalmente de electrones, disparadas hacia la Tierra por las fulguraciones, a través de 150 millones de kilómetros de espacio. Ya en 1896, el físico noruego Olaf Kristian Birkeland había sugerido tal posibilidad.

No cabía la menor duda de que, aunque se ignorase su procedencia, la Tierra estaba rodeada por un halo de electrones, que se extendía muy lejos en el espacio. Se había descubierto que las ondas de radio generadas por los relámpagos se desplazaban, a través de las líneas de fuerza magnéticas de la Tierra, a grandes alturas. (Estas ondas, llamadas «silbantes» en atención a que eran captadas por los receptores en forma de sonidos de este carácter, habían sido descubiertas accidentalmente por el físico alemán Heinrich Barkhausen durante la Primera Guerra Mundial.) Las ondas de radio no podían seguir las líneas de fuerza, a menos que hubiese electrones.

Sin embargo, no pareció que tales partículas cargadas emergiesen sólo a ráfagas. Sydney Chapman, al estudiar la corona solar, allá por 1931, se mostró cada vez más impresionado al comprobar su extensión. Todo cuanto podíamos ver durante un eclipse total de Sol era su porción más interna. Las concentraciones mensurables de partículas cargadas en la vecindad de la Tierra, pensó, deberían formar parte de la corona. Esto significaba, pues, en cierto modo, que la Tierra giraba alrededor del Sol dentro de la atmósfera externa y extremadamente tenue de nuestro astro. Así, pues, Chapman imaginó que la corona se expandía hacia el espacio exterior y se renovaba incesantemente en la superficie solar, donde las partículas cargadas fluirían continuamente y perturbarían el campo magnético terrestre a su paso por la zona.

Tal sugerencia resultó virtualmente irrefutable en la década de 1950 gracias a los trabajos del astrofísico alemán Ludwig Franz Biermann. Durante medio siglo se había creído que las colas de los cometas, que apuntaban siempre en dirección

contraria al Sol y se alargaban paulatinamente cuanto más se acercaba el cometa al Sol, se formaban a causa de la presión ejercida por la luz solar. Pero, aunque existe tal presión, Biermann demostró que no bastaba para originar la cola cometaria. Ello requería algo más potente y capaz de dar un impulso mucho mayor; y ese algo sólo podían ser las partículas cargadas. El físico americano Eugene Norman Parker abogó también por el flujo constante de partículas, además de las ráfagas adicionales que acompañarían a las fulguraciones solares, y en 1958 dio a tal efecto el nombre de «viento solar». Finalmente, se comprobó la existencia de ese viento solar gracias a los satélites soviéticos *Lunik I* y *Lunik II*, que orbitaron la Luna durante el bienio de 1959-1960, y al ensayo planetario americano del *Mariner II*, que pasó cerca de Venus en 1962.

El viento solar no es un fenómeno local. Todo induce a creer que conserva la densidad suficiente para hacerse perceptible por lo menos hasta la órbita de Saturno. Cerca de la Tierra, las partículas del viento solar llevan una velocidad variable, que puede oscilar entre los 350 y los 700 km/seg. Su existencia representa una pérdida para el Sol, millones de toneladas de materia por segundo; pero aunque esto parezca descomunal a escala humana, constituye una insignificancia a escala solar. Desde su nacimiento, el Sol ha cedido al viento solar sólo una centésima parte del 1 % de su masa.

Es muy posible que el viento solar afecte a la vida diaria del hombre. Aparte de su influencia sobre el campo magnético, las partículas cargadas de la atmósfera superior pueden determinar ulteriores efectos en la evolución meteorológica de la Tierra. Si fuera así, el flujo y reflujo del viento solar podrían constituir elementos adicionales de ayuda para el pronóstico del tiempo.

Los satélites artificiales descubrieron un efecto imprevisto del viento solar. Una de las primeras misiones confiadas a los satélites artificiales fue la de medir la radiación en los niveles superiores de la atmósfera y en el espacio próximo, particularmente la intensidad de los rayos cósmicos (partículas cargadas de energía especialmente elevada). ¿Qué intensidad tiene esta radiación más allá del escudo atmosférico? Los satélites iban provistos de «contadores Geiger», desarrollados, en 1928, por el físico alemán Hans Geiger, los cuales miden de la siguiente forma las partículas radiactivas: el geiger consta de una caja que contiene gas a un voltaje no

lo suficientemente elevado como para desencadenar el paso de una corriente a través de él. Cuando la partícula, de elevada energía, de una radiación, penetra en la caja, convierte en un ion un átomo del gas. Este ion, impulsado por la energía del impacto, incide sobre los átomos vecinos y forma más iones, los cuales, a su vez, chocan con sus vecinos, para seguir el proceso de formación. La lluvia de iones resultante puede transportar una corriente eléctrica, y durante una fracción de segundo fluye una corriente a través del contador. Este impulso eléctrico es enviado a la Tierra telemétricamente. De este modo, el instrumento cuenta las partículas, o flujo de radiación, en el lugar en que éste se ha producido.

Cuando se colocó en órbita, el 31 de enero de 1958, el primer satélite americano, el *Explorer I*, su contador detectó aproximadamente las esperadas concentraciones de partículas a alturas de varios centenares de kilómetros. Pero a mayores alturas, el *Explorer I* llegó hasta los 2.000 km, descendió el número de partículas detectadas, número que, en ocasiones, llegó hasta cero. Creyóse que esto se debería a algún fallo del contador. Posteriormente se comprobó que no ocurrió esto, pues el *Explorer III*, lanzado el 26 de marzo de 1958, y con un apogeo de 3.378 km, registró el mismo fenómeno. Igualmente sucedió con el satélite soviético *Sputnik III*, lanzado el 15 de mayo de 1958.

James A. van Allen, de la Universidad de Iowa, director del programa de radiación cósmica, y sus colaboradores sugirieron una posible explicación. Según ellos, si el recuento de partículas radiactivas descendía virtualmente a cero, no era debido a que hubiese poca o ninguna radiación, sino, por el contrario, a que había demasiada. El instrumento no podía detectar todas las partículas que entraban en el mismo y, en consecuencia, dejaba de funcionar. (El fenómeno sería análogo a la ceguera momentánea del ojo humano ante una luz excesivamente brillante.)

El *Explorer IV*, lanzado el 26 de julio de 1958, iba provisto de contadores especiales, diseñados para responder a grandes sobrecargas. Por ejemplo, uno de ellos iba recubierto por una delgada capa de plomo, que desempeñaría una función similar a la de las gafas de sol, la cual lo protegía de la mayor parte de la radiación. Esta vez los contadores registraron algo distinto. Demostraron que era correcta la teoría de «exceso de radiación». El *Explorer IV*, que alcanzó los 2.200 km de altura, envió a la Tierra unos recuentos que, una vez descartado el efecto protector de su escudo,

demostraron que la intensidad de la radiación en aquella zona era mucho más alta que la imaginada por los científicos. Era tan intensa, que suponía un peligro mortal para los futuros astronautas.

Se comprobó que los satélites *Explorer* habían penetrado sólo en las regiones más bajas de este inmenso campo de radiación. A finales de 1958, los dos satélites lanzados por los Estados Unidos en dirección a la Luna (llamados por ello «sondas lunares»), el *Pioneer I*, que llegó hasta los 112.000 km, y el *Pioneer III*, que alcanzó los 104.000, mostraron que existían dos cinturones principales de radiación en torno a la Tierra. Fueron denominados «cinturones de radiación de Van Allen». Más tarde se les dio el nombre de «magnetosfera», para equipararlos con otros puntos del espacio en los contornos de la Tierra.

Al principio se creyó que la magnetosfera estaba dispuesta simétricamente alrededor de la Tierra, o sea, que era algo así como una inmensa rosquilla, igual que las líneas magnéticas de fuerzas. Pero esta noción se vino abajo cuando los satélites enviaron datos con noticias muy distintas. Sobre todo en 1963, los satélites *Explorer XIV* e *Imp-1* describieron órbitas elípticas proyectadas con objeto de traspasar la magnetosfera, si fuera posible.

Pues bien, resultó que la magnetosfera tenía un límite claramente definido, la «magnetopausa», que era empujada hacia la Tierra por el viento solar en la parte iluminada de nuestro planeta; pero ella se revolvía y contorneando la Tierra, se extendía hasta enormes distancias en la parte ocupada por la oscuridad. La magnetopausa está a unos 64.000 km de la Tierra en dirección al Sol, pero las colas que se deslizan por el otro lado tal vez se extiendan en el espacio casi 2 millones de kilómetros. En 1966, el satélite soviético *Lunik X* detectó, mientras orbitaba la Luna, un débil campo magnético en torno a aquel mundo, que probablemente sería la cola de la magnetosfera terrestre que pasaba de largo.

La captura, a lo largo de las líneas de fuerza magnéticas, de las partículas cargadas había sido predicha, en la década de 1950, por un griego aficionado a la Ciencia, Nicholas Christofilos, el cual envió sus cálculos a científicos dedicados a tales investigaciones, sin que nadie les prestase demasiada atención. (En la Ciencia, como en otros campos, los profesionales tienden a despreciar a los aficionados.) Sólo cuando los profesionales llegaron por su cuenta a los mismos resultados que

Christofilos, éste obtuvo el debido reconocimiento científico y fue recibido en los laboratorios americanos. Su idea sobre la captura de las partículas se llama hoy «efecto Christofilos».

Para comprobar si este efecto se producía realmente en el espacio, los Estados Unidos lanzaron, en agosto y septiembre de 1958, tres cohetes, provistos de bombas nucleares, cohetes que se elevaron hasta los 482 km, donde se hizo estallar los artefactos. Este experimento recibió el nombre de «proyecto Aarhus». El flujo de partículas cargadas resultante de las explosiones nucleares se extendió a todo lo largo de las líneas de fuerza, en las cuales quedó fuertemente atrapado. El cinturón radiactivo originado por tales explosiones persistió un lapso de tiempo considerable; el *Explorer IV* lo detectó en vanas de sus órbitas alrededor de la Tierra. La nube de partículas provocó asimismo débiles auroras boreales y perturbó durante algún tiempo las recepciones de radar.

Éste era el preludio de otros experimentos que afectaron e incluso modificaron la envoltura de la Tierra próxima al espacio y algunos de los cuales se enfrentaron con la oposición e indignación de ciertos sectores de la comunidad científica. El 9 de julio de 1962, una bomba nuclear, que se hizo estallar en el espacio, introdujo importantes cambios en los cinturones Van Allen, cambios que persistieron durante un tiempo considerable, como habían predicho algunos científicos contrarios al proyecto (entre ellos, Fred Hoyle). Estas alteraciones de las fuerzas de la Naturaleza pueden interferir nuestros conocimientos sobre la magnetosfera, por lo cual es poco probable que se repitan en fecha próxima tales experimentos.

Posteriormente se realizaron intentos de esparcir una tenue nube de agujas de cobre en una órbita alrededor de la Tierra, para comprobar su capacidad reflectante de las señales de radio y establecer así un método infalible para las comunicaciones a larga distancia. (La ionosfera es distorsionada de vez en cuando por las tormentas magnéticas, por lo cual pueden fallar en un momento crucial las comunicaciones de radio.)

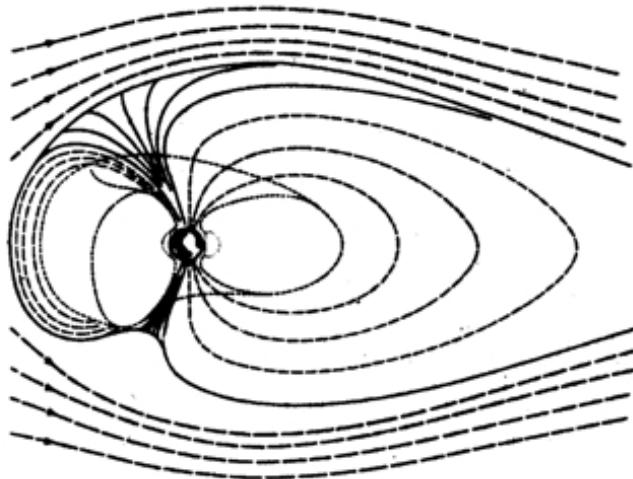
Pese a las objeciones hechas por los radioastrónomos, -quienes temían que se produjeran interferencias con las señales de radio procedentes del espacio exterior, el Plan (llamado «Proyecto West Ford», de Westford, Massachussets, lugar donde se desarrollaron los trabajos preliminares) se llevó a cabo el 9 de mayo de 1963. Se

puso en órbita un satélite cargado con 400 millones de agujas de cobre, cada una de ellas de unos 18 mm de longitud y más finas que un cabello humano. Las agujas, fueron proyectadas y se esparcieron lentamente en una faja en torno al Planeta, y, tal como se esperaba, reflejaron las ondas de radio. Sin embargo, para que resultara práctico se necesitaría un cinturón mucho más espeso, y creemos muy poco probable que en este caso se pudiesen vencer las objeciones de los radioastrónomos.

Naturalmente, los científicos sentían curiosidad por saber si había cinturones de radiación en torno a otros cuerpos celestes, aparte la Tierra. Una de las formas para determinarlo consistía en enviar satélites a una altura y velocidad suficientes como para liberarlos de la atracción terrestre (11 km/seg, frente a los 8 km/seg a que se desplaza un satélite en órbita en torno a la Tierra). El primero que rebasó la velocidad de escape y consiguió liberarse de la gravedad terrestre, para colocarse en órbita alrededor del Sol y convertirse así en el primer «planeta hecho por el hombre», fue el satélite soviético *Lunik I*, lanzado el 2 de enero de 1959. El *Lunik II* se estrelló en la luna en septiembre de 1959 (fue el primer objeto fabricado por el hombre que consiguió llegar a la superficie de otro cuerpo celeste). Ninguno de los dos encontró signos de cinturones radiactivos en torno a la Luna.

Ello no era sorprendente, ya que los científicos habían predicho que la Luna no tenía un campo magnético importante. Según se sabe desde hace tiempo, la densidad de la Luna es de 3,3 g/cm<sup>3</sup>) (aproximadamente, la de unos 3/5 de la de la Tierra), densidad que no podría ser tan baja a menos que estuviese casi enteramente formada por silicatos, sin núcleo alguno de hierro. Si las actuales teorías son correctas, de ello se deduciría la falta de un campo magnético.

Pero, ¿qué decir de Venus? En tamaño y masa es casi gemelo de la Tierra, y no parece haber duda alguna respecto a que posee un núcleo de hierro. ¿Tiene también magnetosfera? Tanto la Unión Soviética como los Estados Unidos intentaron enviar «sondas venusianas», que pasarían, en sus órbitas, cerca del planeta y enviarían a la Tierra datos útiles. El primero de estos intentos que alcanzó un éxito completo fue el del *Mariner II*, lanzado por los Estados Unidos el 27 de agosto de 1962. El 14 de diciembre del mismo año pasó a unos 35.000 km de Venus y no encontró signo alguno de magnetosfera.



*Los cinturones de radiación de Van Allen, tal como fueron detectados por satélites. Parecen estar compuestos de partículas cargadas atrapadas en el campo magnético de la Tierra.*

Pero esto no significa que no exista necesariamente un núcleo férrico en Venus. En efecto, la rotación de Venus es muy lenta, una vuelta cada ocho meses más o menos, el hecho que esta rotación tenga un sentido anómalo carece de significado en este caso específico, velocidad que no basta para desencadenar en el núcleo, si realmente existe, el tipo de remolinos que originarían un campo magnético. Según se ha informado, Mercurio, con una rotación completa cada dos meses, tiene un débil campo magnético, cuya intensidad equivale a 1/60 de la terrestre.

Y, ¿qué hay respecto a Marte? Al ser algo más denso que la Luna, puede contener un pequeño núcleo de hierro, y, puesto que realiza un giro completo en 24 horas y media, puede poseer un campo magnético muy débil. Los Estados Unidos lanzaron una «sonda marciana» (*Mariner IV*) el 28 de noviembre de 1964. En julio de 1965 se había acercado ya mucho a Marte y, por los datos que envió, no parece que pueda hablarse de un campo magnético en torno a este planeta.



Órbita del «Planeta Artificial» Pioneer V, de los Estados Unidos, lanzado el 11 de marzo de 1960, y mostrado en relación al Sol y a las órbitas de la Tierra y Venus. El círculo en la órbita del cohete indica a grandes rasgos su posición el día 9 de agosto de 1960, cuando se hallaba más próximo al Sol.

En cuanto al Sistema Solar más allá de Marte, hay pruebas suficientes que por lo menos Júpiter y Saturno tienen cinturones de radiación más potentes y amplios aún que los de la Tierra. En efecto, ondas de radio procedentes de Júpiter parecen indicar que posee un campo magnético por lo menos de 12 a 16 veces más intenso que el de la Tierra. En 1965 se detectaron ondas de radio procedentes de Urano y Neptuno.

Una de las principales razones para justificar la gran curiosidad que existe en torno a la magnetosfera es, por supuesto, la preocupación por la seguridad de los pioneros del espacio exterior. En 1959, los Estados Unidos seleccionaron 7 hombres (llamados popularmente «astronautas») para tomar parte en el «Proyecto Mercurio», destinado a colocar seres humanos en órbita alrededor de la Tierra. Los soviéticos iniciaron, también un programa de entrenamiento para los denominados por ellos «cosmonautas».

El honor de alcanzar en primer lugar este objetivo correspondió al cosmonauta de la Unión Soviética Yuri Alexéievich Gagarin, cuyo vehículo espacial (el *Vostok I*) fue puesto en órbita el 12 de abril de 1961 (sólo tres años y medio después que se iniciara la «Era espacial» con el viaje del *Sputnik I*). Regresó sano y salvo, después de dar una vuelta a la Tierra, que duró más de hora y media. Fue el primer «hombre del espacio».

La Unión Soviética colocó en órbita a otros seres humanos durante los años siguientes. El 16 de junio de 1963 fue lanzada al espacio Valentina V. Tereshkova, la primera «mujer del espacio», quien dio 49 vueltas a la Tierra.

El primer astronauta americano fue John Herschel Glenn, cuya cápsula fue lanzada el 20 de febrero de 1962. Dio tres vueltas a la Tierra. El récord norteamericano de permanencia en el espacio hasta ahora lo ostenta Gordon Leroy Cooper lanzado el 15 de mayo de 1963, el cual describió 22 órbitas en torno a nuestro planeta.

En 1964 y 1965, los Estados Unidos y la Unión Soviética lanzaron varias cápsulas, tripuladas por dos y tres hombres. En el curso de uno de estos vuelos, el 18 de marzo de 1965, el cosmonauta soviético Alexei A. Leonov salió de su cápsula y, manteniéndose unido a ella por un cordón umbilical, llevó a cabo el primer «paseo espacial» de la Historia.

## Meteoros

Ya los griegos sabían que las «estrellas fugaces» no eran estrellas en realidad, puesto que, sin importar cuántas cayesen, su número permanecía invariable. Aristóteles creía que una estrella fugaz, como fenómeno temporal, debía de producirse en el interior de la atmósfera (y esta vez tuvo razón). En consecuencia, estos objetos recibieron el nombre de «meteoros», o sea, «cosas en el aire». Los meteoros que llegan a alcanzar la superficie de la Tierra se llaman «meteoritos».

Los antiguos presenciaron algunas caídas de meteoritos y descubrieron que eran masas de hierro. Se dice que Hiparco de Nicea informó sobre una de estas caídas. Según los musulmanes, La Kaaba, la piedra negra de la Meca, es un meteorito que debe su carácter sagrado a su origen celeste. Por su parte, *La Ilíada* menciona una masa de hierro tosco, ofrecida como uno de los premios en los juegos funerarios en honor de Patroclo. Debió de haber sido de origen meteórico, pues que en aquellos tiempos se vivía aún en la Edad del Bronce y no se había desarrollado la metalurgia del hierro. En realidad, en épocas tan lejanas como el año 3000 a. de J.C. debió de emplearse hierro meteórico.

Durante el siglo XVIII, en pleno auge de la Ilustración, la Ciencia dio un paso atrás en este sentido. Los que desdeñaban la superstición se reían de las historias de las «piedras que caían del cielo». Los granjeros que se presentaron en la Academia

Francesa con muestras de meteoritos, fueron despedidos cortésmente, aunque con visible impaciencia. Cuando, en 1807, dos estudiantes de Connecticut declararon que habían presenciado la caída de un meteorito, el presidente, Thomas Jefferson, en una de sus más desafortunadas observaciones, afirmó que estaba más dispuesto a aceptar que los profesores yanquis mentían, que el que las piedras cayesen del cielo.

Sin embargo, el 13 de noviembre de 1833, los Estados Unidos se vieron sometidos a una verdadera lluvia de meteoros del tipo llamado «leónidas» porque, al parecer, proceden de un punto situado en la constelación de Leo. Durante algunas horas, el cielo se convirtió en un impresionante castillo de fuegos artificiales. Se dice que ningún meteorito llegó a alcanzar la superficie de la Tierra, pero el espectáculo estimuló el estudio de los meteoros, y, por vez primera, los astrónomos lo consideraron seriamente.

Hace unos años, el químico sueco Jöns Jakob Berzelius se trazó un programa para el análisis químico de los meteoritos. Tales análisis han proporcionado a los astrónomos una valiosa información sobre la edad general del Sistema Solar e incluso sobre la composición química del Universo.

Anotando las épocas del año en que caía mayor número de meteoros, así como las posiciones del cielo de las que parecían proceder, los observadores pudieron trazar las órbitas de diversas nubes de meteoros. De este modo se supo que las lluvias de tales objetos estelares se producían cuando la órbita de la Tierra interceptaba la de una nube de meteoros.

¿Es posible que estas nubes de meteoros sean, en realidad, los despojos de cometas desintegrados? Desde luego, se ha de admitir como un hecho la desintegración de los cometas, ya que uno de ellos, el llamado *Biela*, estalló ante los propios ojos de varios astrónomos, en el siglo XIX, dejando en su órbita una nube de meteoros.

En razón de su misma estructura, los cometas deben de ser cuerpos frágiles. En 1950, el astrónomo americano Fred Lawrence Whipple hizo la siguiente sugerencia sobre la composición de los cometas: Son guijas de material rocoso aglutinadas por «carámbanos» de gases de bajo punto de congelación, tales como el metano y el amoníaco. Algunos de esos carámbanos se evaporan cada vez que el cometa se

acerca al Sol, con lo cual libera polvo y partículas, que luego el viento solar arrastra lejos del astro (como ha podido comprobarse). Ocasionalmente desaparecen todos los carámbanos, y entonces el cometa subsiste como un núcleo rocoso, o bien se desintegra en una nube de meteoros formada por sus antiguas guijas. Un cometa puede perder hasta un 0,5 % de su masa cada vez que se acerca el Sol. Incluso, un cometa que, en sus aproximaciones periódicas, no se acerque mucho al astro, dura, como máximo, un millón de años. El hecho que los cometas sobrevivan aún, cuando la antigüedad del Sistema Solar se calcula en casi 5.000 millones de años, se explica sólo por la constante aparición, en el sistema interno, de cuerpos pertenecientes a la enorme nube cometaria de la inmensidad espacial cuya existencia propugnara Oort.

Antes se creía que eran de hierro la mayor parte de las meteoritos que resistían el paso por las capas gaseosas y llegaban al suelo. (Hasta ahora se conoce la existencia de unos 1.700 meteoritos, de los cuales, unos 35 pesarían más de 1 tonelada métrica.) Por tanto, su número sería mucho más elevado que el de los de tipo rocoso. Más tarde se comprobó que esto no era cierto, ya que una masa de hierro que yace, semienterrada, en un campo pedregoso, es muy visible, en tanto que apenas se distingue una piedra entre otras piedras. Cuando los astrónomos hicieron un recuento de los meteoritos recogidos tras su caída, descubrieron que el número de los rocosos superaba al de los férricos en una proporción de 9 a 1. (Durante algún tiempo, la mayor parte de los meteoritos rocosos fueron descubiertos en el Estado de Kansas, lo cual puede parecer extraño si no se sabe que en el suelo de Kansas, en modo alguno pedregoso y de tipo sedimentario, una piedra es tan visible como lo sería una masa de hierro en cualquier otro lugar de la Tierra.)

Muy raras veces causan daños los meteoritos. Aunque, según algunos cálculos, cada año caen a la Tierra entre 150 y 500 meteoritos de cierto tamaño, la superficie del Planeta es muy amplia y sólo pequeñas zonas de la misma están densamente pobladas. Por lo que se sabe, hasta ahora no ha muerto ninguna persona víctima de la caída de algún meteorito, aunque, el 30 de noviembre de 1955, una mujer de Alabama informó que había resultado herida por uno de ellos.

Sin embargo, los meteoritos tienen realmente un poder devastador. Por ejemplo, en 1908, el impacto de uno de ellos en el norte de Siberia abrió un cráter de 45 m de diámetro y derribó árboles en un radio de 32 km. Por fortuna cayó en una zona desierta de la tundra. Si hubiese caído, a partir del mismo lugar del cielo, 5 horas más tarde, teniendo en cuenta la rotación de la Tierra, podría haber hecho impacto en San Petersburgo, a la sazón capital de Rusia. La ciudad habría quedado entonces devastada como por una bomba de hidrógeno. Según uno de los cálculos hechos, el meteorito tendría una masa de 40.000 toneladas métricas. Desde entonces, el impacto más importante fue el registrado, en 1947, cerca de Vladivostok (como vemos, otra vez en Siberia).

Hay señales de impactos aún más violentos, que se remontan a épocas prehistóricas. Por ejemplo, en Coconino County (Arizona) existe un cráter, redondo, de unos 1.260 m de diámetro y 180 m de profundidad, circuido por un reborde de tierra de 30 a 45 m de altura. Tiene el aspecto de un cráter lunar en miniatura. Hace tiempo se pensaba que quizás pudiera tratarse de un volcán extinguido; pero un ingeniero de minas, Daniel Moreau Barringer, insistió en que era el resultado de una colisión meteórica, por lo cual el agujero en cuestión lleva hoy el nombre de «cráter Barringer». Está rodeado por masas de hierro meteórico, que pesan miles o quizás millones de toneladas en total. A pesar que hasta ahora se ha extraído sólo una pequeña parte, esa pequeña parte es superior al hierro meteórico extraído en todo el mundo. El origen meteórico de este cráter fue confirmado, en 1960, por el descubrimiento de formas de sílice que sólo pudieron producirse como consecuencia de las enormes presiones y temperaturas que acompañaron al impacto meteórico.

El cráter Barringer, que se abriría en el desierto hace unos 25.000 años, se conserva bastante bien. En otros lugares del mundo, cráteres similares hubiesen quedado ocultos por la erosión del agua y el avance de la vegetación. Por ejemplo, las observaciones realizadas desde el aire, han permitido distinguir formaciones circulares, que al principio pasaron inadvertidas, llenas, en parte, de agua y maleza, que son también casi con certeza, de origen meteórico. Algunas han sido descubiertas en el Canadá, entre ellas, el cráter Brent, en el Ontario Central, y el cráter Chubb, en el norte de Quebec, cada uno de ellos, con un diámetro de más de 3 km, así como el cráter Ashanti, en Ghana, cuyo diámetro mide más de 9 km.

Todos ellos tienen, por lo menos, un millón de años de antigüedad. Se conocen 14 de estos «cráteres fósiles», y algunos signos geológicos sugieren la existencia de otros muchos.

Los tamaños de los cráteres lunares que podemos contemplar con los telescopios oscilan entre agujeros no mayores que el cráter Barringer hasta gigantes de 240 km de diámetro. La Luna, que no tiene aire, agua ni vida, es un museo casi perfecto para los cráteres, puesto que no están sometidos a desgaste alguno, si exceptuamos la lenta acción de los violentos cambios térmicos, resultantes de la alteración, cada dos semanas, del día y la noche lunares. Quizá la Tierra estaría tan acribillada como la Luna si no fuese por la acción «cicatrizante» del viento, el agua y los seres vivientes.

Al principio se creía que los cráteres de la Luna eran de origen volcánico, pero en realidad no se parecen, en su estructura, a los cráteres volcánicos terrestres.

Hacia la década de 1890 empezó a imponerse la teoría que los cráteres se habían originado como resultado de impactos meteóricos, y hoy goza de una aceptación general.

Según esta teoría, los grandes «mares» o sea, esas inmensas llanuras, más o menos circulares y relativamente libres de cráteres, habrían sido formados por el impacto de meteoros excepcionalmente voluminosos. Se reforzó tal opinión en 1968, cuando los satélites que daban vueltas en torno a la Luna experimentaron inesperadas desviaciones en sus órbitas. La naturaleza de tales desviaciones hizo llegar a esta conclusión: Algunas partes de la superficie lunar tienen una densidad superior al promedio; ello hace que se incremente levemente la atracción gravitatoria en dichas partes, por lo cual reaccionan los satélites que vuelan sobre ellas. Estas áreas de mayor densidad, que coinciden, aparentemente, con los mares, recibieron la denominación de *mascons* (abreviatura de *mass-concentrations*, o concentraciones de masas). La deducción más lógica fue la que los grandes meteoros férricos se hallaban enterrados bajo la superficie y eran más densos que la materia rocosa, cuyo porcentaje es el más alto en la composición de la corteza lunar. Apenas transcurrido un año desde este descubrimiento, se había detectado ya por lo menos una docena de *mascons*.

Por otra parte, se disipó el cuadro de la Luna como «mundo muerto», donde no era posible la acción volcánica. El 3 de noviembre de 1958, el astrónomo ruso N. A. Kozyrev observó una mancha rojiza en el cráter Alphonsus. (Mucho antes, nada menos que en 1780, William Herschel informó sobre la aparición de manchas rojas en la Luna.) Los análisis espectroscópicos de Kozyrev revelaron claramente, al parecer, que aquello obedecía a una proyección de gas y polvo. Desde entonces se han visto otras manchas rojas durante breves instantes, y hoy se tiene casi la certeza que en la Luna se produce ocasionalmente actividad volcánica. Durante el eclipse total de Luna, en diciembre de 1964, se hizo un significativo descubrimiento: nada menos que 300 cráteres tenían una temperatura más alta que los parajes circundantes, aunque no emitían el calor suficiente para llegar a la incandescencia. Una vez puesto en órbita el primer satélite, en 1957, la exploración de la Luna a corta distancia fue ya, simplemente, cuestión de tiempo. El primer «ensayo lunar» realizado con éxito, es decir, el primer satélite artificial que pasó cerca de la Luna, lo llevó a cabo la Unión Soviética el 2 de enero de 1959. El *Lunik I* fue el primer objeto de invención humana que describió una órbita alrededor de la Luna. Dos meses después, los Estados Unidos habían superado tal hazaña.

El 12 de septiembre de 1959, los soviéticos lanzaron el *Lunik II*, cuyo objetivo era el de tocar la Luna. Por primera vez en la Historia, un objeto hecho por el hombre cayó sobre la superficie de otro mundo. Al mes siguiente, el satélite soviético *Lunik III*, provisto de una cámara de televisión, envió a la Tierra imágenes de la cara de la Luna que jamás se había visto desde el globo terráqueo. Durante cuarenta minutos tomó fotografías del lado oculto a nuestra vista, para transmitirlas a la Tierra desde una distancia de 64.000 kilómetros. Aunque eran borrosas y de escasa calidad, mostraron algo interesante. En el otro lado de la Luna apenas habían mares semejantes a los que se observan en el paisaje de la cara que contemplamos habitualmente, y aún no está muy claro el por qué de esa asimetría. Quizá los mares se formaron en fechas tardías de la historia lunar, cuando el astro presentaba ya definitivamente una sola cara a la Tierra y los grandes meteoros constitutivos de esos mares se desviaban hacia dicha cara atraídos por la gravitación terrestre.

Pero estas exploraciones lunares fueron sólo el comienzo. En 1964, los Estados Unidos lanzaron una sonda lunar, el *Ranger VII*, concebido para tocar la superficie

de la Luna y tomar fotografías durante la aproximación. El 31 de julio de 1964, esta sonda acabó satisfactoriamente su misión, tras haber tomado 4.316 fotografías de una zona denominada ahora *Mare Cognitum*. A principios de 1965, los satélites *Ranger VIII* y *Ranger IX* hicieron algo aparentemente imposible: superar ese éxito. La labor de estos satélites reveló que la superficie lunar era dura (o por lo menos costrosa), es decir, que no estaba cubierta por una densa capa de polvo, como habían creído muchos astrónomos. Los sondeos demostraron que las áreas que aparecen llanas vistas a través del telescopio, estaban tachonadas de cráteres tan pequeños, que no era posible verlos desde la Tierra.

La sonda soviética *Lunik IX* logró «alunizar suavemente» (es decir, sin destrucción del objeto al entrar en contacto con nuestro satélite) el 3 de febrero de 1966, y para enviar fotografías topográficas. El 3 de abril de 1966, los soviéticos colocaron el *Lunik X* en una órbita de tres horas alrededor de la Luna. Este satélite midió la radiactividad emitida desde la superficie lunar, y el gráfico indicó que las rocas de dicha superficie eran similares al basalto subyacente en los océanos terrestres.

Los técnicos americanos tomaron buena nota de ello y diseñaron cohetes más perfectos. El *Surveyor I* fue el primer satélite norteamericano que efectuó un alunizaje suave. En septiembre de 1967, el *Surveyor V* manipuló y analizó el suelo lunar, obedeciendo órdenes transmitidas por radio desde la Tierra. Según los datos enviados, el suelo es basáltiforme y contiene partículas de hierro, cuyo origen es probablemente meteórico.

El 10 de agosto de 1966 fue lanzado el primer satélite explorador de la serie americana, *Lunar Orbiter*, cuyo objeto era el de orbitar la Luna. (Los satélites de esta serie fueron los descubridores de los *mascons*.) Los *Lunar Orbiter* tomaron minuciosas fotografías de cada región lunar, con lo cual permitieron conocer detalladamente toda la superficie lunar, incluyendo la cara que nuestro satélite había ocultado hasta entonces a las miradas terrestres. Además, tomaron sorprendentes fotografías de la Tierra, vista desde las proximidades de la Luna.

A los cráteres lunares se les dieron nombres de astrónomos del pasado. Como quiera que la mayor parte de tales nombres fueron puestos por el astrónomo italiano Giovanni Battista Riccioli (hacia el 1650), los cráteres mayores se llaman Copérnico, Tycho, Kepler, Aristóteles, Arquímedes, Ptolomeo....

El otro lado de la Luna, que fotografió el *Lunik III*, ofreció una nueva oportunidad. Los rusos se «posesionaron» de algunos de los relieves más importantes. De aquí que los cráteres de esta cara lleven los nombres de Tsiolkovski, Lomonosov y Popov, estos últimos, químicos rusos de fines del siglo XVIII. También bautizaron algunos cráteres con los nombres de personalidades occidentales, como Maxwell, Hertz, Edison, Pasteur y los Curie, todos los cuales son mencionados en este libro. Un nombre muy oportuno y justo dado a un cráter de la cara oculta de la Luna es el del escritor francés, pionero de la ciencia-ficción, Julio Verne.

En 1970 se conocía el otro lado de la Luna lo suficiente como para describir sus peculiaridades estructurales con procedimientos sistemáticos. Un organismo internacional, bajo la dirección del astrónomo americano Donald Howard Menzel, asignó centenares de nombres a otros tantos lugares, perpetuando así la memoria de grandes hombres que contribuyeron de alguna forma al progreso científico. Se bautizaron varios cráteres importantes con los nombres de eminentes rusos, tales como Mendeléiev, quien elaboró la tabla periódica que analizaremos en el capítulo V, y Gagarin, el primer hombre que orbitó la Tierra y que murió poco después en un accidente de aviación. Se utilizaron otros parajes lunares característicos para perpetuar la memoria de muchos científicos, entre ellos, el astrónomo holandés Hertzsprung, el matemático francés Galois, el físico italiano Fermi, el matemático americano Wiener y el físico británico Cockcroft. En una zona pequeña aparecen nombres como Nernst, Roentgen, Lorentz, Moseley, Einstein, Bohr y Dalton, todos ellos de gran importancia, suprema, en el desarrollo de la teoría atómica y la estructura subatómica.

El interés de Menzel por las narraciones científicas y la ciencia-ficción se refleja en esa loable decisión de asignar a algunos cráteres los nombres de quienes supieron despertar el entusiasmo de toda una generación por los vuelos espaciales, precisamente cuando la ciencia ortodoxa los calificaba de quimera. Así, pues, hay un cráter con el nombre de Hugo Gernsback, quien publicó en Estados Unidos las primeras revistas dedicadas íntegramente a la ciencia-ficción, y otro consagrado a Willy Ley, el escritor que describió como ningún otro los triunfos y potencialidades de los cohetes. (Ley murió trágicamente seis días antes del primer alunizaje, acontecimiento que había esperado con ansiedad toda su vida.)

Sin embargo, la exploración lunar con la ayuda exclusiva de instrumentos quedó relegada a segundo plano cuando se emprendió espectacularmente la suprema hazaña espacial de la década de 1960-1970: la investigación del espacio por el hombre, tema que abordaremos en el capítulo XV.

Todo el que se sienta inclinado a mostrarse complaciente con el fenómeno de los meteoros, o a creer que estos colosales impactos eran, simplemente, un fenómeno de principios de la historia del Sistema Solar, debería prestar alguna atención a los asteroides o planetoides. Sea cual fuere su origen, ya restos de un planeta que hizo explosión, ya pequeños planetas, lo cierto es que hay algunos bastante grandes, a nuestro alrededor. La mayor parte de ellos describen órbitas en torno al Sol en un cinturón situado entre Marte y Júpiter. Pero en 1898, un astrónomo alemán, G. Witt, descubrió uno que trazaba la órbita, según sus cálculos, entré Marte y la Tierra. Lo llamó Eros, y desde entonces han recibido nombres masculinos los planetoides con órbitas poco usuales. (Los que siguen órbitas normales, entre Marte y Júpiter, recibieron nombres femeninos, aunque sean denominados a partir de apellidos masculinos, como, por ejemplo, Rockefellia, Carnegie, Hooveria.)

Las órbitas de Eros y la Tierra se acercan hasta los 20 millones de kilómetros, que es la mitad de la distancia mínima entre la Tierra y Venus, nuestro vecino más cercano entre los grandes planetas. En 1931, Eros llegó a un punto situado a sólo 27 millones de kilómetros de la Tierra, y alcanzó su próximo punto más cercano en 1975. Desde entonces se han descubierto otros planetoides cuya órbita pasa cerca de nuestro planeta. En 1932 se descubrieron dos, llamados Amor y Apolo, cuyas órbitas se acercaban hasta 16 y 11 millones de kilómetros, respectivamente, de la órbita de la Tierra. En 1936 se halló más cerca aún otro planetoide, llamado Adonis, que podría aproximarse hasta sólo 2.400.000 km de la Tierra. Y en 1937 se descubrió otro planetoide, al que se llamó Hermes y cuya órbita puede acercarlo a sólo unos 320.000 km de la Tierra, es decir, más cerca aún que la Luna. (Los cálculos sobre la órbita de Hermes pueden no ser enteramente fidedignos, ya que este objeto espacial no permaneció mucho tiempo al alcance de nuestra vista, y desde entonces no se ha vuelto a localizar.)

Un planetoide poco usual es Ícaro, descubierto, en 1948, por Walter Baade. Se acerca hasta unos 6 millones de kilómetros de la Tierra. Describe una órbita

alargada y, en el afelio, retrocede hasta la órbita de Marte, mientras que en el perihelio llega hasta sólo unos 27 millones de kilómetros del Sol. De aquí que haya sido bautizado con el nombre del personaje mitológico griego que murió por acercarse demasiado al Sol en su vuelo, sostenido por unas alas pegadas con cera. Sólo ciertos cometas se acercan al Sol más que Ícaro. Uno de los mayores cometas de la década de 1880 se acercó a sólo 1.600.000 km del Sol.

Eros, el más grande de los planetoides que pasa cerca de la Tierra, es un objeto en forma de ladrillo, de unos 24 km de longitud y 8 de anchura. Otros, como Hermes, tienen un diámetro de sólo 1.600 m. Aún así, Hermes podría abrir un cráter de 160 km de diámetro si entrase en colisión con la Tierra o producir un tsunami de violencia nunca vista, si cayera en el océano. Afortunadamente son mínimas las probabilidades que esto ocurra.

Los meteoritos, como únicos elementos de la materia extraterrestre que podemos analizar, despiertan no sólo la curiosidad de astrónomos, geólogos, químicos, metalógrafos, sino también la de los cosmólogos, quienes se interesan por el origen del Universo y del Sistema Solar.

Entre los meteoritos figuran algunos enigmáticos objetos semejantes al vidrio, que han aparecido en diversos lugares de la Tierra. El primero se descubrió en 1787 en lo que hoy es la Checoslovaquia Occidental. Los ejemplares australianos fueron vistos en 1864. Se les dio el nombre de tectitas (voz derivada del griego y cuyo significado es «fundido») porque, al parecer, se habían fundido al atravesar la atmósfera.

En 1936, el astrónomo americano Harvey Harlow Nininger sugirió que las tectitas eran restos de la materia proyectada al espacio tras el impacto de los grandes meteoros contra la superficie lunar, y que eran capturados luego por el campo gravitatorio terrestre. Las tectitas se encuentran diseminadas con especial profusión en Australia y el Sudeste asiático (donde han sido extraídas muchas por las aguas desde el fondo del Océano Índico). Parecen ser las tectitas más jóvenes, con sólo 700.000 años de antigüedad. Es posible que tuvieran su origen en el gran impacto meteórico que abrió el cráter Tycho, el más reciente de los espectaculares cráteres lunares. Ha suscitado ciertas especulaciones el hecho que este impacto coincidiera con la última inversión del campo magnético terrestre, y muchos se preguntan si

esa serie tan irregular de inversiones no será el preludio de una nueva catástrofe Tierra-Luna.

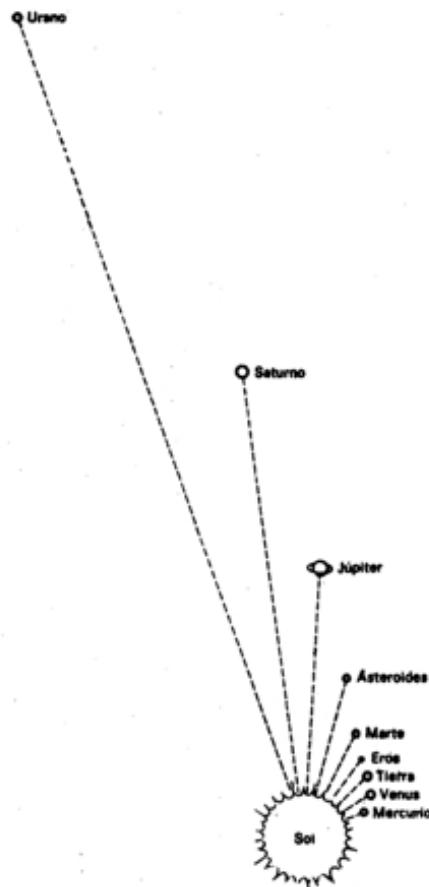
Sean lo que fueren, los meteoritos constituyen muestras de materia primitiva formada en los comienzos de la historia del Sistema Solar. Como tales, nos proporcionan un punto de referencia independiente para calcular la antigüedad de nuestro Sistema. Sus edades pueden ser estimadas de diversas formas, incluyendo la medida de los productos de la desintegración radiactiva. En 1959, John H. Reynolds, de la Universidad de California, calculó en 5 mil millones de años la edad de un meteorito hallado en Dakota del Norte, y que sería, por tanto, la edad mínima del Sistema Solar.

Los meteoritos constituyen sólo una pequeña fracción de la materia que penetra en la atmósfera de la Tierra procedente del espacio exterior. Los pequeños meteoros que se queman en el aire y que, por tanto, no llegan al suelo, sumarían, en conjunto, una cantidad de materia muy superior. Estos fragmentos de materia son extremadamente pequeños; una estrella fugaz tan brillante como Venus penetra en la atmósfera como una partícula de sólo 1 g de peso. Algunos meteoros cuya caída puede observarse a simple vista tienen sólo una diezmilésima parte de gramo.

Puede calcularse el número total de meteoros que penetran en la atmósfera terrestre, número que es increíblemente grande. Cada día atraviesan nuestra capa gaseosa más de 20.000, con un peso de 1 g por lo menos: unos 200 millones de tamaño suficiente como para originar un resplandor visible a simple vista, y muchos miles de millones, más pequeños aún.

Conocemos la existencia de estos pequeñísimos «micrometeoros» porque se han observado en el aire partículas de polvo de formas poco usuales y con un alto contenido en níquel, muy distintas del polvo terrestre normal. Otra prueba de la presencia de micrometeoros en grandes cantidades es el resplandor celeste llamado «luz zodiacal» (descubierta hacia el 1700, por G. D. Cassini). Se le dio este nombre porque es más visible en las proximidades del plano de la órbita de la Tierra donde se encuentran las constelaciones del Zodíaco. La luz zodiacal es muy débil y no puede distinguirse ni siquiera en una noche sin Luna, a menos que las condiciones sean favorables. Es más brillante cerca del horizonte por donde el Sol se ha puesto, o está a punto de salir, mientras que en el lado opuesto del cielo se observa un

resplandor secundario, denominado la *Gegenschein* (voz alemana que significa «luz opuesta»). La luz zodiacal difiere del resplandor nocturno en que su espectro no tiene líneas de oxígeno atómico o de sodio atómico; es sólo el de la luz solar reflejada. El agente reflectante es, presumiblemente, polvo concentrado en el espacio en el plano de las órbitas planetarias, o sea, que se trataría de micrometeoros. Su número y tamaño pueden calcularse por la intensidad de la luz zodiacal.



*Un dibujo esquemático de los radios de las órbitas de la mayor parte de los planetas solares, indicando sus distancias desde el Sol y las posiciones de Eros y los asteroides. Aproximadamente, cada planeta está a doble distancia del Sol y del planeta más próximo.*

El número de micrometeoros se ha podido calcular recientemente con mayor precisión gracias a los satélites artificiales, como el *Explorer XVI* lanzado en diciembre de 1962, y el *Pegasus I*, puesto en órbita el 16 de febrero de 1965. Para

detectarlos, algunos de los satélites van cubiertos con láminas de un material sensible, que registra cada impacto meteórico a través de un cambio en su resistencia eléctrica. Otros registran estos impactos por medio de un micrófono sensible situado tras su cobertura. Los contadores de los satélites han indicado que cada día penetran en la atmósfera 3.000 toneladas métricas de materia meteórica,  $\frac{5}{6}$  parte de las cuales son micrometeoros demasiado pequeños para ser detectados como estrellas fugaces. Estos micrometeoros pueden formar una sutil nube de polvo en torno a la Tierra, que se extiende, con decreciente densidad, hasta unos 160.000 km, para alcanzar la altura usual a que se halla en el espacio interplanetario.

El *Mariner II*, sonda venusiana lanzada el 27 de agosto de 1962, reveló que la concentración de polvo en el espacio suele ser únicamente de 1 diezmilésima respecto a la observada en las proximidades de la Tierra, que parece ser el centro de una bola de polvo.

El astrónomo norteamericano Fred Lawrence Whipple sugiere que la Luna puede ser el origen de esta nube, que sería removida de la superficie de la Luna por los impactos de los meteoritos que ha de soportar nuestro satélite. El geofísico Hans Petterson, quien se ha mostrado particularmente interesado por este polvo meteórico, recogió, en 1957, algunas muestras de aire, en la cumbre de una montaña de las Hawái, el punto más alejado que puede encontrarse en la Tierra de las zonas industriales productoras de polvo. Sus descubrimientos lo llevaron a suponer que cada año caen en la Tierra unos 5 millones de toneladas de polvo meteórico. (Una medición similar, realizada en 1964 por James M. Rosen con ayuda de instrumentos trasportados por globos, dio una cifra de 4 millones de toneladas.) Además, Hans Petterson trató de averiguar qué volumen tendría esta «lluvia» en el pasado, para lo cual analizó muestras extraídas del fondo del océano, en las que buscó polvo rico en níquel. Descubrió que, en conjunto, había más níquel en los sedimentos superiores que en los subyacentes; ello indica, pese a que esta prueba no es concluyente, que el índice de bombardeo meteórico puede haber aumentado en épocas recientes. Este polvo meteórico quizás tenía gran importancia para el hombre, dado que, de acuerdo con una teoría formulada por el físico australiano E. G. Bowen en 1953, sirve de núcleo a las gotas de lluvia. De ser esto así, el sistema

de precipitaciones reflejaría el incremento o disminución en la intensidad con que nos bombardean los micrometeoritos.

### Origen del Aire

Quizá no debería sorprendernos tanto la forma en que la Tierra consiguió su atmósfera, como la manera en que ha logrado retenerla a través de los períodos en que ha estado girando sobre sí misma y corriendo a través del espacio. La respuesta a este último problema requiere la ayuda del concepto «velocidad de escape».

Si un objeto es lanzado desde la Tierra hacia arriba, la fuerza de la gravedad va aminorando gradualmente el empuje del objeto hacia arriba, hasta determinar, primero, una detención momentánea, y luego su caída. Si la fuerza de la gravedad fuese la misma durante todo el recorrido, la altura alcanzada por el objeto sería proporcional a su velocidad inicial; es decir, que lanzado a mas de 3 km/hora, alcanzaría una altura 4 veces superior a la que conseguiría si fuese disparado a sólo 1.600 m/hora (pues la energía aumenta proporcionalmente al cuadrado de la velocidad).

Pero, como es natural, la fuerza de la gravedad no permanece constante, sino que se debilita lentamente con la altura. (Para ser exactos, se debilita de acuerdo con el cuadrado de la distancia a partir del centro de la Tierra.) Por ejemplo, si disparamos hacia arriba un objeto a la velocidad de 1.600 m/seg, alcanzará una altura de 129 km antes de detenerse y caer (si prescindimos de la resistencia del aire), y si disparásemos el mismo objeto a 3.200 m/seg, se elevaría a una altura 4 veces mayor. A los 120 km de altura, la fuerza de la gravedad terrestre es sensiblemente inferior que a nivel del suelo, de modo que el posterior vuelo del objeto estaría sometido a una menor atracción gravitatoria. De hecho, el objeto alcanzaría los 563 km, no los 514.

Dada una velocidad centrífuga de 10 km/seg, un objeto ascenderá hasta los 41.500 km de altura. En este punto la fuerza de la gravedad es unas 40 veces menor que sobre la superficie de la Tierra. Si añadimos sólo 160 m/seg a la velocidad inicial del objeto (por ejemplo, lanzado a 10,6 km/seg), alcanzaría los 55.000 km.

Puede calcularse que un objeto lanzado a la velocidad inicial de 11,23 km/seg, no caerá nunca a la Tierra. A pesar que la gravedad terrestre irá aminorando

gradualmente la velocidad del objeto, su efecto declinará, poco a poco, de modo que nunca conseguirá detenerlo por completo (velocidad cero) respecto a la Tierra. (Y ello, pese a la conocida frase de «todo lo que sube tiene que bajar») El *Lunik I* y el *Pioneer IV*, disparados a velocidades de más de 11,26 km/seg, nunca regresarán. Por tanto, la «velocidad de escape» de la Tierra es de 11,23 km/seg. La velocidad de escape de cualquier cuerpo astronómico puede calcularse a partir de su masa y su tamaño. La de la Luna es de sólo 2.400 m/seg; la de Marte, de 5.148 m/seg; la de Saturno, de 37 km/seg; la de Júpiter, el coloso del Sistema Solar, de 61 km/seg. Todo esto se halla relacionado directamente con la retención, por parte de la Tierra, de su atmósfera. Los átomos y las moléculas del aire están volando constantemente como pequeñísimos cohetes. Sus velocidades particulares están sometidas a grandes variaciones, y sólo pueden describirse estadísticamente: por ejemplo, dando la fracción de las moléculas que se mueven a velocidad superior a la fijada, o dando la velocidad media en determinadas condiciones. La fórmula para realizarlo fue elaborada, en 1800, por James Clerk Maxwell y el físico austriaco Ludwig Boltzmann, por lo cual recibe el nombre de «ley de Maxwell-Boltzmann».

La velocidad media de las moléculas de oxígeno en el aire a la temperatura ambiente es de 0,4 km/seg. La molécula de hidrógeno, 16 veces menos pesada, suele moverse a una velocidad 4 veces mayor, es, decir, 1,6 km/seg, ya que, de acuerdo con la citada ley de Maxwell-Boltzmann, la velocidad de una determinada partícula a una temperatura dada es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su peso molecular.

Es importante recordar que se trata sólo de velocidades medias. La mitad de las moléculas van más de prisa que el promedio; un determinado porcentaje de las mismas va dos veces más rápido que el promedio; un menor porcentaje va 3 veces más rápido, etc. De hecho, un escaso porcentaje de las moléculas de hidrógeno y oxígeno de la atmósfera se mueve a velocidades superiores a los 11,26 km/seg, o sea, la velocidad de escape.

Estas partículas no pueden escapar en los niveles bajos de la atmósfera, porque aminoran su marcha las colisiones con sus vecinas más lentas; en cambio, en la atmósfera superior son mucho mayores sus probabilidades de escape. Ello se debe, en primer lugar, a que la radiación del Sol, al llegar hasta allí sin traba alguna,

estimula a buen número de partículas, que adquieren una enorme energía y grandes velocidades. En segundo lugar, a que la probabilidad de colisiones queda muy reducida en un aire más tenue. Mientras que, en la superficie de la Tierra, una molécula se desplaza, por término medio, sólo unos 0,001 mm, antes de chocar con una molécula vecina, a 104 km de altura, el camino que pueden recorrer sin entrar en colisión es de 10 cm, en tanto que a los 225 km es ya de 1 km. Aquí, el promedio de colisiones sufridas por un átomo o una molécula es sólo de 1/seg, frente a las 5.000 millones por segundo a nivel del mar. De este modo, una partícula rápida a 160 km o más de altura, tiene grandes posibilidades de escapar de la Tierra. Si se mueve hacia arriba, se va desplazando por regiones cada vez menos densas y, por tanto, con menores probabilidades de colisión, de modo que, al fin, puede escapar a veces al espacio interplanetario para no volver nunca más. En otras palabras: la atmósfera de la Tierra tiene «fugas», aunque por lo general, de las moléculas más ligeras. El oxígeno y el nitrógeno son bastante pesados, por lo cual, sólo una pequeña fracción de las moléculas de este tipo consigue la velocidad de escape. De aquí que no sea mucho el oxígeno y el nitrógeno que ha perdido la Tierra, desde su formación. Por su parte, el hidrógeno y el helio llegan fácilmente a la velocidad de escape. Así, no debe sorprendernos que nuestra atmósfera no contenga prácticamente hidrógeno ni helio.

Los planetas de mayor masa, como Júpiter y Saturno, pueden retener bien el hidrógeno y el helio, por lo cual sus atmósferas son más amplias y consistentes y están compuestas, en su mayor parte, por estos elementos, que, a fin de cuentas, son las sustancias más corrientes en el Universo. El hidrógeno, que existe en enormes cantidades, reacciona en seguida con los demás elementos presentes, por lo cual el carbono, el nitrógeno y el oxígeno sólo pueden presentarse en forma de compuestos hidrogenados, es decir, metano ( $\text{CH}_4$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), respectivamente. Aunque en la atmósfera de Júpiter el amoníaco y el metano se hallan presentes a una concentración relativamente mínima de impurezas, logró descubrirlos en 1931, el astrónomo germano-americano Rupert Wildt, gracias a que estos compuestos dan en el espectro una banda de absorción muy clara, lo cual no ocurre con el helio y el hidrógeno. La presencia del helio e hidrógeno se detectó en 1952 con ayuda de métodos indirectos.

Basándose en sus hallazgos, Wildt especuló acerca de la estructura de Júpiter y otros planetas. Según sus conjeturas, había una capa de agua congelada bajo la densa atmósfera externa, y, tras ella, un núcleo rocoso. Wildt adujo que los planetas principales podrían tener estructuras similares. Saturno, cuya densidad era claramente inferior a la de Júpiter, tendría una atmósfera más espesa y un núcleo más pequeño. En cambio, Neptuno, de mayor densidad, estaría rodeado por una atmósfera más tenue, y su núcleo sería mayor (en proporción a su tamaño). Ahora bien, todo cuanto ha podido «verse» de Júpiter hasta ahora es su atmósfera externa, y, de momento, las emisiones de radioondas son insuficientes para mostrarnos lo que hay debajo. Se podría aducir, por ejemplo, que Júpiter y los demás «gigantes gaseosos» están formados por helio e hidrógeno excepto en el centro, donde las presiones son tan elevadas, que el hidrógeno se halla presente en forma metálica.

Moviéndose en dirección opuesta, un planeta pequeño como Marte tiene menos capacidad para retener las moléculas relativamente pesadas, por lo cual, la densidad de su atmósfera equivale a una décima parte de la nuestra. La Luna, con su reducida velocidad de escape, no puede retener una atmósfera propiamente dicha y, por tanto, carece de aire.

La temperatura es un factor tan importante como la gravedad. La ecuación de Maxwell-Boltzmann dice que la velocidad media de las partículas es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. Si la Tierra tuviese la temperatura de la superficie del Sol, todos los átomos y moléculas de su atmósfera aumentarían la velocidad de 4 a 5 veces y, en consecuencia, la Tierra no podría retener ya sus moléculas de oxígeno y nitrógeno, del mismo modo que no puede hacerlo con las de hidrógeno y helio.

Por otra parte, si las temperaturas fueran inferiores, habría más probabilidades de detener determinadas moléculas. Por ejemplo, en 1943 Kuiper logró detectar una atmósfera de metano alrededor de Titán, el satélite más grande de Saturno. Titán no es mucho mayor que la Luna, y si distara del Sol tanto como nuestro satélite, no tendría atmósfera. Pero la tiene gracias a la temperatura glacial del Sistema Solar externo. Es posible que otros grandes satélites Exteriores (como Tritón, satélite de Neptuno, y los cuatro satélites principales de Júpiter, Ío, Europa, Ganímedes y

Calixto) posean atmósferas más o menos tenues, pero hasta ahora no se han podido detectar. Por lo pronto, Titán sigue representando un caso único entre los satélites del sistema planetario.

El hecho que la Tierra tenga atmósfera constituye un poderoso argumento en contra de la teoría que tanto ella como los demás planetas del Sistema Solar tuvieron su origen a partir de alguna catástrofe cósmica, como la colisión entre otro sol y el nuestro. Más bien argumenta en favor de la teoría de la nube de polvo y planetesimal. A medida que el polvo y el gas de las nubes se condensaron para formar planetesimales, y éstos, a su vez, se unieron para constituir un cuerpo planetario, el gas quedó atrapado en el interior de una masa esponjosa, de la misma forma que queda el aire en el interior de un montón de nieve. La subsiguiente contracción de la masa por la acción de la gravedad pudo entonces haber obligado a los gases a escapar de su interior. El que un determinado gas quedase retenido en la Tierra se debió, en parte, a su reactividad química. El helio y el neón, pese a que debían figurar entre los gases más comunes en la nube original, son tan químicamente inertes, que no forman compuestos, por lo cual pudieron escapar como gases. Por tanto, las concentraciones de helio y neón en la Tierra son porciones insignificantes de sus concentraciones en todo el Universo. Se ha calculado, por ejemplo, que la Tierra ha retenido sólo uno de cada 50.000 millones de átomos de neón que había en la nube de gas original, y que nuestra atmósfera tiene aún menos, si es que tiene alguno de los átomos de helio originales. Digo, si es que tiene alguno, porque, aún cuando todavía se encuentra algo de helio en nuestra atmósfera, éste puede proceder de la desintegración de elementos radiactivos y de los escapes de dicho gas atrapado en cavidades subterráneas.

Por otra parte, el hidrógeno, aunque más ligero que el helio o el neón, ha sido mejor captado por estar combinado con otras sustancias, principalmente con el oxígeno, para formar agua. Se calcula que la Tierra sigue teniendo uno de cada 5 millones de átomos de hidrógeno de los que se encontraban en la nube original.

El nitrógeno y el oxígeno ilustran con mayor claridad este aspecto químico. A pesar que las moléculas de estos gases tienen una masa aproximadamente igual, la Tierra ha conservado 1 de cada 6 de los átomos originales del oxígeno (altamente reactivo), pero sólo uno de cada 500.000 del inerte nitrógeno. Al hablar de los

gases de la atmósfera incluimos el vapor de agua, con lo cual abordamos, inevitablemente, una interesante cuestión: la del origen de los océanos. Durante las primeras fases de la historia terrestre, el agua debió de estar presente en forma de vapor, aún cuando su caldeamiento fue sólo moderado. Según algunos geólogos, por aquél entonces el agua se concentró en la atmósfera como una densa nube de vapor, y al enfriarse la Tierra se precipitó de forma torrencial, para formar el océano. En cambio, otros geólogos opinan que la formación de nuestros océanos se debió mayormente al rezumamiento de agua desde el interior de la Tierra. Los volcanes demuestran que todavía hay gran cantidad de agua bajo la corteza terrestre, pues el gas que expulsan es, en su mayor parte, vapor de agua. Si esto fuera cierto, el caudal de los océanos seguiría aumentando aún, si bien lentamente. Pero aquí cabe preguntarse si la atmósfera terrestre ha sido, desde su formación, tal como lo es hoy. Nos parece muy improbable. En primer lugar, porque el oxígeno molecular, cuya participación en el volumen de la atmósfera equivale a una quinta parte, es una sustancia tan activa, que su presencia en forma libre resulta extremadamente inverosímil, a menos que existiera una producción ininterrumpida del mismo. Por añadidura, ningún otro planeta tiene una atmósfera comparable con la nuestra, lo cual nos induce a pensar que su estado actual fue el resultado de unos acontecimientos únicos, como, por ejemplo, la presencia de vida en nuestro planeta, pero no en los otros. Harold Urey ha presentado elaborados argumentos para respaldar el supuesto que la atmósfera primigenia estaba compuesta por amoníaco y metano. Los elementos predominantes en el Universo serían el hidrógeno, helio, carbono, nitrógeno y oxígeno, si bien el hidrógeno superaría ampliamente a todos. Ante esta preponderancia del hidrógeno, es posible que el carbono se combinara con él para formar metano ( $\text{CH}_4$ ); seguidamente, el nitrógeno e hidrógeno formarían amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), y el oxígeno e hidrógeno, agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Desde luego, el helio y el hidrógeno sobrantes escaparían; el agua formaría los océanos; el metano y el amoníaco constituirían la mayor parte de la atmósfera, pues al ser gases comparativamente pesados, quedarían sometidos a la gravitación terrestre.

Aunque los planetas poseyeran, en general, la gravitación suficiente para formar una atmósfera semejante, no todos podrían retenerla, ya que la radiación

ultravioleta emitida por el Sol introduciría ciertos cambios, cambios que serían ínfimos para los planetas externos, que, por una parte, reciben una radiación comparativamente escasa del lejano Sol, y, por otra, poseen vastas atmósferas, capaces de absorber una radiación muy considerable sin experimentar cambios perceptibles. Quiere ello decir que los planetas exteriores seguirán conservando su compleja atmósfera de hidrógeno-helio-amoníaco-metano.

Pero no ocurre lo mismo en los mundos interiores, como Marte, la Tierra, la Luna, Venus y Mercurio. Entre éstos, la Luna y Mercurio son demasiado pequeños, o demasiado cálidos, o ambas cosas, para retener una atmósfera perceptible. Por otro lado, tenemos a Marte, la Tierra y Venus, todos ellos con tenues atmósferas, integradas, principalmente, por amoníaco, metano y agua. ¿Qué habrá ocurrido aquí?

La radiación ultravioleta atacaría la atmósfera superior de la Tierra primigenia, desintegrando las moléculas de agua en sus dos componentes: hidrógeno y oxígeno («fotodisociación»). El hidrógeno escaparía, y quedaría el oxígeno: Ahora bien, como sus moléculas son reactivas, reaccionaría frente a casi todas las moléculas vecinas. Así, pues, se produciría una acción recíproca con el metano ( $\text{CH}_4$ ), para formar el anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) y el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ); asimismo, se originaría otra acción recíproca con el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), para producir nitrógeno libre ( $\text{N}_2$ ) y agua. Lenta, pero firmemente, la atmósfera pasaría del metano y el amoníaco al nitrógeno y el anhídrido carbónico. Más tarde, el nitrógeno tendería a reaccionar poco a poco con los minerales de la corteza terrestre, para formar nitrato, cediendo al anhídrido carbónico la mayor parte de la atmósfera.

Pero ahora podemos preguntarnos: ¿Proseguirá la fotodisociación del oxígeno en la atmósfera? Y si el oxígeno se concentra sin encontrar ningún reactivo (pues no puede haber una reacción adicional con el anhídrido carbónico), ¿no se agregará cierta proporción de oxígeno molecular al anhídrido carbónico existente? La respuesta es: ¡No!

Cuando el anhídrido carbónico llega a ser el principal componente de la atmósfera, la radiación ultravioleta no puede provocar más cambios mediante la dissociación de la molécula de agua. Tan pronto como empieza a concentrarse el oxígeno libre, se forma una sutil capa de ozono en la atmósfera superior, capa que absorbe los rayos

ultravioletas y, al interceptarles el paso hacia la atmósfera inferior, impide toda fotodisociación adicional. Una atmósfera constituida por anhídrido carbónico tiene estabilidad.

Pero el anhídrido carbónico produce el efecto de invernadero (Pág. 70). Si la atmósfera de anhídrido carbónico es tenue y dista mucho del Sol, dicho efecto será inapreciable. Éste es el caso de Marte, por ejemplo. Su atmósfera, compuesta principalmente por anhídrido carbónico, es más tenue que la terrestre. Si bien esa diferencia fue indeterminable, hasta que el satélite americano *Mariner IV* pasó por las cercanías de Marte, en julio de 1965. Hoy sabemos ya que la atmósfera marciana tiene una densidad equivalente, como máximo, a 1/100 de la terrestre.

Supongamos, empero, que la atmósfera de un planeta tiene más semejanza con la terrestre y dicho planeta se halla a la misma distancia del Sol o más cerca. Entonces el efecto de invernadero sería enorme: la temperatura se elevaría y vaporizaría los océanos con intensidad creciente. El vapor de agua se sumaría al efecto de invernadero, acelerando el cambio y liberando cantidades cada vez mayores de anhídrido carbónico, a causa de los efectos térmicos sobre la corteza. Por último, el planeta se caldearía enormemente, toda su agua pasaría a la atmósfera en forma de vapor, su superficie quedaría oculta bajo nubes eternas y circunda por una densa atmósfera de anhídrido carbónico.

Ése es, precisamente, el caso de Venus. La sonda americana que pasó cerca de este planeta en diciembre de 1962, ratificó un informe preliminar basado en la emisión de radioondas desde la atmósfera venusiana, a saber, que Venus tiene una temperatura bastante más elevada de lo que se había supuesto considerando su posición respecto al Sol. A principios de 1967, la Unión Soviética lanzó una serie de sondas hacia Venus, y en diciembre de 1970 logró colocar sobre la superficie de este planeta un artefacto cuyos instrumentos, aunque funcionaron durante un tiempo, quedaron destruidos, al fin, por la temperatura y las presiones. Así pues, la superficie de Venus tiene una temperatura de 500º C, es decir, próxima a la incandescencia, y su atmósfera, en la que predomina el anhídrido carbónico, es unas cien veces más densa que la terrestre.

Las cosas no se desarrollaron en la Tierra de la misma forma que en Marte o en Venus. El nitrógeno de su atmósfera no caló en la corteza para depositar una capa

fina y fría de anhídrido carbónico. Tampoco actuó el efecto de invernadero, para convertirla en un asfixiante mundo desértico. Aquí sucedió algo inopinado, y ese algo fue la aparición de la vida, cuyo desarrollo se hizo ostensible incluso cuando la atmósfera estaba aún en su fase de amoníaco-metano (véase capítulo XII).

Las reacciones desencadenadas por la vida en los océanos de la Tierra desintegraron los compuestos nitrogenados, los hicieron liberar el nitrógeno molecular y mantuvieron grandes cantidades de este gas en la atmósfera. Por añadidura, las células adquirieron una facultad especial para disociar el oxígeno e hidrógeno en las moléculas de agua, aprovechando la energía de esa luz *visible* que el ozono no puede interceptar. El hidrógeno se combinó con el anhídrido carbónico para formar las complicadas moléculas que constituyen una célula, mientras que el oxígeno liberado se diluyó en la atmósfera. Así, pues, gracias a la vida, la atmósfera terrestre pudo pasar del nitrógeno y anhídrido carbónico, al nitrógeno y oxígeno. El efecto de invernadero se redujo a una cantidad ínfima, y la Tierra conservó la frialdad suficiente para retener sus inapreciables posesiones: un océano de agua líquida y una atmósfera dotada con un gran porcentaje de oxígeno libre.

En realidad, nuestra atmósfera oxigenada afecta sólo a un 10 % aproximadamente de la existencia terrestre, y es posible incluso que, unos 600 millones de años atrás, esa atmósfera tuviera únicamente una décima parte del oxígeno que posee hoy.

Pero hoy lo tenemos, y debemos mostramos agradecidos por esa vida que hizo posible la liberación del oxígeno atmosférico, y por ese oxígeno que, a su vez, hizo posible la vida.

## Capítulo 5

### Los Elementos

#### **La Tabla Periódica**

Los primeros filósofos griegos, cuyo método de planteamiento de la mayor parte de los problemas era teórico y especulativo, llegaron a la conclusión que la Tierra estaba formada por unos cuantos «elementos» o sustancias básicas. Empédocles de Agerigento, alrededor del 430 a. de J.C., estableció que tales elementos eran cuatro: tierra, aire, agua y fuego. Un siglo más tarde, Aristóteles supuso que el cielo constituía un quinto elemento: el «éter». Los sucesores de los griegos en el estudio de la materia, los alquimistas medievales, aunque sumergidos en la magia y la charlatanería, llegaron a conclusiones más razonables y verosímiles que las de aquéllos, ya que por lo menos manejaron los materiales sobre los que especulaban. Tratando de explicar las diversas propiedades de las sustancias, los alquimistas atribuyeron dichas propiedades a determinados elementos, que añadieron a la lista. Identificaron el mercurio como el elemento que confería propiedades metálicas a las sustancias, y el azufre, como el que impartía la propiedad de la combustibilidad. Uno de los últimos y mejores alquimistas, el físico suizo del siglo XVI, Theophrastus Bombast von Hohenheim, más conocido por Paracelso, añadió la sal como el elemento que confería a los cuerpos su resistencia al calor.

Según aquellos alquimistas, una sustancia puede transformarse en otra simplemente añadiendo y sustrayendo elementos en las proporciones adecuadas. Un metal como el plomo, por ejemplo, podía transformarse en oro añadiéndole una cantidad exacta de mercurio. Durante siglos prosiguió la búsqueda de la técnica adecuada para convertir en oro un «metal base». En este proceso, los alquimistas descubrieron sustancias mucho más importantes que el oro, tales como los ácidos minerales y el fósforo.

Los ácidos minerales, nítrico, clorhídrico y especialmente, sulfúrico, introdujeron una verdadera revolución en los experimentos de la alquimia. Estas sustancias eran ácidos mucho más fuertes que el más fuerte conocido hasta entonces (el ácido acético, o sea, el del vinagre), y con ellos podían descomponerse las sustancias, sin necesidad de emplear altas temperaturas ni recurrir a largos períodos de espera.

Aún en la actualidad, los ácidos minerales, especialmente el sulfúrico, son muy importantes en la industria. Se dice incluso que el grado de industrialización de un país puede ser juzgado por su consumo anual de ácido sulfúrico.

De todas formas, pocos alquimistas se dejaron tentar por estos importantes éxitos secundarios, para desviarse de lo que ellos consideraban su búsqueda principal. Sin embargo, miembros poco escrupulosos de la profesión llegaron abiertamente a la estafa, simulando, mediante juegos de prestidigitación, producir oro, al objeto de conseguir lo que hoy llamaríamos «becas para la investigación» por parte de ricos mecenas. Este arte consiguió así tan mala reputación, que hasta la palabra «alquimista» tuvo que ser abandonada. En el siglo XVII, «alquimista» se había convertido en «químico», y «alquimia» había pasado a ser la ciencia llamada «Química».

En el brillante nacimiento de esta ciencia, uno de los primeros genios fue Robert Boyle, quien formuló la ley de los gases que hoy lleva su nombre (véase capítulo IV). En su obra *El químico escéptico (The Sceptical Chymist)*, publicada en 1661, Boyle fue el primero en establecer el criterio moderno por el que se define un elemento: una sustancia básica que puede combinarse con otros elementos para formar «compuestos» y que, por el contrario, no puede descomponerse en una sustancia más simple, una vez aislada de un compuesto.

Sin embargo, Boyle conservaba aún cierta perspectiva medieval acerca de la naturaleza de los elementos. Por ejemplo, creía que el oro no era un elemento y que podía formarse de algún modo a partir de otros metales. Las mismas ideas compartía su contemporáneo Isaac Newton, quien dedicó gran parte de su vida a la alquimia. (En realidad, el emperador Francisco José de Austria-Hungría financió experimentos para la fabricación de oro hasta fecha tan reciente como 1867.)

Un siglo después de Boyle, los trabajos prácticos realizados por los químicos empezaron a poner de manifiesto qué sustancias podrían descomponerse en otras simples y cuáles no podían ser descompuestas. Henry Cavendish demostró que el hidrógeno se combinaba con el oxígeno para formar agua de modo que ésta no podía ser un elemento. Más tarde, Lavoisier descompuso el aire, que se suponía entonces un elemento, en oxígeno y nitrógeno. Se hizo evidente que ninguno de los «elementos» de los griegos eran tales según el criterio de Boyle.

En cuanto a los elementos de los alquimistas, el mercurio y el azufre resultaron serlo en el sentido de Boyle, y también lo eran el hierro, el estaño, el plomo, el cobre, la plata, el oro y otros no metálicos, como el fósforo, el carbono y el arsénico. El «elemento» de Paracelso (la sal) fue descompuesto en dos sustancias más simples.

Desde luego, el que un elemento fuera definido como tal dependía del desarrollo alcanzado por la Química en la época. Mientras una sustancia no pudiera descomponerse con ayuda de las técnicas químicas disponibles, debía seguir siendo considerada como un elemento. Por ejemplo, la lista de 33 elementos formulada por Lavoisier incluía, entre otros, los óxidos de cal y magnesio. Pero catorce años después de la muerte de Lavoisier en la guillotina, durante la Revolución francesa, el químico inglés Humphry Davy, empleando una corriente eléctrica para escindir las sustancias, descompuso la cal en oxígeno y en un nuevo elemento, que denominó «calcio»; luego escindió el óxido de magnesio en oxígeno y otro nuevo elemento, al que dio el nombre de «magnesio».

Por otra parte, Davy demostró que el gas verde obtenido por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele a partir del ácido clorhídrico no era un compuesto de ácido clorhídrico y oxígeno, como se había supuesto, sino un verdadero elemento, al que denominó «cloro» (del griego *cloró*, verde amarillento).

A principios del siglo XIX, el químico inglés John Dalton contempló los elementos desde un punto de vista totalmente nuevo. Por extraño que parezca, esta perspectiva se remonta, en cierto modo, a la época de los griegos, quienes, después de todo, contribuyeron con lo que tal vez sea el concepto simple más importante para la comprensión de la materia.

Los griegos se planteaban la cuestión de si la materia era continua o discontinua, es decir, si podía ser dividida y subdividida indefinidamente en un polvo cada vez más fino, o si, al término de este proceso se llegaría a un punto en el que las partículas fuesen indivisibles. Leucipo de Mileto y su discípulo Demócrito de Abdera insistían, en el año 450 a. de J.C., en que la segunda hipótesis era la verdadera. Demócrito dio a estas partículas un nombre, las llamó «átomos» (o sea, «no divisibles»). Llegó incluso a sugerir que algunas sustancias estaban compuestas por diversos átomos o combinaciones de átomos, y que una sustancia podría convertirse en otra al ordenar

dichos átomos de forma distinta. Si tenemos en cuenta que esto es sólo una sutil hipótesis, no podemos por menos de sorprendernos ante la exactitud de su intuición. Pese a que la idea pueda parecer hoy evidente, estaban muy lejos de serlo en la época en que Platón y Aristóteles la rechazaron.

Sin embargo, sobrevivió en las enseñanzas de Epicuro de Samos, quien escribió sus obras hacia el año 300 a. de J.C., y en la escuela filosófica creada por él: el epicureísmo. Un importante epicúreo fue el filósofo romano Lucrecio, quien, sobre el año 60 a. de J.C., plasmó sus ideas acerca del átomo en un largo poema titulado *Sobre la naturaleza de las cosas*. Este poema sobrevivió a través de la Edad Media y fue uno de los primeros trabajos que se imprimieron cuando lo hizo posible el arte de Gutenberg.

La noción de los átomos nunca fue descartada por completo de las escuelas occidentales. Entre los atomistas más destacados en los inicios de la ciencia moderna figuran el filósofo italiano Giordano Bruno y el filósofo francés Pierre Gassendi. Muchos puntos de vista científicos de Bruno no eran ortodoxos, tales como la creencia en un Universo infinito sembrado de estrellas, que serían soles lejanos, alrededor de los cuales evolucionarían planetas, y expresó temerariamente sus teorías. Fue quemado, por hereje, en 1600 lo cual hizo de él un mártir de la Ciencia en la época de la revolución científica. Los rusos han dado su nombre a un cráter de la cara oculta de la Luna.

Las teorías de Gassendi impresionaron a Boyle, cuyos experimentos, reveladores que los gases podían ser fácilmente comprimidos y expandidos, parecían demostrar que estos gases debían de estar compuestos por partículas muy espaciadas entre sí. Por otra parte, tanto Boyle como Newton figuraron entre los atomistas más convencidos del siglo XVII.

Dalton demostró que las diversas normas que regían el comportamiento de los gases podían explicarse tomando como base la naturaleza atómica de la materia. (Reconoció la prioridad de Demócrito, al emplear la voz «átomo».) Según Dalton, cada elemento representaba un tipo particular de átomos, y cualquier cantidad de este elemento estaba formada por átomos idénticos de esta clase. Lo que distinguía a un elemento de otro era la naturaleza de sus átomos. Y la diferencia física básica entre los átomos radicaba en su peso. Así, los átomos de azufre eran más pesados

que los de oxígeno, los cuales, a su vez, eran más pesados que los de nitrógeno; éstos, más que los de carbono, y éstos más que los de hidrógeno.

El químico italiano Amedeo Avogadro aplicó a los gases la teoría atómica y demostró que volúmenes iguales de un gas, fuese cual fuese su naturaleza, estaban formados por el mismo número de partículas. Es la llamada «hipótesis de Avogadro». Al principio se creyó que estas partículas eran átomos; pero luego se demostró que estaban compuestas, en la mayor parte de los casos, por pequeños grupos de átomos, llamados «moléculas». Si una molécula contiene átomos de distintas clases (como la molécula de agua, que tiene un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno), es una molécula de un «compuesto químico». Naturalmente, era importante medir los pesos relativos de los distintos átomos, para hallar los «pesos atómicos» de los elementos. Pero los pequeños átomos se hallaban muy lejos de las posibilidades ponderables del siglo XIX. Mas, pesando la cantidad de cada elemento separado de un compuesto y haciendo deducciones a partir del comportamiento químico de los elementos, se pudieron establecer los pesos relativos de los átomos. El primero en realizar este trabajo de forma sistemática fue el químico sueco Jöns Jacob Berzelius. En 1828 publicó una lista de pesos atómicos basados en dos patrones de referencia: uno, el obtenido al dar al peso atómico del oxígeno el valor 100, y el otro, cuando el peso atómico del hidrógeno se hacía igual a 1.

El sistema de Berzelius no alcanzó inmediata aceptación; pero en 1860, en el I Congreso Internacional de Química, celebrado en Karlsruhe (Alemania), el químico italiano Stanislao Cannizzaro presentó nuevos métodos para determinar los pesos atómicos con ayuda de la hipótesis de Avogadro, menospreciada hasta entonces. Describió sus teorías de forma tan convincente, que el mundo de la Química quedó conquistado inmediatamente. Se adoptó como unidad de medida el peso del oxígeno en vez del de hidrógeno, puesto que el oxígeno podía ser combinado más fácilmente con los diversos elementos, y tal combinación era el punto clave del método usual para determinar los pesos atómicos-. El peso atómico del oxígeno fue medido convencionalmente, en 1850, por el químico belga Jean Servais Stas, quien lo fijó en 16, de modo que el peso atómico del hidrógeno, el elemento más ligero conocido hasta ahora, sería, aproximadamente, de 1; para ser más exactos: 1,0080.

Desde la época de Cannizzaro, los químicos han intentado determinar los pesos atómicos cada vez con mayor exactitud. Por lo que se refiere a los métodos puramente químicos, se llegó al punto culminante con los trabajos del químico norteamericano Theodore William Richards, quien, desde 1904, se dedicó a determinar los pesos atómicos con una exactitud jamás alcanzada. Por ello se le concedió el premio Nobel de Química en 1914. En virtud de los últimos descubrimientos sobre la constitución física de los átomos, las cifras de Richards han sido corregidas desde entonces y se les han dado valores aún más exactos. A lo largo del siglo XIX y pese a realizar múltiples investigaciones que implicaban la aceptación de las nociones de átomos y moléculas y a que, por lo general, los científicos estaban convencidos de su existencia, no se pudo aportar ninguna prueba directa que fuesen algo más que simples abstracciones convenientes. Algunos destacados científicos, como el químico alemán Wilhelm Ostwald, se negaron a aceptarlos. Para él eran conceptos útiles, pero no «reales».

La existencia real de las moléculas la puso de manifiesto el «movimiento browniano», que observó por vez primera, en 1827, el botánico escocés Robert Brown, quien comprobó que los granos de polen suspendidos en el agua aparecían animados de movimientos erráticos. Al principio se creyó que ello se debía a que los granos de polen tenían vida; pero, de forma similar, se observó que también mostraban movimiento pequeñas partículas de sustancias colorantes totalmente inanimadas.

En 1863 se sugirió por vez primera que tal movimiento sería debido a un bombardeo desigual de las partículas por las moléculas de agua circundantes. En los objetos macroscópicos no tendría importancia una pequeña desigualdad en el número de moléculas que incidieran de un lado u otro. Pero en los objetos microscópicos, bombardeados quizá por sólo unos pocos centenares de moléculas por segundo, un pequeño exceso, por uno u otro lado, podría determinar una agitación perceptible. El movimiento al azar de las pequeñas partículas constituye una prueba casi visible que el agua, y la materia en general, tiene «partículas».

Einstein elaboró un análisis teórico del movimiento browniano y demostró cómo se podía averiguar el tamaño de las moléculas de agua considerando la magnitud de los pequeños movimientos en zigzag de las partículas de colorantes. En 1908, el

científico francés Jean Perrin estudió la forma en que las partículas se posaban, como sedimento, en el agua, debido a la influencia de la gravedad. A esta sedimentación se oponían las colisiones determinadas por las moléculas procedentes de niveles inferiores, de modo que el movimiento browniano se oponía a la fuerza gravitatoria. Perrin utilizó este descubrimiento para calcular el tamaño de las moléculas de agua mediante la ecuación formulada por Einstein, e incluso Oswald tuvo que ceder en su postura. Estas investigaciones le valieron a Perrin, en 1926, el premio Nobel de Física.

Así, pues, los átomos se convirtieron, de abstracciones semimísticas, en objetos casi tangibles. En realidad, hoy podemos decir que, al fin, el hombre ha logrado «ver» el átomo. Ello se consiguió con el llamado «microscopio de campo iónico», inventado en 1955 por Erwin W. Mueller, de la Universidad de Pennsylvania. El aparato arranca iones de carga positiva a partir de la punta de una aguja finísima, iones que inciden contra una pantalla fluorescente, la cual da una imagen, ampliada 5 millones de veces, de la punta de la aguja. Esta imagen permite que se vea como un pequeño puntito brillante cada uno de los átomos que componen la punta. La técnica alcanzaría su máxima perfección cuando pudieran obtenerse imágenes de cada uno de los átomos por separado. En 1970, el físico americano Albert Victor Crewe informó que había detectado átomos sueltos de uranio y torio con ayuda del microscopio electrónico.

A medida que, durante el siglo XIX, fue aumentando la lista de los elementos, los químicos empezaron a verse envueltos en una intrincada maleza. Cada elemento tenía propiedades distintas, y no daban con ninguna fórmula que permitiera ordenar aquella serie de elementos. Puesto que la Ciencia tiene como finalidad el tratar de hallar un orden en un aparente desorden, los científicos buscaron la posible existencia de caracteres semejantes en las propiedades de los elementos.

En 1862, después de haber establecido Cannizzaro el peso atómico como una de las más importantes herramientas de trabajo de la Química, un geólogo francés (Alexandre-Émile Beguyer de Chancourtois) comprobó que los elementos se podían disponer en forma de tabla por orden creciente, según su peso atómico, de forma que los de propiedades similares se hallaran en la misma columna vertical. Dos años más tarde, un químico británico (John Alexander Reina Newlands) llegó a

disponerlos del mismo modo, independientemente de Beguyer. Pero ambos científicos fueron ignorados o ridiculizados. Ninguno de los dos logró ver impresas sus hipótesis. Muchos años más tarde, una vez reconocida universalmente la importancia de la tabla periódica, sus investigaciones fueron publicadas al fin. A Newlands se le concedió incluso una medalla.

El químico ruso Dmitri Ivanovich Mendeléiev fue reconocido, finalmente, como el investigador que puso orden en la selva de los elementos. En 1869, él y el químico alemán Julius Lothar Meyer propusieron tablas de los elementos que, esencialmente, se regían por las ideas de Chancourtois y Newlands. Pero Mendeléiev fue reconocido por la Ciencia, porque tuvo el valor y la confianza de llevar sus ideas más allá que los otros.

En primer lugar, la tabla periódica «de Mendeléiev», llamada «periódica» porque demostraba la repetición periódica de propiedades químicas similares, era más complicada que la de Newlands y más parecida a la que hoy estimamos como correcta. En segundo lugar, cuando las propiedades de un elemento eran causa que no conservara el orden establecido en función de su peso atómico, cambiaba resueltamente el orden, basándose en que las propiedades eran más importantes que el peso atómico. Se demostró que ello era correcto. Por ejemplo, el telurio, con un peso atómico de 127,60, debería estar situado, en función de los pesos, después del yodo, cuyo peso atómico es de 126,90; pero en la tabla dispuesta en columnas, cuando se coloca el telurio delante del yodo, se halla bajo el selenio, que se asemeja mucho a él, y, del mismo modo, el yodo aparece debajo de su afín el bromo.

Finalmente, y esto es lo más importante, cuando Mendeléiev no conseguía que los elementos encajaran bien en el sistema no vacilaba en dejar espacios vacíos en la tabla y anunciar, con lo que parecía un gran descaro, que faltaban por descubrir elementos, los cuales llenarían los vacíos. Pero fue aún más lejos. Describió el elemento que correspondería a cada uno de tres vacíos, utilizando como guía las propiedades de los elementos situados por encima y por debajo del vacío en la tabla. Aquí, Mendeléiev mostróse genialmente intuitivo. Los tres elementos predichos fueron encontrados, ya en vida de Mendeléiev. Por lo cual pudo asistir al triunfo de su sistema. En 1875, el químico francés Lecoq de Boisbaudran descubrió

el primero de dichos elementos, al que denominó «gálio» (del latín *gallium*, Francia). En 1879, el químico sueco Lars Fredrik Nilson encontró el segundo, y lo llamó «escandio» (por Escandinavia). Y en 1886, el químico alemán Clemens Alexander Winkler aisló el tercero y lo denominó «germanio» (naturalmente, por Germania). Los tres elementos mostraban casi las mismas propiedades que predijo Mendeléiev.

Con el descubrimiento de los rayos X<sup>2</sup> se abrió una nueva Era en la historia de la tabla periódica. En 1911, el físico británico Charles Glover Barkla descubrió que cuando los rayos X se dispersaban al atravesar un metal, dichos rayos, reflectados, tenían un sensible poder de penetración, que dependía de la naturaleza del metal. En otras palabras, que cada elemento producía sus «rayos X característicos».

Por este descubrimiento, Barkla fue galardonado con el premio Nobel de Física en 1971.

Existían algunas dudas sobre si los rayos X eran corrientes de pequeñas partículas o consistían en radiaciones de carácter ondulatorio similares, en este sentido, a la luz. Una manera de averiguarlo era el comprobar si los rayos X podían ser difractados (es decir, forzados a cambiar de dirección) mediante un dispositivo difractante, constituido por una serie de finas líneas paralelas. Sin embargo, para una difracción adecuada, la distancia entre las líneas debe ser igual al tamaño de las ondas de la radiación. El conjunto de líneas más tupido que podía prepararse era suficiente para la luz ordinaria; pero el poder de penetración de los rayos X permitía suponer como probable, admitiendo que dichos rayos fuesen de naturaleza ondulatoria, que las ondas eran mucho más pequeñas que las de la luz. Por tanto, ningún dispositivo de difracción usual bastaba para difractar los rayos X.

Sin embargo, el físico alemán Max Theodore Felix von Laue observó que los cristales constituían una retícula de difracción natural mucho más fina que cualquiera de los fabricados por el hombre. Un cristal es un cuerpo sólido de forma claramente geométrica, cuyas caras planas se cortan en ángulos determinados, de simetría característica. Esta visible regularidad es el resultado de una ordenada disposición de los átomos que forman su estructura. Había razones para creer que el espacio

---

<sup>2</sup> En honor a su descubridor, que, por humildad, dio a estos rayos el nombre incógnito de «X», cada día se tiende más a denominarlos rayos Roentgen (por Wilhelm Konrad Roentgen, físico alemán). (N. del T.)

entre una capa de átomos y la siguiente tenía, aproximadamente, las dimensiones de una longitud de onda de los rayos X. De ser así, los cristales difractarían los rayos X.

En sus experimentos, Laue comprobó que los rayos X que pasaban a través de un cristal eran realmente difractados y formaban una imagen sobre una placa fotográfica, que ponía de manifiesto su carácter ondulatorio. En el mismo año, el físico inglés William Lawrence Bragg y su padre, William Henry Bragg, desarrollaron un método exacto para calcular la longitud de onda de un determinado tipo de rayos X, a partir de su imagen de difracción. A la inversa, se emplearon imágenes de difracción de rayos X para determinar la orientación exacta de las capas de átomos que causaban su difracción. De este modo, los rayos X abrieron la puerta a una nueva comprensión de la estructura atómica de los cristales. Por su trabajo sobre los rayos X, Laue recibió el premio Nobel de Física en 1914, mientras que los Bragg lo compartieron en 1915.

En 1914, el joven físico inglés Henry Gwyn-Jeffreys Moseley determinó las longitudes de onda de los característicos rayos X producidos por diversos metales, e hizo el importante descubrimiento que la longitud de onda disminuía de forma regular al avanzar en la tabla periódica.

Ello permitió situar de manera definitiva los elementos en la tabla. Si dos elementos, supuestamente adyacentes en la tabla, emitían rayos X cuyas longitudes de onda diferían en una magnitud doble de la esperada, debía de existir un vacío entre ellos, perteneciente a un elemento desconocido. Si diferían en una magnitud tres veces superior a la esperada, debían de existir entre ellos dos elementos desconocidos. Si, por otra parte, las longitudes de onda de los rayos X característicos de los dos elementos diferían sólo en el valor esperado, podía tenerse la seguridad que no existía ningún elemento por descubrir entre los otros dos.

Por tanto, se podía dar números definitivos a los elementos. Hasta entonces había cabido siempre la posibilidad que un nuevo descubrimiento rompiera la secuencia y trastornara cualquier sistema de numeración adoptado. Ahora ya no podían existir vacíos inesperados.

Los químicos procedieron a numerar los elementos desde el 1 (hidrógeno) hasta el 92 (uranio).

1 1.00797		PESO ATÓMICO ELECTRONEGATIVIDAD	
NÚMERO ATÓMICO	SÍMBOLO DEL ELEMENTO	NOMBRE DEL ELEMENTO	NÚMERO DE OXIDACIÓN
1 H 2.1	H	HIDROGENO	1, -1
2 He 2.0	He	HELIO	-259.2
3 Li 6.979	Li	LITIO	-252.7
4 Be 9.0122	Be	BERÍLIO	0.0709
5 B 10.8116	B	BORO	1, 2
6 C 12.01117	C	CARBONO	2, 3
7 N 14.000968	N	NITROGENO	3, 0
8 O 15.99949	O	OXYGENO	2, 1
9 F 18.99846	F	FLUORO	3, 0
10 Ne 20.183	Ne	NEON	-259.7
11 Na 22.98989	Na	SODIO	1, 1
12 Mg 24.312	Mg	MAGNESIO	-252.7
13 Al 26.98154	Al	ALUMINIO	1, 3
14 Si 28.08552	Si	SILICONIO	4
15 P 30.97376	P	FOSFORO	3, 5
16 S 32.06459	S	SULFURIO	2, 5
17 Cl 35.45358	Cl	CLORO	3, 0
18 Ar 39.948	Ar	ARGON	-259.8
19 K 39.971102	K	POTASIO	1, 1
20 Ca 40.072020	Ca	CALCIO	0.0709
21 Sc 41.982021	Sc	ESTRONDO	1, 2
22 Ti 44.959222	Ti	TITANIO	1, 0
23 V 51.996224	V	VANADIO	1, 0
24 Cr 55.947226	Cr	CRISTALINO	1, 0
25 Mn 54.938226	Mn	MANGANEZO	1, 0
26 Fe 55.942226	Fe	FERRO	1, 0
27 Co 58.932226	Co	COPRIO	1, 0
28 Ni 58.932226	Ni	NICKEL	1, 0
29 Cu 63.927228	Cu	COPRIO	1, 0
30 Zn 65.434230	Zn	ZINC	1, 0
31 Ga 65.437231	Ga	GALIO	1, 0
32 Ge 65.437231	Ge	GERMANIO	1, 0
33 As 73.937233	As	ARSENICO	3, 0
34 Se 74.937233	Se	SELENO	2, 1
35 Br 75.937235	Br	BROMO	2, 0
36 Kr 78.937236	Kr	KRÍPTON	1, 0
37 Rb 85.937237	Rb	RUBIDIUM	1, 0
38 Sr 87.937238	Sr	SODIO	1, 0
39 Y 88.937239	Y	ITRIO	1, 0
40 Zr 89.937239	Zr	ZIRCONIO	1, 0
41 Nb 91.937239	Nb	NÍBICO	1, 0
42 Mo 95.94342	Mo	MOLIBDENO	1, 0
43 Tc 97.94442	Tc	TECNICIO	1, 0
44 Ru 101.9745	Ru	RUTENIO	1, 0
45 Rh 102.956246	Rh	RHÓDIO	1, 0
46 Pd 106.94747	Pd	PALADIO	1, 0
47 Ag 106.94747	Ag	PLATINO	1, 0
48 Cd 106.94747	Cd	CADMIO	1, 0
49 In 107.9748	In	INDIO	1, 0
50 Sn 111.9748	Sn	ESTANIO	1, 0
51 Te 114.9748	Te	TELURIO	1, 0
52 At 115.9748	At	ASTATO	1, 0
53 Rn 127.9552	Rn	RADON	1, 0
54 Po 131.9552	Po	POLONIO	1, 0
55 Cs 132.9556	Cs	CAESIO	0.0709
56 Ba 133.9556	Ba	BARIUMO	0.0709
57 La 133.9556	La	LANTANIO	0.0709
58 Ce 140.15159	Ce	CECIO	0.0709
59 Pr 140.15007	Pr	PRASEOCIO	0.0709
60 Nd 144.12461	Nd	NEODIO	1, 1
61 Pm 147.12461	Pm	PARMEÍTO	1, 1
62 Sm 152.12461	Sm	SAMARIO	1, 1
63 Eu 151.96164	Eu	EUROPIO	1, 1
64 Gd 157.12565	Gd	GAUDIUMO	1, 1
65 Tb 162.12567	Tb	TERBIO	1, 1
66 Dy 164.12567	Dy	DÍSFRIO	1, 1
67 Ho 165.12567	Ho	HOLMIOMO	1, 1
68 Er 166.12567	Er	ERBIO	1, 1
69 Tm 167.12567	Tm	TERBIO	1, 1
70 Yb 168.12567	Yb	YTBIO	1, 1
71 Lu 173.0171	Lu	LUTENIO	1, 1
72 LANTANIDOS			
73 Th 222.039191	Th	TORIO	4
74 Pa 223.039191	Pa	PROTACTINIO	4, 5
75 U 224.039191	U	URANIO	3, 4
76 Np 235.039191	Np	NEUTRINO	3, 4
77 Pu 239.039191	Pu	PLUTONIO	3, 4
78 Am 243.039191	Am	AMERIGO	3, 4
79 Cm 247.039191	Cm	CURIUMO	3, 4
80 Bk 247.039191	Bk	BERKELEIO	3, 4
81 Cf 247.039191	Cf	CALIFORNIO	3, 4
82 Es 247.039191	Es	ENISTENO	3, 4
83 Fm 247.039191	Fm	FERMIO	3, 4
84 Md 247.039191	Md	MENGELLETO	3, 4
85 No 247.039191	No	NOBELIO	3, 4
86 Lr 247.039191	Lr	LAWRENCEO	3, 4
87 ACTINIDOS			

Tabla periódica de los elementos. Las tablas adicionales representan las dos series de tierras raras: los lantánidos y los actínidos, denominados según sus primeros miembros respectivos.

Estos «números atómicos» resultaron significativos en relación con la estructura interna de los átomos (véase capítulo VI), y de una importancia más fundamental

que el peso atómico. Por ejemplo, los datos proporcionados por los rayos X de mostraron que Mendeléiev había tenido razón al colocar el telurio (de número atómico 52) antes del yodo (53), pese a ser mayor el peso atómico del telurio.

El nuevo sistema de Moseley demostró su valor casi inmediatamente. El químico francés Georges Urbain, tras descubrir el «lutecio» (por el nombre latino de Paris, *Lutecia*); anunció que acababa de descubrir otro elemento, al que llamó «celtio». De acuerdo con el sistema de Moseley, el lutecio era el elemento 71, y el celtio debía ser el 72. Pero cuando Moseley analizó los rayos X característicos del celtio, resultó que se trataba del mismo lutecio. El elemento 72 no fue descubierto realmente hasta 1923, cuando el físico danés Dirk Coster y el químico húngaro Georg von Hevesy lo detectaron en un laboratorio de Copenhague. Lo denominaron «hafnio», por el nombre latinizado de Copenhague.

Pero Moseley no pudo comprobar la exactitud de su método, pues había muerto en Gallípoli, en 1915, a los veintiocho dos de edad. Fue uno de los cerebros más valiosos perdidos en la Primera Guerra Mundial. Ello le privó también, sin duda, del premio Nobel. El físico sueco Karl Manne George Siegbahn amplió el trabajo de Moseley, al descubrir nuevas series de rayos X y determinar con exactitud el espectro de rayos X de los distintos elementos. En 1924 fue recompensado con el premio Nobel de Física.

En 1925, Walter Noddack, Ida Tacke y Otto Berg, de Alemania, llenaron otro vacío en la tabla periódica. Después de tres años de investigar los minerales que contenían elementos relacionados con el que estaban buscando, descubrieron el elemento 75, al que dieron el nombre de «renio», en honor del río Rin. De este modo se reducían a cuatro los espacios vacíos: correspondían a los elementos 43, 61, 85 y 87.

Fueron necesarias dos décadas para encontrarlos. A pesar que los químicos de entonces no se percataron de ello, habían hallado el último de los elementos estables. Los que faltaban eran especies inestables tan raras hoy en la Tierra, que todas menos una tuvieron que ser creadas en el laboratorio para identificarlas. Y este descubrimiento va asociado a una historia.

## Elementos Radiactivos

Tras el descubrimiento de los rayos X, muchos científicos se sintieron impulsados a investigar estas nuevas radiaciones, tan espectacularmente penetrantes. Uno de ellos fue el físico francés Antoine-Henri Becquerel. El padre de Henri, Alexandre Edmond (el físico que fotografió por vez primera el espectro solar), se había mostrado especialmente interesado en la «florescencia», o sea, la radiación visible emitida por sustancias después de ser expuestas a los rayos ultravioletas de la luz solar.

Becquerel padre había estudiado, en particular, una sustancia fluorescente llamada sulfato de uranilo potásico (compuesto formado por moléculas, cada una de las cuales contiene un átomo de uranio). Henri se preguntó si las radiaciones fluorescentes del sulfato de uranilo potásico contenían rayos X. La forma de averiguarlo consistía en exponer el sulfato al sol (cuya luz ultravioleta estimularía la fluorescencia), mientras el compuesto permanecía sobre una placa fotográfica envuelta en papel negro. Puesto que la luz solar no podía penetrar a través del papel negro, no afectaría a la placa; pero si la fluorescencia producida por el estímulo de la luz solar contenía rayos X, éstos *penetrarían* a través del papel e impresionarían la placa. Becquerel realizó con éxito su experimento en 1896. Aparentemente, había rayos X en la fluorescencia. Becquerel logró incluso que los supuestos rayos X pasasen a través de delgadas láminas de aluminio y cobre, y los resultados parecieron confirmar definitivamente su hipótesis, puesto que no se conocía radiación alguna, excepto la de los rayos X, que pudiese hacerlo.

Pero entonces, lo cual fue una suerte, el Sol quedó oculto por densos nubarrones. Mientras esperaba que se disiparan las nubes, Becquerel retiró las placas fotográficas, con los trocitos de sulfato sobre ellas, y las puso en un secador. Al cabo de unos días, impaciente, decidió a toda costa revelar las placas, en la creencia de que, incluso sin la luz solar directa, se podía haber producido alguna pequeña cantidad de rayos X. Cuando vio las placas impresionadas, Becquerel vivió uno de esos momentos de profunda sorpresa y felicidad que son los sueños de todos los científicos. La placa fotográfica estaba muy oscurecida por una intensa radiación. La causa no podía ser la fluorescencia ni la luz solar. Becquerel llegó a la conclusión, y los experimentos lo confirmarían muy pronto, que esta causa era el propio uranio contenido en el sulfato de uranilo potásico.

Este descubrimiento impresionó profundamente a los científicos, excitados aún por el reciente hallazgo de los rayos X. Uno de los científicos que se puso inmediatamente a investigar la extraña radiación del uranio fue una joven químico, nacida en Polonia y llamada Marie Skłodowska, que al año anterior había contraído matrimonio con Pierre Curie, el descubridor de la temperatura que lleva su nombre (véase capítulo IV).

Pierre Curie, en colaboración con su hermano Jacques, había descubierto que ciertos cristales, sometidos a presión, desarrollaban una carga eléctrica positiva en un lado y negativa en el otro. Este fenómeno se denomina «piezoelectricidad» (de la voz griega que significa «comprimir»). Marie Curie decidió medir, con ayuda de la piezoelectricidad, la radiación emitida por el uranio. Instaló un dispositivo, al que fluiría una corriente cuando la radiación ionizase el aire entre dos electrodos; y la potencia de esta pequeña corriente podría medirse por la cantidad de presión que debía ejercerse sobre un cristal tan efectivo, que Pierre Curie abandonó en seguida su trabajo, y durante el resto de su vida, junto con Marie, se dedicó a investigar ávidamente en este campo.

Marie Curie fue la que propuso el término de «radioactividad» para describir la capacidad que tiene el uranio de emitir radiaciones, y la que consiguió demostrar el fenómeno en una segunda sustancia radioactiva: el torio. En rápida sucesión, otros científicos hicieron descubrimientos de trascendental importancia. Las radiaciones de las sustancias radioactivas se mostraron más penetrantes y de mayor energía que los rayos X; hoy se llama «rayos gamma». Se descubrió que los elementos radioactivos emitían también otros tipos de radiación, lo cual condujo a descubrimientos sobre la estructura interna del átomo. Pero esto lo veremos en el capítulo VI. Lo que nos interesa destacar aquí es el descubrimiento que los elementos radioactivos, al emitir la radiación, se transformaban en otros elementos (o sea, era una versión moderna de la transmutación).

Marie Curie descubrió, aunque de forma accidental, las implicaciones de este fenómeno. Cuando ensayaba la pechblenda en busca de su contenido de uranio, al objeto de comprobar si las muestras de la mena tenían el uranio suficiente para hacer rentable la labor del refinado, ella y su mando descubrieron, con sorpresa, que algunos de los fragmentos tenían más radioactividad de la esperada, aunque

estuviesen hechos de uranio puro. Ello significaba que en la pechblenda habían de hallarse otros elementos radiactivos, aunque sólo en pequeñas cantidades (oligoelementos), puesto que el análisis químico usual no los detectaba; pero, al mismo tiempo, debían ser muy radiactivos.

Entusiasmados, los Curie adquirieron toneladas de pechblenda, construyeron un pequeño laboratorio en un cobertizo y, en condiciones realmente primitivas, procedieron a desmenuzar la pesada y negra mena, en busca de los nuevos elementos. En julio de 1898 habían conseguido aislar un polvo negro 400 veces más radiactivo que la cantidad equivalente de uranio.

Este polvo contenía un nuevo elemento, de propiedades químicas parecidas a las del telurio, por lo cual debía colocarse bajo este en la tabla periódica. (Más tarde se le dio el número atómico 84.) Los Curie lo denominaron «polonio», en honor al país natal de Marie.

Pero el polonio justificaba sólo una parte de la radiactividad. Siguieron nuevos trabajos, y en diciembre de 1898, los Curie habían obtenido un preparado que era incluso más radiactivo que el polonio. Contenía otro elemento, de propiedades parecidas a las del bario (y, eventualmente, se puso debajo de éste, con el número atómico 88.) Los Curie lo llamaron «radio», debido a su intensa radiactividad.

Siguieron trabajando durante cuatro años más, para obtener una cantidad de radio puro que pudiese apreciarse a simple vista. En 1903, Marie Curie presentó un resumen de su trabajo como tesis doctoral. Tal vez la mejor tesis de la historia de la Ciencia. Ello le supuso no sólo uno, sino dos premios Nobel. Marie y su marido, junto con Becquerel, recibieron, en 1903, el de Física, por sus estudios sobre la radiactividad, y, en 1911, Marie, su marido había muerto en 1906, en accidente de circulación, fue galardonada con el de Química por el descubrimiento del polonio y el radio.

El polonio y el radio son mucho más inestables que el uranio y el torio, lo cual es otra forma de decir que son mucho más radiactivos. En cada segundo se desintegra mayor número de sus átomos. Sus vidas son tan cortas, que prácticamente todo el polonio y el radio del Universo deberían haber desaparecido en un millón de años. Por tanto, ¿cómo seguimos encontrándolo en un planeta que tiene miles de millones de años de edad? La respuesta es que el radio y el polonio se van formando

continuamente en el curso de la desintegración del uranio y el torio, para acabar por transformarse en plomo. Dondequiera que se hallen el uranio y el torio, se encuentran siempre indicios de polonio y radio. Son productos intermedios en el camino que conduce al plomo como producto final.

El detenido análisis de la pechblenda y las investigaciones de las sustancias radiactivas permitieron descubrir otros tres elementos inestables en el camino que va del uranio y el torio hasta el plomo. En 1899, André-Louis Debierne, siguiendo el consejo de los Curie, buscó otros elementos en la pechblenda y descubrió uno, al que denominó «actinio» (de la voz griega que significa «rayo»); se le dio el número atómico 89. Al año siguiente, el físico alemán Friedrich Ernst Dorn demostró que el radio, al desintegrarse, formaba un elemento gaseoso. ¡Un gas radiactivo era algo realmente nuevo! El elemento fue denominado «radón» (de radio y argón, su afín químico), y se le dio el número atómico 86. Finalmente, en 1917, dos grupos distintos, Otto Hahn y Lise Meitner, en Alemania, y Frederick Soddy y John A. Cranston, en Inglaterra, aislaron, a partir de la pechblenda, el elemento 91, denominado protactnio.

Por tanto, en 1925 había 88 elementos identificados: 81 estables, y 7 inestables. Se hizo más acuciante la búsqueda de los cuatro que aún faltaban: los números 43, 61, 85 y 87.

Puesto que entre los elementos conocidos había una serie radiactiva, los números 84 al 92, podía esperarse que también lo fueran el 85 y el 87. Por otra parte, el 43 y el 61 estaban rodeados por elementos estables, y no parecía haber razón alguna para sospechar que no fueran, a su vez, estables. Por tanto, deberían de encontrarse en la Naturaleza.

Respecto al elemento 43, situado inmediatamente encima del renio en la tabla periódica, se esperaba que tuviese propiedades similares y que se encontrase en las mismas menas. De hecho, el equipo de Noddack, Tacke y Berg, que había descubierto el renio, estaba seguro de haber dado también con rayos X de una longitud de onda que debían de corresponder al elemento 43. Así, pues, anunciaron su descubrimiento, y lo denominaron «masurio» (por el nombre de una región de la Prusia Oriental). Sin embargo, su identificación no fue confirmada, y, en Ciencia, un

descubrimiento no se considera como tal hasta que haya sido confirmado, como mínimo, por un investigador independiente.

En 1926, dos químicos de la Universidad de Illinois anunciaron que habían encontrado el elemento 61 en menas que contenían los elementos vecinos (60 y 62), y lo llamaron «illinio». El mismo año, dos químicos italianos de la Universidad de Florencia creyeron haber aislado el mismo elemento, que bautizaron con el nombre de «florencio». Pero el trabajo de ambos grupos no pudo ser confirmado por ningún otro.

Años más tarde, un físico del Instituto Politécnico de Alabama, utilizando un nuevo método analítico de su invención, informó haber encontrado indicios de los elementos 87 y 85, a los que llamó «virginio» y «alabaminio», en honor, respectivamente, de sus estados natal y de adopción. Pero tampoco pudieron ser confirmados estos descubrimientos.

Los acontecimientos demostrarían que, en realidad, no se habían descubierto los elementos 43, 61, 85 y 87.

El primero en ser identificado con toda seguridad fue el elemento 43. El físico estadounidense Ernest Orlando Lawrence, quien más tarde recibiría el premio Nobel de Física como inventor del ciclotrón (véase capítulo VI), obtuvo el elemento en su acelerador mediante el bombardeo de molibdeno (elemento 42) con partículas a alta velocidad. El material bombardeado mostraba radiactividad, y Lawrence lo remitió al químico italiano Emilio Gino Segrè, quien estaba interesado en el elemento 43, para que lo analizase. Segrè y su colega C. Perrier, tras separar la parte radiactiva del molibdeno, descubrieron que se parecía al renio en sus propiedades. Y decidieron que sólo podía ser el elemento 43, elemento que contrariamente a sus vecinos de la tabla periódica, era radiactivo. Al no ser producidos por desintegración de un elemento de mayor número atómico, apenas quedan indicios del mismo en la corteza terrestre, por lo cual, Noddack y su equipo estaban equivocados al creer que lo habían hallado. Segrè y Perrier tuvieron el honor de bautizar el elemento 43; lo llamaron «tecnecio», tomado de la voz griega que significa «artificial», porque éste era el primer elemento fabricado por el hombre. Hacia 1960 se había acumulado ya el tecnecio suficiente para determinar su punto de fusión: cercano a los 2.200º C. (Segrè recibió posteriormente el premio Nobel por otro

descubrimiento, relacionado también con materia creada por el hombre [véase capítulo VI].)

Finalmente, en 1939, se descubrió en la Naturaleza el elemento 87. La química francesa Marguerite Perey lo aisló entre los productos de desintegración del uranio. Se encontraba en cantidades muy pequeñas, y sólo los avances técnicos permitieron encontrarlo donde antes había pasado inadvertido. Dio al nuevo elemento el nombre de «francio», en honor de su país natal.

El elemento 85, al igual que el tecnecio, fue producido en el ciclotrón bombardeando bismuto (elemento 83). En 1940, Segrè, Dale Raymond Corson y K. R. MacKenzie aislaron el elemento 85 en la Universidad de California, ya que Segrè había emigrado de Italia a los Estados Unidos. La Segunda Guerra Mundial interrumpió su trabajo sobre este elemento; pero, una vez acabada la contienda, el equipo reanudó su labor, y, en 1947, propuso para el elemento el nombre de «astato» (de la palabra griega que significa «inestable.») (Para entonces se habían encontrado en la Naturaleza pequeños restos de astato, como en el caso del francio, entre los productos de desintegración del uranio.)

Mientras tanto, el cuarto y último elemento de los que faltaban por descubrir (el 61) se había hallado entre los productos de fisión del uranio, proceso que explicamos en el capítulo IX. (También el tecnecio se encontró entre estos productos.) En 1945, tres químicos del Oak Ridge National Laboratory, J. A. Marinsky, L. E. Glendenin y Charles Dubois Coryell, aislaron el elemento 61. Lo denominaron «promecio» (*promethium*, voz inspirada en el nombre del dios Prometeo, que había robado su fuego al Sol para entregarlo a la Humanidad), después de todo, el elemento 61 había sido «robado» a partir de los fuegos casi solares del horno atómico.

De este modo se completó la lista de los elementos, del 1 al 92. Sin embargo, en cierto sentido, la parte más extraña de la aventura acababa sólo de empezar, porque los científicos habían rebasado los límites de la tabla periódica; el uranio no era el fin.

Ya en 1934 había comenzado la búsqueda de los elementos situados más allá del uranio, o sea, los elementos «transuránicos». En Italia, Enrico Fermi comprobó que cuando bombardeaba un elemento con una partícula subatómica, recientemente descubierta, llamada «neutrón» (véase capítulo VI), ésta transformaba a menudo el

elemento en el de número atómico superior más próximo. ¿Era posible que el uranio se transformase en el elemento 93, completamente sintético, que no existía en la Naturaleza? El equipo de Fermi procedió a bombardear el uranio con neutrones y obtuvo un producto que al parecer, era realmente el elemento 93. Se le dio el nombre de «uranio X».

En 1938, Fermi recibió el premio Nobel de Física por sus estudios sobre el bombardeo con neutrones. Por aquella fecha, ni siquiera podía sospecharse la naturaleza real de su descubrimiento, ni sus consecuencias para la Humanidad. Al igual que Cristóbal Colón, había encontrado, no lo que estaba buscando, sino algo mucho más valioso, pero de cuya importancia no podía percatarse.

Baste decir, por ahora, que, tras seguir una serie de pistas que no condujeron a ninguna parte, descubrióse, al fin, que lo que Fermi había conseguido no era la creación de un nuevo elemento, sino la escisión del átomo de uranio en dos partes casi iguales. Cuando, en 1940, los físicos abordaron de nuevo el estudio de este proceso, el elemento 93 surgió como un resultado casi fortuito de sus experimentos. En la mezcla de elementos que determinaba el bombardeo del uranio por medio de neutrones aparecía uno que, de principio, resistió todo intento de identificación. Entonces, Edwin McMillan, de la Universidad de California, sugirió que quizás los neutrones liberados por fisión hubiesen convertido algunos de los átomos de uranio en un elemento de número atómico más alto, como Fermi había esperado que ocurriese. McMillan y Philip Abelson, un físicoquímico, probaron que el elemento no identificado era, en realidad, el número 93. La prueba de su existencia la daba la naturaleza de su radiactividad, lo mismo que ocurriría en todos los descubrimientos subsiguientes.

McMillan sospechaba que pudiera estar mezclado con el número 93 otro elemento transuránico. El químico Glenn Theodore Seaborg y sus colaboradores Arthur Charles Wahl y J.W. Kennedy no tardaron en demostrar que McMillan tenía razón y que dicho elemento era el número 94.

De la misma forma que el uranio, elemento que se suponía el último de la tabla periódica, tomó su nombre de Urano, el planeta recientemente descubierto a la sazón, los elementos 93 y 94 fueron bautizados, respectivamente como «neptunio» y «plutonio», por Neptuno y Plutón, planetas descubiertos después de Urano. Y

resultó que existía en la Naturaleza, pues más tarde se encontraron indicios de los mismos en menas de uranio. Así, pues, el uranio no era el elemento natural de mayor peso atómico.

Seaborg y un grupo de investigadores de la Universidad de California, entre los cuales destacaba Albert Ghiorso, siguieron obteniendo, uno tras otro, nuevos elementos transuránicos. Bombardeando plutonio con partículas subatómicas, crearon, en 1944, los elementos 95 y 96, que recibieron, respectivamente, los nombres de «americio» (por América) y «curio» (en honor de los Curie). Una vez obtenida una cantidad suficiente de americio y curio, bombardearon estos elementos y lograron obtener, en 1949, el número 97, y, en 1950, el 98. Estos nuevos elementos fueron llamados «berkelio» y «californio» (por Barkeley y California). En 1951, Seaborg y McMillan compartieron el premio Nobel de Química por esta serie de descubrimientos. El descubrimiento de los siguientes elementos fue el resultado de unas investigaciones y pruebas menos pacíficas. Los elementos 99 y 100 surgieron en la primera explosión de una bomba de hidrógeno, la cual se llevó a cabo en el Pacífico, en noviembre de 1952. Aunque la existencia de ambos fue detectada en los restos de la explosión, no se confirmó ni se les dio nombre basta después que el grupo de investigadores de la Universidad de California obtuvo en su laboratorio, en 1955, pequeñas cantidades de ambos. Fueron denominados, respectivamente, «einstenio» y «fermio», en honor de Albert Einstein y Enrico Fermi, ambos, muertos unos meses antes. Después, los investigadores bombardearon una pequeña cantidad de «einstenio» y obtuvieron el elemento 101, al que denominaron «mendelevio», por Mendeléiev.

El paso siguiente llegó a través de la colaboración entre California y el Instituto Nobel de Suecia. Dicho instituto llevó a cabo un tipo muy complicado de bombardeo que produjo, aparentemente, una pequeña cantidad del elemento 102. Fue llamado «nobelio» en honor del Instituto; pero el experimento no ha sido confirmado. Se había obtenido con métodos distintos de los descritos por el primer grupo de investigadores. Mas, pese a que el «nobelio» no ha sido oficialmente aceptado como el nombre del elemento, no se ha propuesto ninguna otra denominación.

En 1961 se detectaron algunos átomos del elemento 103 en la Universidad de California, a los cuales se les dio el nombre de «laurencio» (por E. O. Lawrence, que

había fallecido recientemente). En 1964, un grupo de científicos soviéticos, bajo la dirección de Georguei Nikolaievich Flerov, informó sobre la obtención del elemento 104, y en 1965, sobre la del 105. En ambos casos, los métodos usados para formar los elementos no pudieron ser confirmados. El equipo americano dirigido por Albert Ghioso obtuvo también dichos elementos, independientemente de los soviéticos. Entonces se planteó la discusión acerca de la prioridad; ambos grupos reclamaban el derecho de dar nombre a los nuevos elementos. El grupo soviético llamó al elemento 101 «kurchatovio», en honor de Igor Vasilievich Kurchatov, el cual había dirigido al equipo soviético que desarrolló la bomba atómica rusa, y que murió en 1960. Por su parte, el grupo americano dio al elemento 104 el nombre de «rutherfordio», y al 105, el de «hahnio», en honor, respectivamente, de Ernest Rutherford y Otto Hahn, los cuales dieron las claves para los descubrimientos de la estructura subatómica.

Cada paso de este ascenso por la escala transuránica fue más difícil de dar que el anterior. El elemento se hacía más difícil de acumular y más inestable en cada estadio sucesivo. Cuando se consiguió el mendelevio, la identificación tuvo que basarse sólo en 17 átomos. Afortunadamente, las técnicas para detectar la radiación estaban ya muy perfeccionadas en 1965. Los científicos de Berkeley conectaron sus instrumentos a una campana de alarma para incendios, de modo que cada vez que se formaba un átomo de mendelevio, la radiación característica que emitía al desintegrarse, anunciaba el elemento con un estridente y triunfante sonido de la campana. (El Departamento de Incendios no tardó en poner fin a esta situación.)

## Electrones

Cuando Mendeléiev y sus contemporáneos descubrieron que podían distribuir los elementos en una tabla periódica compuesta por familias de sustancias de propiedades similares, no tenían noción alguna acerca del porqué los elementos pertenecían a tales grupos o del motivo por el que estaban relacionadas las propiedades. De pronto surgió una respuesta simple y clara, aunque tras una larga serie de descubrimientos, que al principio no parecían tener relación con la Química. Todo empezó con unos estudios sobre la electricidad, Faraday realizó con la electricidad todos los experimentos imaginables; incluso trató de enviar una

descarga eléctrica a través del vacío. Mas no pudo conseguir un vacío lo suficientemente perfecto para su propósito. Pero en 1854, un soplador de vidrio alemán, Heinrich Geissler, inventó una bomba de vacío adecuada y fabricó un tubo de vidrio en cuyo interior iban electrodos de metal en un vacío de calidad sin precedentes hasta entonces. Cuando se logró producir descargas eléctricas en el «tubo de Geissler», comprobóse que en la pared opuesta al electrodo negativo aparecía un resplandor verde. El físico alemán Eugen Goldstein sugirió, en 1876, que tal resplandor verde se debía al impacto causado en el vidrio por algún tipo de radiación originada en el electrodo negativo, que Faraday había denominado «cátodo». Goldstein dio a la radiación el nombre de «rayos catódicos».

¿Eran los rayos catódicos una forma de radiación electromagnética? Goldstein lo creyó así; en cambio, lo negaron el físico inglés William Crookes y algunos otros, según los cuales, dichos rayos eran una corriente de partículas de algún tipo. Crookes diseñó versiones mejoradas del tubo de Geissler (llamadas «tubos Crookes»), con las cuales pudo demostrar que los rayos eran desviados por un imán. Esto quizás significa que dichos rayos estaban formados por partículas cargadas eléctricamente.

En 1897, el físico Joseph John Thomson zanjó definitivamente la cuestión al demostrar que los rayos catódicos podían ser también desviados por cargas eléctricas. ¿Qué eran, pues, las «partículas» catódicas? En aquel tiempo, las únicas partículas cargadas negativamente que se conocían eran los iones negativos de los átomos. Los experimentos demostraron que las partículas de los rayos catódicos no podían identificarse con tales iones, pues al ser desviadas de aquella forma por un campo electromagnético, debían de poseer una carga eléctrica inimaginablemente elevada, o bien tratarse de partículas muy ligeras, con una masa mil veces más pequeña que la de un átomo de hidrógeno. Esta última interpretación era la que encajaba mejor en el marco de las pruebas realizadas. Los físicos habían ya intuido que la corriente eléctrica era transportada por partículas. En consecuencia, éstas partículas de rayos catódicos fueron aceptadas como las partículas elementales de la electricidad. Se les dio el nombre de «electrones», denominación sugerida, en 1891, por el físico irlandés George Johnstone Stoney. Finalmente, se determinó que la masa del electrón era 1.837 veces menor que la de un átomo de hidrógeno. (En

1906, Thomson fue galardonado con el premio Nobel de Física por haber establecido la existencia del electrón.)

El descubrimiento del electrón sugirió inmediatamente que debía de tratarse de una subpartícula del átomo. En otras palabras, que los átomos no eran las unidades últimas indivisibles de la materia que habían descrito Demócrito y John Dalton.

Aunque costaba trabajo creerlo, las pruebas convergían de manera inexorable. Uno de los datos más convincentes que la demostración, hecha por Thomson, que las partículas con carga negativa emitidas por una placa metálica al ser incidida por radiaciones ultravioleta (el llamado «efecto fotoeléctrico»), eran idénticas a los electrones de los rayos catódicos. Los electrones fotoeléctricos debían de haber sido arrancados de los átomos del metal.

Puesto que los electrones podían separarse fácilmente de los átomos, tanto por el efecto fotoeléctrico como por otros medios, era natural llegar a la conclusión que se hallaban localizados en la parte exterior del átomo. De ser así, debía de existir una zona cargada positivamente en el interior del átomo, que contrarrestaría las cargas negativas de los electrones, puesto que el átomo, globalmente considerado, era neutro. En este momento, los investigadores empezaron a acercarse a la solución del misterio de la tabla periódica.

Separar un electrón de un átomo requiere una pequeña cantidad de energía. De acuerdo con el mismo principio, cuando un electrón ocupa un lugar vacío en el átomo, debe *ceder* una cantidad igual de energía. (La Naturaleza es generalmente simétrica, en especial cuando se trata de energía.) Esta energía es liberada en forma de radiación electromagnética. Ahora bien, puesto que la energía de la radiación se mide en términos de longitud de onda, la longitud de onda de la radiación emitida por un electrón que se une a un determinado átomo indicará la fuerza con que el electrón es sujetado por este átomo. La energía de la radiación aumenta al acortarse la longitud de onda: cuanto mayor es la energía, más corta es la longitud de onda.

Y con esto llegamos al descubrimiento, hecho por Moseley, que los metales, es decir, los elementos más pesados, producen rayos X, cada uno de ellos con su longitud de onda característica, que disminuye de forma regular, a medida que se va ascendiendo en la tabla periódica. Al parecer, cada elemento sucesivo retenía sus

electrones con más fuerza que el anterior, lo cual no es más que otra forma de decir que cada uno de ellos tiene una carga positiva más fuerte en su región interna, que el anterior.

Suponiendo que, en un electrón, a cada unidad de carga positiva le corresponde una de carga negativa, se deduce que el átomo de cada elemento sucesivo de la tabla periódica debe tener un electrón más. Entonces, la forma más simple de formar la tabla periódica consiste en suponer que el primer elemento, el hidrógeno, tiene 1 unidad de carga positiva y un electrón; el segundo elemento, el helio, 2 cargas positivas y 2 electrones; el tercero, el litio, 3 cargas positivas y 3 electrones, y así, hasta llegar al uranio, con 92 electrones. De este modo, los números atómicos de los elementos han resultado ser el número de electrones de sus átomos.

Una prueba más, y los científicos atómicos tendrían la respuesta a la periodicidad de la tabla periódica. Se puso de manifiesto que la radiación de electrones de un determinado elemento no estaba necesariamente restringida a una longitud de onda única; podía emitir radiaciones de dos, tres, cuatro e incluso más longitudes de onda distintas. Estas series de radiaciones fueron denominadas K, L, M, etc. Los investigadores interpretaron esto como una prueba que los electrones estaban dispuestos en «capas» alrededor del núcleo del átomo de carga positiva. Los electrones de la capa más interna eran sujetados con mayor fuerza, y para conseguir su separación se necesitaba la máxima energía. Un electrón que cayera en esta capa emitiría la radiación de mayor energía, es decir, de longitudes de onda más corta, o de la serie K. Los electrones de la capa siguiente emitían la serie L de radiaciones; la siguiente capa producía la serie M, etc. En consecuencia, estas capas fueron denominadas K, L, M, etcétera.

Hacia 1925, el físico austriaco Wolfgang Pauli enunció su «principio de exclusión», el cual explicaba la forma en que los electrones estaban distribuidos en el interior de cada capa, puesto que, según este principio, dos electrones no podían poseer exactamente la misma energía ni el mismo *spin*. Por este descubrimiento, Pauli recibió el premio Nobel de Física en 1945.

En 1916, el químico americano Gilbert Newton Lewis determinó las similitudes de las propiedades y el comportamiento químico de algunos de los elementos más simples sobre la base de su estructura en capas. Para empezar, había pruebas

suficientes que la capa más interna estaba limitada a dos electrones. El hidrógeno sólo tiene un electrón; por tanto, la capa está incompleta. El átomo tiende a completar esta capa K, y puede hacerlo de distintas formas. Por ejemplo, dos átomos de hidrógeno pueden compartir sus respectivos electrones y completar así mutuamente sus capas K. Ésta es la razón que el hidrógeno se presente casi siempre en forma de un par de átomos: la molécula de hidrógeno. Se necesita una gran cantidad de energía para separar los dos átomos y liberarlos en forma de «hidrógeno atómico». Irving Langmuir, de la «General Electric Company», quien, independientemente, llegó a un esquema similar, que implicaba los electrones y el comportamiento químico, llevó a cabo una demostración práctica de la intensa tendencia del átomo de hidrógeno a mantener completa su capa de electrones. Obtuvo una «antorchas de hidrógeno atómico» soplando gas de hidrógeno a través de un arco eléctrico, que separaba los tomos de las moléculas; cuando los átomos se recombinañan, tras pasar el arco, liberaban la energía que habían absorbido al separarse, lo cual bastaba para alcanzar temperaturas superiores a los 3.400º C.

En el helio (elemento 2), la capa K está formada por dos electrones. Por tanto, los átomos de helio son estables y no se combinan con otros átomos. Al llegar al litio (elemento 3), vemos que dos de sus electrones completan la capa K y que el tercero empieza la capa L. Los elementos siguientes añaden electrones a esta capa, uno a uno: el berilio tiene 2 electrones en la capa L; el boro, 3; el carbono, 4; el nitrógeno, 5; el oxígeno, 6; el flúor, 7; y el neón 8. Ocho es el límite para la capa L, por lo cual el neón, lo mismo que el helio, tiene su capa exterior de electrones completa, y, desde luego, es también un gas inerte, con propiedades similares a las del helio.

Cada átomo cuya capa exterior no está completa, tiende a combinarse con otros átomos, de forma que pueda completarla. Por ejemplo, el átomo de litio cede fácilmente su único electrón en la capa L de modo que su capa exterior sea la K, completa, mientras que el flúor tiende a captar un electrón, que añade a los siete que ya tiene, para completar su capa L. Por tanto, el litio y el flúor tienen afinidad el uno por el otro; y cuando se combinan, el litio cede su electrón L al flúor, para completar la capa L exterior de este ultimo. Dado que no cambian las cargas positivas del interior del átomo, el litio, con un electrón de menos, es ahora

portador de una carga positiva, mientras que el flúor, con un electrón de más, lleva una carga negativa. La mutua atracción de las cargas opuestas mantiene unidos a los dos iones. El compuesto se llama fluoruro de litio.

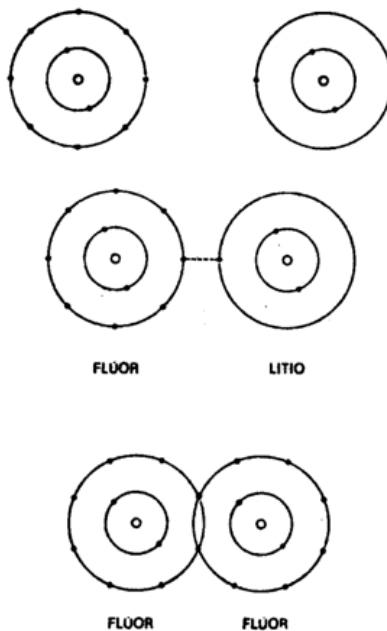
Los electrones de la capa L pueden ser compartidos o cedidos. Por ejemplo, uno de cada dos átomos de flúor puede compartir uno de sus electrones con el otro, de modo que cada átomo tenga un total de ocho en su capa L, contando los dos electrones compartidos. De forma similar, dos átomos de oxígeno compartirán un total de cuatro electrones para completar sus capas L; y dos átomos de nitrógeno compartirán un total de 6. De este modo, el flúor, el oxígeno y el nitrógeno forman moléculas de dos átomos.

El átomo de carbono, con sólo cuatro electrones en su capa L compartirá cada uno de ellos con un átomo distinto de hidrógeno, para completar así las capas K, de los cuatro átomos de hidrógeno. A su vez, completa su propia capa L al compartir *sus* electrones. Esta disposición estable es la molécula de metano CH<sub>4</sub>.

Del mismo modo, un átomo de nitrógeno compartirá los electrones con tres átomos de hidrógeno para formar el amoníaco; un átomo de oxígeno compartirá sus electrones con de átomos de hidrógeno para formar el agua; un átomo de carbono compartirá sus electrones con dos átomos de oxígeno para formar anhídrido carbónico; etc. Casi todos los compuestos formados por elementos de la primera parte de la tabla periódica pueden ser clasificados de acuerdo con esta tendencia a completar su capa exterior cediendo electrones, aceptando o compartiendo electrones.

El elemento situado después del neón, el sodio, tiene 11 electrones, y el decimoprimero debe empezar una tercera capa. Luego sigue el magnesio, con 2 electrones en la capa M; el aluminio, con 3; el silicio, con 4; el fósforo, con 5; el azufre, con 6; el cloro, con 7, y el argón, con 8.

Ahora bien, cada elemento de este grupo corresponde a otro de la serie anterior. El argón, con 8 electrones en la capa M, se asemeja al neón (con 8 electrones en la capa L) y es un gas inerte. El cloro, con 7 electrones en su capa exterior, se parece mucho al flúor en sus propiedades químicas. Del mismo modo, el silicio se parece al carbono; el sodio, al litio, etc.



*Cesión y compartimiento de electrones. El litio cede el electrón de su capa exterior al flúor, en la combinación fluoruro de litio; cada átomo tiene entonces una capa externa completa. En la molécula de flúor ( $Fl_2$ ), se comparten dos electrones, que completan las capas exteriores de ambos átomos.*

Así ocurre a lo largo de toda la tabla periódica. Puesto que el comportamiento químico de cada elemento depende de la configuración de los electrones de su capa exterior, todos los que, por ejemplo, tengan un electrón en la capa exterior, reaccionarán químicamente de un modo muy parecido. Así, todos los elementos de la primera columna de la tabla periódica, litio, sodio, potasio, rubidio, cesio e incluso el francio, el elemento radiactivo hecho por el hombre, son extraordinariamente parecidos en sus propiedades químicas. El litio tiene 1 electrón en la capa L; el sodio, 1 en la M; el potasio, 1 en la N; el rubidio, 1 en la O; el cesio, 1 en la P, y el francio, 1 en la Q. Una vez más, se parecen entre sí todos los elementos con siete electrones en sus respectivas capas exteriores (flúor, cloro, bromo, yodo y astato). Lo mismo ocurre con la última columna de la tabla, el grupo de capa completa, que incluye el helio, neón, argón, criptón, xenón y radón.

El principio de Lewis-Langmuir se cumple de forma tan perfecta, que sirve aún, en su forma original, para explicar las variedades de comportamiento más simples y directas entre los elementos. Sin embargo, no todos los comportamientos son tan simples ni tan directos como pueda creerse.

Por ejemplo, cada uno de los gases inertes, helio, neón, argón, criptón, xenón y radón, tiene ocho electrones en la capa exterior (a excepción del helio, que tiene dos en su única capa), situación que es la más estable posible. Los átomos de estos elementos tienen una tendencia mínima a perder o ganar electrones, y, por tanto, a tomar parte en reacciones químicas. Estos gases, tal como indica su nombre, serían «inertes».

Sin embargo, una «tendencia mínima» no es lo mismo que «sin tendencia alguna»; pero la mayor parte de los químicos lo olvidó, y actuó como si fuese realmente imposible para los gases inertes formar compuestos. Por supuesto que ello no ocurría así con todos. Ya en 1932, el químico americano Linus Pauling estudió la facilidad con que los electrones podían separarse de los distintos elementos, y observó que todos los elementos sin excepción, incluso los gases inertes, podían ser desprovistos de electrones. La única diferencia estribaba en que, para que ocurriese esto, se necesitaba más energía en el caso de los gases inertes que en el de los demás elementos situados junto a ellos en la tabla periódica.

La cantidad de energía requerida para separar los electrones en los elementos de una determinada familia, disminuye al aumentar el peso atómico, y los gases inertes más pesados, el xenón y el radón, no necesitan cantidades excesivamente elevadas. Por ejemplo, no es más difícil extraer un electrón a partir de un átomo de xenón que de un átomo de oxígeno.

Por tanto, Pauling predijo que los gases inertes más pesados podían formar compuestos químicos con elementos que fueran particularmente propensos a aceptar electrones. El elemento que más tiende a aceptar electrones es el flúor, y éste parecía ser el que naturalmente debía elegirse.

Ahora bien, el radón, el gas inerte más pesado, es radiactivo y sólo puede obtenerse en pequeñísimas cantidades. Sin embargo, el xenón, el siguiente gas más pesado, es estable, y se encuentra en pequeñas cantidades en la atmósfera. Por tanto, lo mejor sería intentar formar un compuesto entre el xenón y el flúor. Sin embargo, durante 30 años no se pudo hacer nada a este respecto, principalmente porque el xenón era caro, y el flúor, muy difícil de manejar, y los químicos creyeron que era mejor dedicarse a cosas menos complicadas.

No obstante, en 1962, el químico anglocanadiense Neil Bartlett, trabajando con un nuevo compuesto, el hexafluoruro de platino ( $F_6Pt$ ), manifestó que se mostraba notablemente ávido de electrones, casi tanto como el propio flúor. Este compuesto tomaba electrones a partir del oxígeno, elemento que tiende más a ganar electrones que a perderlos. Si el  $F_6Pt$  podía captar electrones a partir del oxígeno, debía de ser capaz también de captarlos a partir del xenón. Se intentó el experimento, y se obtuvo el fluoroplatinato de xenón ( $F_6PtXe$ ), primer compuesto de un gas inerte. Otros químicos se lanzaron enseguida a este campo de investigación. Y se obtuvo cierto número de compuestos de xenón con flúor, con oxígeno o con ambos, el más estable de los cuales fue el difluoruro de xenón ( $F_2Xe$ ). Formóse asimismo un compuesto de criptón y flúor: el tetrafluoruro de criptón ( $F_4Kr$ ), así como otros de radón y flúor. También se formaron compuestos con oxígeno. Había, por ejemplo, oxitetrafluoruro de xenón ( $OF_4Xe$ ), ácido xénico ( $H_2O_4Xe$ ) y perxenato de sodio ( $XeO_6Na_4$ ), que explota fácilmente y es peligroso. Los gases inertes más livianos, argón, neón y helio, ofrecen mayor resistencia a compartir sus electrones que los más pesados, por lo cual permanecen inertes [según las posibilidades actuales de los químicos].

Los químicos no tardaron en recuperarse del shock inicial que supuso descubrir que los gases inertes podían formar compuestos. Después de todo, tales compuestos encajaban en el cuadro general. En consecuencia, hoy existe una aversión general a denominar «gases inertes» a estos elementos. Se prefiere el nombre de «gases nobles», y se habla de «compuestos de gases nobles» y «Química de los gases nobles». (Creo que se trata de un cambio para empeorar. Al fin y al cabo, los gases siguen siendo inertes, aunque no del todo. En este contexto, el concepto «noble» implica «reservado» o «poco inclinado a mezclarse con la manada», lo cual resulta tan inapropiado como «inerte» y, sobre todo, no anda muy de acuerdo con una «sociedad democrática».)

El esquema de Lewis-Langmuir que se aplicó demasiado rígidamente a los gases inertes, apenas puede emplearse para muchos de los elementos cuyo número atómico sea superior a 20. En particular se necesitaron ciertos perfeccionamientos para abordar un aspecto muy sorprendente de la tabla periódica, relacionado con las llamadas «tierras raras» (los elementos 57 al 71, ambos inclusive).

Retrocediendo un poco en el tiempo, vemos que los primeros químicos consideraban como «tierra», herencia de la visión griega de la «tierra» como elemento, toda sustancia insoluble en agua y que no pudiera ser transformada por el calor. Estas sustancias incluían lo que hoy llamaríamos óxido de calcio, óxido de magnesio, bióxido silícico, óxido férrico, óxido de aluminio, etc., compuestos que actualmente constituyen alrededor de un 90 % de la corteza terrestre. Los óxidos de calcio y magnesio son ligeramente solubles, y en solución muestran propiedades «alcalinas» (es decir, opuestos a las de los ácidos), por lo cual fueron denominados «tierras alcalinas»; cuando Humphry Davy aisló los metales calcio y magnesio partiendo de estas tierras, se les dio el nombre de metales alcalinotérreos. De la misma forma se designaron eventualmente todos los elementos que caben en la columna de la tabla periódica en la que figuran el magnesio y el calcio: es decir, el berilio, estroncio, bario y radio.

El rompecabezas empezó en 1794, cuando un químico finlandés, Johan Gadolin, examinó una extraña roca que había encontrado cerca de la aldea sueca de Ytterby, y llegó a la conclusión que se trataba de una nueva «tierra». Gadolin dio a esta «tierra rara» el nombre de «itrio» (por Ytterby). Más tarde, el químico alemán Martin Heinrich Klaproth descubrió que el itrio podía dividirse en dos «tierras» para una de las cuales siguió conservando el nombre de itrio, mientras que llamó a la otra «cerio» (por el planeta Ceres, recientemente descubierto). Pero, a su vez, el químico sueco Carl Gustav Mosander separó éstos en una serie de tierras distintas. Todas resultaron ser óxidos de nuevos elementos, denominados «metales de las tierras raras». En 1907 se habían identificado ya 14 de estos elementos. Por orden creciente de peso atómico son:

- lantano (*voz tomada de la palabra griega que significa «escondido»*)
- cerio (*de Ceres*)
- praseodimio (*del griego «gemelo verde», por la línea verde que da su espectro*)
- neodimio (*«nuevos gemelos»*)
- samario (*de «samarsquita», el mineral en que se encontró*)
- europio (*de Europa*)
- gadolinio (*en honor de Johan Gadolin*)

- terbio (*de Ytterby*)
- disprosio (*del griego «díficil de llegar a»*)
- holmio (*de Estocolmo*)
- erbio (*de Ytterby*)
- tulio (*de Thule, antiguo nombre de Escandinavia*)
- iterbio (*de Ytterby*)
- lutecio (*de Lutecia, nombre latino de París*).

Basándose en sus propiedades de rayos X, estos elementos recibieron los números atómicos 57 (lantano) a 71 (lutecio). Como ya hemos dicho, existía un vacío en el espacio 61 hasta que el elemento incógnito, el promecio, emergió a partir de la fisión del uranio. Era el número 15 de la lista.

Ahora bien, el problema planteado por los elementos de las tierras raras es el de que, aparentemente, no encajan en la tabla periódica. Por suerte, sólo se conocían cuatro cuando Mendeléiev propuso la tabla; si se hubiesen conocido todos, la tabla podría haber resultado demasiado confusa para ser aceptada. Hay veces, incluso en la Ciencia, en que la ignorancia es una suerte.

El primero de los metales de las tierras raras, el lantano, encaja perfectamente con el itrio, número 39, el elemento situado por encima de él en la tabla. (El itrio, aunque fue encontrado en las mismas menas que las tierras raras y es similar a ellas en sus propiedades, no es un metal de tierra rara. Sin embargo, toma también su nombre de la aldea sueca de Ytterby. Así, cuatro elementos se denominan partiendo del mismo origen, lo cual parece excesivo.)

La confusión empieza con las tierras raras colocadas después del lantano, principalmente el cerio, que debería parecerse al elemento que sigue al itrio, o sea, el circonio. Pero no es así, pues se parece al itrio. Lo mismo ocurre con los otros quince elementos de las tierras raras: se parecen mucho al itrio y entre sí (de hecho, son tan químicamente parecidos, que al principio pudieron separarse sólo por medio de procedimientos muy laboriosos), pero no están relacionados con ninguno de los elementos que les preceden en la tabla. Prescindamos del grupo de tierras raras y pasemos al hafnio, el elemento 72; en el cual encontraremos el elemento relacionado con el circonio, colocado después del itrio.

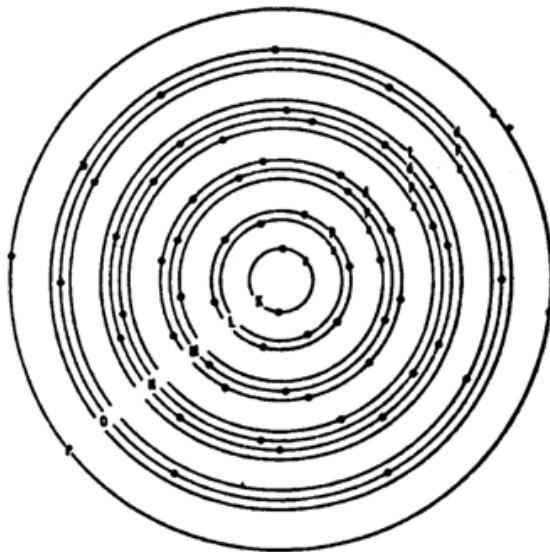
Desconcertados por este estado de cosas, lo único que pudieron hacer los químicos fue agrupar todos los elementos de tierras raras en un espacio situado debajo del itrio, y alineados uno por uno, en una especie de nota al pie de la tabla.

Finalmente, la respuesta a este rompecabezas llegó como resultado de detalles añadidos al esquema de Lewis Langmuir sobre la estructura de las capas de electrones en los elementos.

En 1921, .C. R. Bury sugirió que el número de electrones de cada capa no estaba limitado necesariamente a ocho. El ocho era el número que bastaba siempre para satisfacer la capacidad de la capa exterior. Pero una capa podía tener un mayor número de electrones si no estaba en el exterior. Como quiera que las capas se iban formando sucesivamente, las más internas podían absorber más electrones, y cada una de las siguientes podía retener más que la anterior. Así, la capacidad total de la capa K sería de 2 electrones; la de la L, de 8; la de la M, de 18; la de la N, de 32, y así sucesivamente. Este escalonamiento se ajusta al de una serie de sucesivos cuadrados multiplicados por 2 (por ejemplo,  $2 \times 1$ ,  $2 \times 4$ ,  $2 \times 8$ ,  $2 \times 16$ , etc.).

Este punto de vista fue confirmado por un detenido estudio del espectro de los elementos. El físico danés Niels Henrik David Bohr demostró que cada capa de electrones estaba constituida por subcapas de niveles de energía ligeramente distintos. En cada capa sucesiva, las subcapas se hallan más separadas entre sí, de tal modo que pronto se imbrican las capas. En consecuencia, la subcapa más externa de una capa interior (por ejemplo, la M), puede estar realmente más lejos del centro que la subcapa más interna de la capa situada después de ella (por ejemplo, la N). Por tanto, la subcapa interna de la capa N puede estar llena de electrones, mientras que la subcapa exterior de la capa M puede hallarse aún vacía. Un ejemplo aclarará esto. Según esta teoría, la capa M está dividida en tres subcapas, cuyas capacidades son de 2, 6 y 10 electrones, respectivamente, lo cual da un total de 18. El argón, con 8 electrones en su capa M, ha completado sólo 2 subcapas internas. Y, de hecho, la tercera subcapa, o más externa, de la capa M, no conseguirá el próximo electrón en el proceso de formación de elementos, al hallarse por debajo de la subcapa más interna de la capa N. Así, en el potasio, elemento que sigue al argón, el electrón decimonoveno no se sitúa en la subcapa más exterior de M, sino en la subcapa más interna de N. El potasio, con un electrón en su capa N, se

parece al sodio, que tiene un electrón en su capa M. El calcio, el siguiente elemento (20), tiene dos electrones en la capa N y se parece al magnesio, que posee dos en la capa M. Pero la subcapa más interna de la capa N, que tiene capacidad sólo para 2 electrones, está completa. Los siguientes electrones que se han de añadir pueden empezar llenando la subcapa más exterior de la capa M, que hasta entonces ha permanecido inalterada. El escandio (21) inicia el proceso, y el cinc (30) lo termina. En el cinc, la subcapa más exterior de la capa M adquiere, por fin, los electrones que completan el número de 10. Los 30 electrones del cinc están distribuidos del siguiente modo: 2 en la capa K, 8 en la L, 18 en la M y 2 en la N. Al llegar a este punto, los electrones pueden seguir llenando la capa N. El siguiente electrón constituye el tercero de la capa N y forma el galio (31), que se parece al aluminio, con 3 electrones en la capa M.

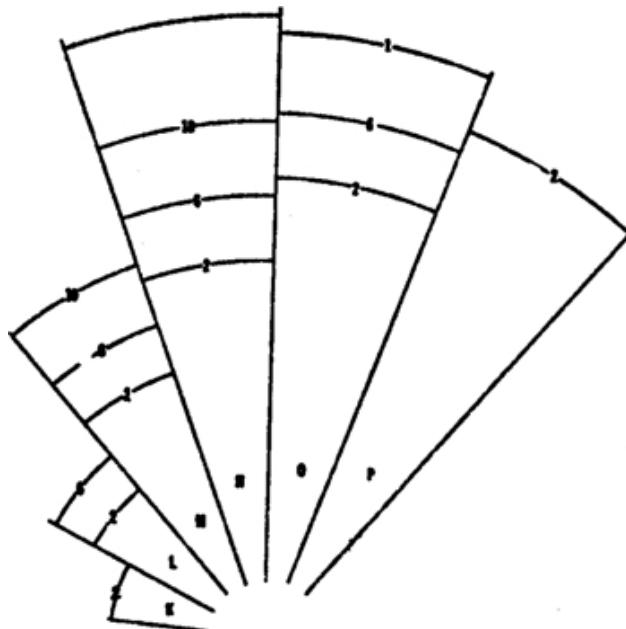


*Las capas de electrones del lantano. Nótese que la cuarta subcapa de la capa N ha sido omitida y está vacía.*

Lo más importante de este proceso es que los elementos 21 al 30, los cuales adquieren una configuración parecida para completar una subcapa que había sido omitida temporalmente, son «de transición». Nótese que el calcio se parece al magnesio, y el galio, al aluminio. El magnesio y el aluminio están situados uno junto a otro en la tabla periódica (números 12 y 13). En cambio, no lo están el calcio (20)

ni el galio (31). Entre ellos se encuentran los elementos de transición, lo cual hace aún más compleja la tabla periódica.

La capa N es mayor que la M y está dividida en cuatro subcapas, en vez de tres: puede tener 2, 6, 10 y 14 electrones, respectivamente. El criptón (elemento 36) completa las dos subcapas más internas de la capa N; pero aquí interviene la subcapa más interna de la capa O, que está superpuesta, y antes que los electrones se sitúen en las dos subcapas más externas de la N, deben llenar dicha subcapa. El elemento que sigue al criptón, el rubidio (37), tiene su electrón número 37 en la capa O. El estroncio (38) completa la subcapa O con dos electrones. De aquí en adelante, nuevas series de elementos de transición rellenan la antes omitida tercera subcapa de la capa N. Este proceso se completa en el cadmio (48); se omite la subcapa cuarta y más exterior de N, mientras los electrones pasan a ocupar la segunda subcapa interna de O, proceso que finaliza en el xenón (54).



*La representación esquemática de la imbricación de capas y subcapas electrónicas en el lantano. La subcapa más exterior de la capa N aún no ha sido completada.*

Pero ahora, a nivel de la cuarta subcapa de N, es tan manifiesta la superposición, que incluso la capa 9 interpone una subcapa, la cual debe ser completada antes que la última de N. Tras el xenón vienen el cesio (55) y el bario (56), con uno y dos electrones, respectivamente, en la capa P. Aún no ha llegado el turno a N: el

electrón 57 va a parar a la tercera subcapa de la capa O, para crear el lantano. Entonces, y sólo entonces, entra, por fin, un electrón en la subcapa más exterior de la capa N. Uno tras otro, los elementos de tierras raras añaden electrones a la capa N, hasta llegar al elemento 71 (el lutecio), que la completa. Los electrones del lutecio están dispuestos del siguiente modo: 2 en la capa K, 8 en la L, 18 en la M, 32 en la N, 9 en la O (dos subcapas llenas, más un electrón en la subcapa siguiente) y 2 en la P (cuya subcapa más interna está completa).

Finalmente, empezamos a comprender por qué son tan parecidos los elementos de tierras raras y algunos otros grupos de elementos de transición. El factor decisivo que diferencia a los elementos, por lo que respecta a sus propiedades químicas, es la configuración de electrones en su capa más externa. Por ejemplo, el carbono, con 4 electrones en su capa exterior, y el nitrógeno, con 5, son completamente distintos en sus propiedades. Por otra parte, las propiedades varían menos en las secuencias de elementos en que los electrones están destinados a completar sus subcapas más internas, mientras la capa más externa permanece inalterable. Así, son muy parecidos en su comportamiento químico el hierro, el cobalto y el níquel (elementos 26, 27 y 28), todos los cuales tienen la misma configuración electrónica en la capa más externa, una subcapa N llena con dos electrones. Sus diferencias en la configuración electrónica interna (en una subcapa M) están enmascaradas en gran parte por su similitud electrónica superficial. Y esto es más evidente aún en los elementos de tierras raras. Sus diferencias (en la capa N) quedan enterradas no bajo una, sino bajo dos configuraciones electrónicas externas (en las capas O y P), que en todos estos elementos son idénticas. Constituye una pequeña maravilla el hecho que los elementos sean químicamente tan iguales como los guisantes en su vaina.

Como quiera que los metales de tierras raras tienen tan pocos usos y son tan difíciles de separar, los químicos hicieron muy pocos esfuerzos para conseguirlo, hasta que se logró fisionar el átomo de uranio. Luego, el separarlos se convirtió en una tarea muy urgente, debido a que las variedades radiactivas de alguno de estos elementos se encontraban entre los principales productos de la fisión, y en el proyecto de la bomba atómica era necesario separarlos e identificarlos rápida y claramente.

El problema fue resuelto en breve plazo con ayuda de una técnica química creada, en 1906, por el botánico ruso Mijail Seménovich Tswett, quien la denominó «cromatografía» («escritura en color»). Tswett descubrió que podía separar pigmentos vegetales químicamente muy parecidos haciéndolos pasar, en sentido descendente, a través de una columna de piedra caliza en polvo, con ayuda de un disolvente. Tswett disolvió su mezcla de pigmentos vegetales en éter de petróleo y vertió esta mezcla sobre la piedra caliza. Luego incorporó disolvente puro. A medida que los pigmentos eran arrastrados por el líquido a través del polvo de piedra caliza, cada uno de ellos se movía a una velocidad distinta, porque su grado de adherencia al polvo era diferente. El resultado fue que se separaron en una serie de bandas, cada una de ellas de distinto color.

Al seguir lavando las sustancias separadas, iban apareciendo aisladas en el extremo inferior de la columna, de la que eran recogidas.

Durante muchos años, el mundo de la Ciencia ignoró el descubrimiento de Tswett, quizá porque se trataba sólo de un botánico y, además, ruso, cuando, a la sazón, eran bioquímicos alemanes las máximas figuras de la investigación sobre técnicas para separar sustancias difíciles de individualizar. Pero en 1931, un bioquímico, y precisamente alemán, Richard Willstätter, redescubrió el proceso, que entonces sí se generalizó. (Willstätter había recibido el premio Nobel de Química en 1915 por su excelente trabajo sobre pigmentos vegetales, y, por lo que sabemos, Tswett no ha recibido honor alguno.)

La chromatografía a través de columnas de materiales pulverizados mostróse como un procedimiento eficiente para toda clase de mezclas, coloreadas o no. El óxido de aluminio y el almidón resultaron mejores que la piedra caliza para separar moléculas corrientes. Cuando se separan iones, el proceso se llama «intercambio de iones», y los compuestos conocidos con el nombre de zeolitas fueron los primeros materiales aplicados con este fin. Los iones de calcio y magnesio podrían ser extraídos del agua «dura», por ejemplo, vertiendo el agua a través de una columna de zeolita. Los iones de calcio y magnesio se adhieren a ella y son remplazados, en solución, por los iones de sodio que contiene la zeolita, de modo que al pie de la columna van apareciendo gotas de agua «blanda». Los iones de sodio de la zeolita deben ser remplazados de vez en cuando vertiendo en la columna una solución

concentrada de sal corriente (cloruro sódico). En 1935 se perfeccionó el método al desarrollarse las «resinas intercambiadoras de iones», sustancias sintéticas que pueden ser creadas especialmente para el trabajo que se ha de realizar. Por ejemplo, ciertas resinas sustituyen los iones de hidrógeno por iones positivos, mientras que otras sustituyen iones hidroxilos por iones negativos. Una combinación de ambos tipos permitiría extraer la mayor parte de las sales del agua de mar. Cajitas que contenían estas resinas formaban parte de los equipos de supervivencia durante la Segunda Guerra Mundial.

El químico americano Frank Harold Spedding fue quien aplicó la cromatografía de intercambio de iones a la separación de las tierras raras. Descubrió que estos elementos salían de una columna de intercambio de iones en orden inverso a su número atómico, de modo que no sólo se separaban rápidamente, sino que también se identificaban. De hecho, el descubrimiento del promecio, el incógnito elemento 61, fue confirmado a partir de las pequeñas cantidades encontradas entre los productos de fisión.

Gracias a la cromatografía, puede prepararse hasta 1 Tm de elementos de tierras raras purificado. Pero resulta que las tierras raras no son especialmente raras. En efecto, la más rara (a excepción del promecio) es más común que el oro o la plata, y las más corrientes, lantano, cerio y neodimio, abundan más que el plomo. En conjunto, los metales de tierras raras forman un porcentaje más importante de la corteza terrestre que el cobre y el estaño juntos. De aquí que los científicos sustituyeran el término «tierras raras» por el de «lantánidos», en atención al más importante de estos elementos. La verdad es que estas tierras raras no tuvieron demasiadas aplicaciones en el pasado. Sólo en 1965, ciertos compuestos de europio-itrio se mostraron particularmente útiles como «luminóforos» sensibles al rojo para la televisión en color. Evidentemente, a partir de aquí pueden surgir múltiples aplicaciones.

Como una recompensa a los químicos y físicos por descifrar el misterio de las tierras raras, los nuevos conocimientos proporcionaron la clave de la química de los elementos situados al final de la tabla periódica, incluyendo los creados por el hombre.

Esta serie de elementos pesados empieza con el actinio, número 89. En la tabla está situado debajo del lantano. El actinio tiene 2 electrones en la capa Q, del mismo modo que el lantano tiene otros 2 en la capa P. El electrón 89 y último del actinio pasa a ocupar la capa P, del mismo modo que el 57 y último del lantano ocupa la capa O. Ahora se plantea este interrogante: Los elementos situados detrás del actinio, ¿siguen añadiendo electrones a la capa P y convirtiéndose así en elementos usuales de transición? ¿O, por el contrario, se comportan como los elementos situados detrás del lantano, cuyos electrones descienden para completar la subcapa omitida situada debajo? Si ocurre esto, el actinio puede ser el comienzo de una nueva serie de «metales de tierras raras».

Los elementos naturales de esta serie son el actinio, el torio, el protactinio y el uranio. No fueron ampliamente estudiados hasta 1940. Lo poco que se sabía sobre su química sugería que se trataba de elementos usuales de transición. Pero cuando se añadieron a la lista los elementos neptunio y plutonio, elaborados por el hombre, y se estudiaron detenidamente, mostraron un gran parecido químico con el uranio. Ello indujo a Glenn Seaborg a proponer la teoría que los elementos pesados se comportaban, en realidad, como las tierras raras y completaban la enterrada subcapa incompleta. A medida que se fueron añadiendo a la lista más elementos transuránicos el estudio de su química confirmó este punto de vista, que hoy es generalmente aceptado.

La capa que se va completando es la cuarta subcapa de la capa O. En el laurencio (elemento número 103) se completa la subcapa. Todos los elementos, desde el actinio al laurencio, comparten casi las mismas propiedades químicas y se parecen al lantano y a los lantánidos. En el elemento 104, el electrón número 104 se añadirá a la capa P, y sus propiedades deberían ser como las de hafnio. Ésta sería la prueba final que confirmase la existencia de una segunda serie de tierras raras, y la razón que los químicos busquen tan afanosamente la obtención y estudio del elemento 104.

De momento tienen ya una prueba directa. La cromatografía de intercambio de iones separa con claridad los elementos transuránicos, de una manera totalmente análoga a la empleada para los lantánidos.

Para subrayar aún más este paralelismo, los «metales de tierras raras» más pesados se llaman hoy «actínidos», del mismo modo que los miembros de la primera serie se denominan lantánidos.

### Los Gases

Desde los comienzos de la Química se reconoció que podían existir muchas sustancias en forma de gas, líquido o sólidos, según la temperatura. El agua es el ejemplo más común: a muy baja temperatura se transforma en hielo sólido, y si se calienta mucho, en vapor gaseoso. Van Helmont, el primero en emplear la palabra «gas», recalcó la diferencia que existe entre las sustancias que son gases a temperaturas usuales, como el anhídrido carbónico, y aquellas que, al igual que el vapor, son gases sólo a elevadas temperaturas. Llamó «vapores» a estos últimos, por lo cual seguimos hablando «de vapor de agua», no de «gas de agua».

El estudio de los gases o vapores siguió fascinando a los químicos, en parte porque les permitía dedicarse a estudios cuantitativos. Las leyes que determinan su conducta son más simples y fáciles de establecer que las que gobiernan el comportamiento de los líquidos y los sólidos.

En 1787, el físico francés Jacques-Alexandre-César Charles descubrió que, cuando se enfriaba un gas, cada grado de enfriamiento determinaba una contracción de su volumen aproximadamente igual a  $1/273$  del volumen que el mismo gas tenía a  $0^\circ\text{C}$ , y, a la inversa, cada grado de calentamiento provocaba dificultades lógicas; pero si continuaba la disminución de volumen de acuerdo con la ley de Charles (tal como se la conoce hoy), al llegar a los  $-273^\circ\text{C}$ , el gas desaparecería. Esta paradoja no pareció preocupar demasiado a los químicos, pues se daban cuenta que la ley de Charles no podía permanecer inmutable hasta llegar a temperaturas tan bajas, y, por otra parte, no tenían medio alguno de conseguir temperaturas lo suficientemente bajas como para ver lo que sucedía.

El desarrollo de la teoría atómica, que describía los gases como grupos de moléculas, presentó la situación en unos términos completamente nuevos. Entonces empezó a considerarse que el volumen dependía de la velocidad de las moléculas. Cuanto más elevada fuese la temperatura, a tanto mayor velocidad se moverían, más «espacio necesitarían para moverse». Y mayor sería el volumen. Por el

contrario, cuanto más baja fuese la temperatura, más lentamente se moverían, menos espacio necesitarían y menor sería el volumen. En la década de 1860, el físico británico William Thomson, que alcanzó la dignidad de par, como Lord Kelvin, sugirió que el contenido medio de energía de las moléculas era lo que disminuía en un índice de 1/273 por cada grado de enfriamiento. Si bien no podía esperarse que el volumen desapareciera por completo, la energía si podía hacerlo. Según Thomson, a  $-273^{\circ}$  C, la energía de las moléculas descendería hasta cero, y éstas permanecerían inmóviles. Por tanto,  $273^{\circ}$  C debe de ser la temperatura más baja posible. Así, pues, esta temperatura (establecida actualmente en,  $273,16^{\circ}$  C, según mediciones más modernas) sería el «cero absoluto», o, como acostumbra decir a menudo, el «cero Kelvin». En esta escala absoluta, el punto de fusión del hielo es de  $273^{\circ}$  K.

Como es natural, los físicos se mostraron mucho más interesados en alcanzar el cero absoluto que en tratar de llegar al polo Norte, por ejemplo. Existe algo en un horizonte lejano que impulsa a conquistarla. El hombre había ido explorando los grados más extremos del frío ya antes que Thomson definiese el objetivo final. Esta exploración incluyó algunos intentos de licuar gases. Michael Faraday había descubierto que, aún a temperaturas normales, algunos gases podían ser licuados sometiéndolos a presión; en la década de 1820 logró por este sistema licuar el cloro, el anhídrido sulfuroso y el amoníaco. Pero, una vez licuado, un gas podía actuar como agente refrigerador. Cuando se reducía lentamente la presión ejercida sobre el líquido, el gas se evaporaba, y esta evaporación absorbía calor a partir del líquido restante. (Cuando se sopla sobre un dedo húmedo, el frío que siente uno es el efecto de la evaporación del agua que absorbe el calor del dedo.) El principio general es hoy bien conocido como la base de la moderna refrigeración.

Ya en 1755, el químico escocés William Cullen había producido hielo mecánicamente, al formar un vacío sobre pequeñas cantidades de agua, forzando así la rápida evaporación de la misma, y, por supuesto, enfriándola hasta el punto de congelación. Actualmente, un gas apropiado se licua mediante un compresor, y a continuación se hace circular por un serpentín, donde, a medida que se evapora el líquido, absorbe el calor del espacio que lo rodea.

El agua no resulta apropiada por este objeto, ya que el hielo que se forma obturaría los tubos. En 1834, un inventor norteamericano, Jacob Perkins, patentó (en Gran Bretaña) el uso del éter como refrigerante. También se utilizaron otros gases, tales como el amoníaco y el anhídrido sulfuroso. Todos estos refrigerantes tenían la desventaja de ser tóxicos o inflamables. En 1930, el químico norteamericano Thomas Midgley descubrió el dicloro-difluorometano ( $\text{Cl}_2\text{CF}_2$ ), más conocido por su nombre comercial de «Freón». Se trata de un gas no tóxico e ininflamable, que se adapta perfectamente a este propósito. Gracias al «Freón», la refrigeración casera se convirtió en una técnica de uso común.

Aplicada con moderación a grandes volúmenes, la refrigeración es el «aire acondicionado», llamado así porque el aire se halla en realidad acondicionado, es decir, filtrado y deshumidificado. La primera unidad de aire acondicionado con fines prácticos fue diseñada, en 1902 por el inventor americano Willis H. Carrier (cuyo nombre tomó: «clima Carrier»). A partir de la Segunda Guerra Mundial, el aire acondicionado se convirtió en algo muy corriente en las principales ciudades americanas, y hoy es de empleo casi universal.

Pero el principio de la refrigeración puede ser también llevado a sus extremos. Si se encierra un gas licuado en un recipiente bien aislado, de modo que al evaporarse extraiga calor sólo a partir del propio líquido, pueden obtenerse temperaturas muy bajas. Ya en 1835, los físicos habían alcanzado temperaturas de hasta  $-100^\circ \text{ C}$ . Sin embargo, el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno, el monóxido de carbono y otros gases corrientes resistieron la licuefacción a estas temperaturas, aún con el empleo de altas presiones. Durante algún tiempo resultó imposible su licuefacción, por lo cual se llamaron «gases permanentes».

Sin embargo, en 1839, el físico irlandés Thomas Andrews dedujo, a partir de sus experimentos, que cada gas tenía una «temperatura crítica», por encima de la cual no podía ser licuado, ni siquiera sometiéndolo a presión. Esto fue expresado más tarde, con una base teórica firme, por el físico holandés Johannes Diderik van der Waals, quien, por ello, se hizo acreedor al premio Nobel de Física en 1910.

A partir de este momento, para licuar cualquier gas, se había de operar a una temperatura inferior a la crítica del gas en cuestión, pues, de lo contrario, el esfuerzo era inútil. Se intentó alcanzar temperaturas aún más bajas, a fin de

«conquistar» estos gases resistentes. Por fin resolvió el problema un método en «cascada», que permitía obtener en varias fases temperaturas cada vez más bajas. En primer lugar, el anhídrido sulfuroso licuado y enfriado mediante evaporación, se empleó para licuar el anhídrido carbónico; luego se utilizó el anhídrido carbónico líquido para licuar un gas más resistente, etcétera. En 1877, el físico suizo Raoul Pictet consiguió, al fin, licuar oxígeno a una temperatura de  $-140^{\circ}$  C y una presión de 500 atmósferas. Hacia la misma fecha, el físico francés Louis-Paul Cailletet licuó no sólo el oxígeno, sino también el nitrógeno y el monóxido de carbono. Naturalmente, estos líquidos permitieron conseguir temperaturas aún más bajas. El punto de licuefacción del oxígeno a la presión atmosférica normal resultó ser de  $-183^{\circ}$  C; el del monóxido de carbono, de  $-190^{\circ}$  C, y el del nitrógeno, de  $-195^{\circ}$  C. Hasta 1900, el hidrógeno resistió todos los esfuerzos de licuefacción. Hacia esta fecha lo consiguió el químico escocés James Dewar, empleando una nueva estrategia. Lord Kelvin (William Thomson) y el físico inglés James Prescott Joule habían demostrado que, incluso en estado gaseoso, un gas podía ser enfriado simplemente permitiendo su expansión y evitando que entrara calor desde el exterior, siempre que la temperatura inicial fuese lo bastante baja. Así, pues, Dewar enfrió hidrógeno comprimido hasta una temperatura de  $-200^{\circ}$  C, en un recipiente rodeado de nitrógeno líquido; dejó que el hidrógeno superfrío se expandiese y se enfriase aún más, y repitió el ciclo una y otra vez, haciendo pasar el hidrógeno a través de serpentines. El hidrógeno comprimido, sometido a este «efecto Joule-Thomson», se transformó, finalmente, en líquido a la temperatura de  $-240^{\circ}$  C. A temperaturas aún más bajas, pudo obtener hidrógeno sólido.

Para conservar superfríos estos líquidos, Dewar diseñó unos frascos especiales de vidrio, revestidos de plata. Tenían paredes dobles, y un vacío entre las mismas. Sólo el proceso, relativamente lento, de la radiación, podía provocar una pérdida (o ganancia) de calor, y el revestimiento de plata reflejaba la radiación hacia el interior (o hacia el exterior). Estos «frascos de Dewar» son los antecesores directos del popularísimo termo.

Hacia 1895, el inventor británico William Hampson y el físico alemán Carl Lindé habían desarrollado métodos de licuefacción del aire a escala comercial. El oxígeno puro líquido, separado del nitrógeno, se convirtió en un artículo muy práctico. Su

principal aplicación, en términos cuantitativos, es la soldadura autógena. Pero mucho más espectaculares son sus aplicaciones en Medicina (por ejemplo, tiendas de oxígeno), en aviación, en submarinos, etcétera.

Al iniciarse la Era espacial, los gases licuados adquirieron de pronto una gran aceptación. Los cohetes necesitan una reacción química extremadamente rápida, que libere grandes cantidades de energía. El tipo más adecuado de combustible es una combinación de un líquido combustible, como el alcohol o el queroseno, y oxígeno líquido. El oxígeno, u otro agente oxidante, es absolutamente necesario en el cohete, debido a que cuando éste abandona la atmósfera, queda privado de toda fuente natural de oxígeno. Y éste debe hallarse en estado líquido, ya que los líquidos son más densos que los gases, y, en forma líquida, puede bombarse más oxígeno que en forma gaseosa hacia la cámara de combustión. Por tanto, el oxígeno líquido tiene una gran demanda en la Era espacial. La efectividad de una mezcla de combustible y oxidante se mide por el llamado «impulso específico» al cual representa el número de kilos de empuje producidos por la combustión de 1 Kg de la mezcla de combustible-oxidante por segundo. Para una mezcla de queroseno y oxígeno, el impulso específico es igual a 121. Puesto que la carga máxima que un cohete puede transportar depende del impulso específico, se buscaron combinaciones más eficaces. Desde este punto de vista, el mejor combustible químico es el hidrógeno líquido. Combinado con oxígeno líquido, puede dar un impulso específico igual a 175 aproximadamente. Si el ozono o el flúor líquidos pudiesen usarse igual que el oxígeno, el impulso específico podría elevarse hasta 185.

Las investigaciones en busca de mejores combustibles para los cohetes prosiguen en varias direcciones. Al combinarse con el oxígeno, algunos metales ligeros, como el litio, el boro, el magnesio, el aluminio y, especialmente, el berilio, liberan más energía que el hidrógeno. Sin embargo, algunos de ellos son muy raros, y todos plantean dificultades técnicas de combustión, debidas a los humos, a los depósitos de óxido, etc.

Se han hecho asimismo algunos intentos para obtener nuevos combustibles sólidos que actúen de oxidantes propios (como la pólvora, que fue el primer propulsor de cohetes, pero mucho más eficientes). Estos combustibles se llaman

«monopropulsores» puesto que no necesitan una fuente oxidante independiente y constituyen el elemento propulsor requerido. Los combustibles que necesitan oxidantes se llaman «bipropulsores» (dos propulsores). Se supone que los monopropulsores serían más fáciles de almacenar y manejar y quemarían de forma rápida, pero regulada. La principal dificultad tal vez sea la de conseguir un monopropulsor con un impulso específico que se aproxime al de los bipropulsores. Otra posibilidad la constituye el hidrógeno atómico, como el que empleó Langmuir en su soplete. Se ha calculado que el motor de un cohete que funcionase mediante la recombinación de átomos de hidrógeno para formar moléculas, podría desarrollar un impulso específico de más de 650. El problema principal radica en cómo almacenar el hidrógeno atómico. Hasta ahora, lo más viable parece ser un rápido y drástico enfriamiento de los átomos libres, inmediatamente después de formarse éstos. Las investigaciones realizadas en el «National Bureau of Standards» parecen demostrar que los átomos de hidrógeno libre quedan mejor preservados si se almacenan en un material sólido a temperaturas extremadamente bajas, por ejemplo, oxígeno congelado o argón-. Si se pudiese conseguir que apretando un botón, por así decirlo, los gases congelados empezasen a calentarse y a evaporarse, los átomos de hidrógeno se liberarían y podrían recombinarse. Si un sólido de este tipo pudiese conservar un 10 % de su peso en átomos libres de hidrógeno, el resultado sería un combustible mejor que cualquiera de los que poseemos actualmente. Pero, desde luego, la temperatura tendría que ser muy baja, muy inferior a la del hidrógeno líquido. Estos sólidos deberían ser mantenidos a temperaturas de  $-272^{\circ}\text{ C}$ , es decir, a un solo grado por encima del cero absoluto. Otra solución radica en la posibilidad de impulsar los iones en sentido retrógrado (en vez de los gases de salida del combustible quemado). Cada uno de los iones, de masa pequeñísima, produciría impulsos pequeños, pero continuados, durante largos períodos de tiempo. Así, una nave colocada en órbita por la fuerza potente, aunque de breve duración, del combustible químico, podría, en el espacio, medio virtualmente libre de fricción, ir acelerando lentamente, bajo el impulso continuo de los iones, hasta alcanzar casi la velocidad de la luz. El material más adecuado para tal impulso iónico es el cesio, la sustancia que más fácilmente puede ser forzada a

perder electrones y a formar el ion de cesio. Luego puede crearse un campo eléctrico para acelerar el ion de cesio y dispararlo por el orificio de salida del cohete. Pero volvamos al mundo de las bajas temperaturas. Ni siquiera la licuefacción y la solidificación del hidrógeno constituyen la victoria final. En el momento en que se logró dominar el hidrógeno, se habían descubierto ya los gases inertes, el más ligero de los cuales, el helio, se convirtió en un bastión inexpugnable contra la licuefacción a las más bajas temperaturas obtenibles. Finalmente, en 1908, el físico holandés Heike Kamerlin Onnes consiguió dominarlo. Dio un nuevo impulso al sistema Dewar. Empleando hidrógeno líquido, enfrió bajo presión el gas de helio hasta  $-255^{\circ}\text{ C}$  aproximadamente y luego dejó que el gas se expandiese para enfriarse aún más. Este método le permitió licuar el gas. Luego, dejando que se evaporase el helio líquido, consiguió la temperatura a la que podía ser licuado el helio bajo una presión atmosférica normal, e incluso a temperaturas de hasta,  $272,3^{\circ}\text{ C}$ . Por su trabajo sobre las bajas temperaturas, Onnes recibió el premio Nobel de Física en 1913. (Hoy es algo muy simple la licuefacción del helio. En 1947, el químico americano Samuel Cornette Collins inventó el «criostato», con el cual, por medio de compresiones y expansiones alternativas, puede producir hasta 34 litros de helio líquido por hora.) Sin embargo, Onnes hizo mucho más que obtener nuevos descensos en la temperatura. Fue el primero en demostrar que a estos niveles existían propiedades únicas de la materia.

Una de estas propiedades es el extraño fenómeno denominado «superconductividad». En 1911, Onnes estudió la resistencia eléctrica del mercurio a bajas temperaturas. Esperaba que la resistencia a una corriente eléctrica disminuiría constantemente a medida que la desaparición del calor redujese las vibraciones normales de los átomos en el metal. Pero a,  $268,88^{\circ}\text{ C}$  desapareció súbitamente la resistencia eléctrica del mercurio. Una corriente eléctrica podía cruzarlo sin pérdida alguna de potencia. Pronto se descubrió que otros metales podían también transformarse en superconductores. Por ejemplo, el plomo, lo hacía a,  $265,78^{\circ}\text{ C}$ . Una corriente eléctrica de varios centenares de amperios, aplicada a un anillo de plomo mantenido a dicha temperatura por medio del helio líquido, siguió circulando a través de este anillo durante dos años y medio, sin pérdida apreciable de intensidad.

A medida que descendían las temperaturas, se iban añadiendo nuevos metales a la lista de los materiales superconductores. El estaño se transformaba en superconductor a los, 269,27º C; el aluminio, a los, 271,80º C; el uranio, a los, 272,2º C; el titanio, a los, 272,47º C; el hafnio, a los, 272,65º C. Pero el hierro, níquel, cobre, oro, sodio y potasio deben de tener un punto de transición mucho más bajo aún, si es que realmente pueden ser transformados en superconductores, porque no se han podido reducir a este estado ni siquiera a las temperaturas más bajas alcanzadas. El punto más alto de transición encontrado para un metal es el del tecnecio, que se transforma en superconductor por debajo de los, 261,8º C.

Un líquido de bajo punto de ebullición retendrá fácilmente las sustancias inmersas en él a su temperatura de ebullición. Para conseguir temperaturas inferiores se necesita un líquido cuyo punto de ebullición sea aún menor. El hidrógeno líquido hierva a, 252,6º C, y sería muy útil encontrar una sustancia superconductora cuya temperatura de transición fuera, por lo menos, equivalente. Sólo tales condiciones permiten estudiar la superconductividad en sistemas refrigerados por el hidrógeno líquido. A falta de ellas, será preciso utilizar, como única alternativa, un líquido cuyo punto de ebullición sea bajo, por ejemplo, el helio líquido, elemento mucho más raro, más costoso y de difícil manipulación. Algunas aleaciones, en especial las que contienen niobio, poseen unas temperaturas de transición más elevadas que las de cualquier metal puro. En 1968 se encontró por fin, una aleación de neobio, aluminio y germanio, que conservaba la superconductividad a -252º C. Esto hizo posible la superconductividad a temperaturas del hidrógeno líquido, aunque con muy escaso margen. E inmediatamente se presentó, casi por sí sola, una aplicación útil de la superconductividad en relación con el magnetismo. Una corriente eléctrica que circula por un alambre arrollado en una barra de hierro, crea un potente campo magnético; cuanto mayor sea la corriente, tanto más fuerte será el campo magnético. Por desgracia, también cuanto mayor sea la corriente, tanto mayor será el calor generado en circunstancias ordinarias, lo cual limita considerablemente las posibilidades de tal aplicación. Ahora bien, la electricidad fluye sin producir calor en los alambres superconductores, y, al parecer, en dichos alambres se puede comprimir la corriente eléctrica, para producir un «electroimán» de potencia sin

precedentes con sólo una fracción de la fuerza, que se consume en general. Sin embargo, hay un inconveniente.

En relación con el magnetismo, se ha de tener en cuenta otra característica, además de la superconductividad. En el momento en que una sustancia se transforma en superconductora, se hace también perfectamente «diamagnética», es decir, excluye las líneas de fuerza de un campo magnético. Esto fue descubierto por W. Meissner en 1933, por lo cual se llama desde entonces «efecto Meissner». No obstante, si se hace el campo magnético lo suficientemente fuerte, puede destruirse la superconductividad de la sustancia, incluso a temperaturas muy por debajo de su punto de transición. Es como si, una vez concentradas en los alrededores las suficientes líneas de fuerza, algunas de ellas lograran penetrar en la sustancia y desapareciese la superconductividad.

Se han realizado varias pruebas con objeto de encontrar sustancias superconductoras que toleren potentes campos magnéticos. Por ejemplo, hay una aleación de estaño y niobio con una elevada temperatura de transición, 255º C. Puede soportar un campo magnético de unos 250.000 gauss, lo cual, sin duda, es una intensidad elevada. Aunque este descubrimiento se hizo en 1954, hasta 1960 no se perfeccionó el procedimiento técnico para fabricar alambres con esta aleación, por lo general, quebradiza. Todavía más eficaz es la combinación de vanadio y galio, y se han fabricado electroimanes superconductores con intensidades de hasta 500.000 gauss. En el helio se descubrió también otro sorprendente fenómeno a bajas temperaturas: la «superfluidez».

El helio es la única sustancia conocida que no puede ser llevada a un estado sólido, ni siquiera a la temperatura del cero absoluto. Hay un pequeño contenido de energía irreductible, incluso al cero absoluto, que, posiblemente, no puede ser eliminado (ya que, de hecho, su contenido en energía es «cero»); sin embargo, basta para mantener libres entre sí los extremadamente «no adhesivos» átomos de helio y, por tanto, líquidos. En 1905, el físico alemán Hermann Walther Nernst demostró que no es la energía de la sustancia la que se convierte en cero en el cero absoluto, sino una propiedad estrechamente vinculada a la misma: la «entropía». Esto valió a Nernst el premio Nobel de Química en 1920. Sea como fuere, esto no significa que no exista helio sólido en ninguna circunstancia. Puede obtenerse a

temperaturas inferiores a 0,26º C y a una presión de 25 atmósferas aproximadamente.

En 1935, Willem Hendrik Keesom y su hermana, que trabajaban en el «Laboratorio Onnes», de Leiden, descubrieron que, a la temperatura de, 270,8º C el helio líquido conducía el calor casi perfectamente. Y lo conduce con tanta rapidez, que cada una de las partes de helio está siempre a la misma temperatura. No hierva, como lo hace cualquier otro líquido en virtud de la existencia de áreas puntiformes calientes, que forman burbujas de vapor, porque en el helio líquido no existen tales áreas (si es que puede hablarse de las mismas en un líquido cuya temperatura es de menos de -271º C). Cuando se evapora, la parte superior del líquido simplemente desaparece, como si se descamara en finas láminas, por así decirlo.

El físico ruso Peter Leonidovich Kapitza siguió investigando esta propiedad y descubrió que si el helio era tan buen conductor del calor se debía al hecho que fluía con notable rapidez y transportaba casi instantáneamente el calor de una parte a otra de sí mismo (por lo menos, doscientas veces más rápido que el cobre, el segundo mejor conductor del calor). Fluiría incluso más fácilmente que un gas, tendría una viscosidad de sólo 1/1.000 de la del hidrógeno gaseoso y se difundiría a través de unos poros tan finos, que podrían impedir el paso de un gas. Más aún, este líquido superfluido formaría una película sobre el cristal y fluiría a lo largo de éste tan rápidamente como si pasase a través de un orificio. Colocando un recipiente abierto, que contuviera este líquido, en otro recipiente mayor, pero menos lleno, el fluido rebasaría el borde del cristal y se deslizaría al recipiente exterior, hasta que se igualaran los niveles de ambos recipientes.

El helio es la única sustancia que muestra este fenómeno de superfluidez. De hecho, el superfluido se comporta de forma tan distinta al helio cuando está por encima de los, 270,8º C que se le ha dado un nombre especial: helio II, para distinguirlo del helio líquido cuando se halla por encima de dicha temperatura, y que se denomina helio I.

Sólo el helio permite investigar las temperaturas cercanas al cero absoluto, por lo cual se ha convertido en un elemento muy importante, tanto en las ciencias puras como en las aplicadas. La cantidad de helio que contiene la atmósfera es despreciable, y las fuentes más importantes son los pozos de gas natural, de los

cuales escapa a veces el helio, formado a partir de la desintegración del uranio y el torio en la corteza terrestre. El gas del pozo más rico que se conoce (en Nuevo México) contiene un 7,5 % de helio.

Sorprendidos por los extraños fenómenos descubiertos en las proximidades del cero absoluto, los físicos, naturalmente, han realizado todos los esfuerzos imaginables, por llegar lo más cerca posible del mismo y ampliar sus conocimientos acerca de lo que hoy se conoce con el nombre de «criogenia». En condiciones especiales, la evaporación del helio líquido puede dar temperaturas de hasta, 272,5º C. (Tales temperaturas se miden con ayuda de métodos especiales, en los cuales interviene la electricidad, así, por la magnitud de la corriente generada en un par termoeléctrico; la resistencia de un cable hecho de algún metal no superconductor; los cambios en las propiedades magnéticas, e incluso la velocidad del sonido en el helio. La medición de temperaturas extremadamente bajas es casi tan difícil como obtenerlas.) Se han conseguido temperaturas sustancialmente inferiores a los -272,5º C gracias a una técnica que empleó por vez primera, en 1925, el físico holandés Peter Joseph Wilhelm Debye. Una sustancia «paramagnética», es decir, que concentra las líneas de fuerza magnética, se pone casi en contacto con el helio líquido, separado de éste por gas de helio, y la temperatura de todo el sistema se reduce hasta -272º C. Luego se coloca el sistema en un campo magnético. Las moléculas de la sustancia paramagnética se disponen paralelamente a las líneas del campo de fuerza, y al hacerlo desprenden calor, calor que se extrae mediante una ligera evaporación del helio ambiente. Entonces se elimina el campo magnético. Las moléculas paramagnéticas adquieren inmediatamente una orientación arbitraria. Al pasar de una orientación ordenada a otra arbitraria, las moléculas han de absorber calor, y lo único que pueden hacer es absorberlo del helio líquido. Por tanto, desciende la temperatura de éste.

Esto puede repetirse una y otra vez, con lo cual desciende en cada ocasión la temperatura del helio líquido. La técnica fue perfeccionada por el químico americano William Francis Giauque, quien recibió el premio Nobel de Química en 1949 por estos trabajos. Así, en 1957, se alcanzó la temperatura de, 272,99998º C.

En 1962, el físico germano británico Heinz London y sus colaboradores creyeron posible emplear un nuevo artificio para obtener temperaturas más bajas aún. El

helio se presenta en dos variantes: helio 3 y helio 4. Por lo general, ambas se mezclan perfectamente, pero cuando las temperaturas son inferiores a los, 272,2º C, más o menos, los dos elementos se disocian, y el helio 3 sobrenada. Ahora bien, una porción de helio 3 permanece en la capa inferior con el helio 4, y entonces se puede conseguir que el helio 3 suba y baje repetidamente a través de la divisoria, haciendo descender cada vez la temperatura, tal como ocurre con los cambios de liquidación y vaporización en el caso de refrigerantes corrientes tipo freón. En 1965 se construyeron en la Unión Soviética los primeros aparatos refrigeradores en los que se aplicó este principio.

En 1950, el físico ruso Isaak Yakovievich Pomeranchuk propuso un método de refrigeración intensa, en el que se aplicaban otras propiedades del helio 3. Por su parte, el físico británico de origen húngaro, Nicholas Kurti, sugirió, ya en 1934, el uso de propiedades magnéticas similares a las que aprovechara Giauque, si bien circunscribiendo la operación al núcleo atómico, la estructura más recóndita del átomo, es decir, prescindiendo de las moléculas y los átomos completos.

Como resultado del empleo de esas nuevas técnicas, se han alcanzado temperaturas tan bajas como los, 272,999999º C. Preguntémonos ahora: si los físicos han conseguido aproximarse tanto al *cero absoluto*, ¿podrán prescindir, en definitiva, de la escasa entropía restante y alcanzar, al fin, la ambicionada meta?

La respuesta debe ser rotundamente negativa. El cero absoluto es inalcanzable, como ya lo demostrara Nernst con sus trabajos, que le valieron el Premio Nobel (trabajo cuyo resultado suele llamarse hoy «tercera ley de la Termodinámica»). No existe procedimiento alguno para reducir la temperatura, que permita la eliminación total de la entropía. En general, siempre resulta muy laborioso eliminar el 50 % de la entropía en un sistema, sea cual sea el total. Así, pues, al paso de los 27º C (o sea, casi la temperatura ambiente) a los -123º C (más fría que cualquier temperatura de la Antártica) resulta tan difícil como pasar de los -253º C a los -263º C o de los -263º C a los -268º C, o de los -268º C a los, 270,5º C, etc. Habiéndose llegado a, 272,999999º C por encima del cero absoluto, el procedimiento para pasar a, 272,999995º C es tan complicado como pasar de los 27º C a los -123º C. Lo mismo podemos decir sobre el paso de, 272,999995º C a, 272,999992º C, y así hasta el infinito. El cero absoluto se halla a una distancia

inalcanzable por muy cerca que nos creamos de él.

Uno de los nuevos horizontes científicos abiertos por los estudios de la licuefacción de gases fue el desarrollo del interés por la obtención de altas presiones. Parecía que sometiendo a grandes presiones diversos tipos de materia (no sólo los gases), podría obtenerse una información fundamental sobre la naturaleza de la materia y sobre el interior de la Tierra. Por ejemplo, a una profundidad de 11 km, la presión es de 1.000 atmósferas; a los 643 km, de 200.000 atmósferas; a los 3.218 km de 1.400.000 atmósferas, y en el centro de la Tierra, a más de 6.400 km de profundidad, alcanza los 3.000.000 de atmósferas. (Por supuesto que la Tierra es un planeta más bien pequeño. Se calcula que las presiones centrales en Saturno son de más de 50 millones de atmósferas. Y en el coloso Júpiter, de 100 millones.)

La presión más alta que podía obtenerse en los laboratorios del siglo XIX era de 3.000 atmósferas, conseguidas por E. H. Amagat en la década de 1880. Pero en 1905, el físico americano Percy Williams Bridgman empezó a elaborar nuevos métodos, que pronto permitieron alcanzar presiones de 20.000 atmósferas e hicieron estallar las pequeñas cámaras de metal que empleaba para sus experimentos. Siguió probando con materiales más sólidos, hasta conseguir presión de hasta más de 1.000.000 de atmósferas. Por sus trabajos en este campo, recibió el premio Nobel de Física en 1946.

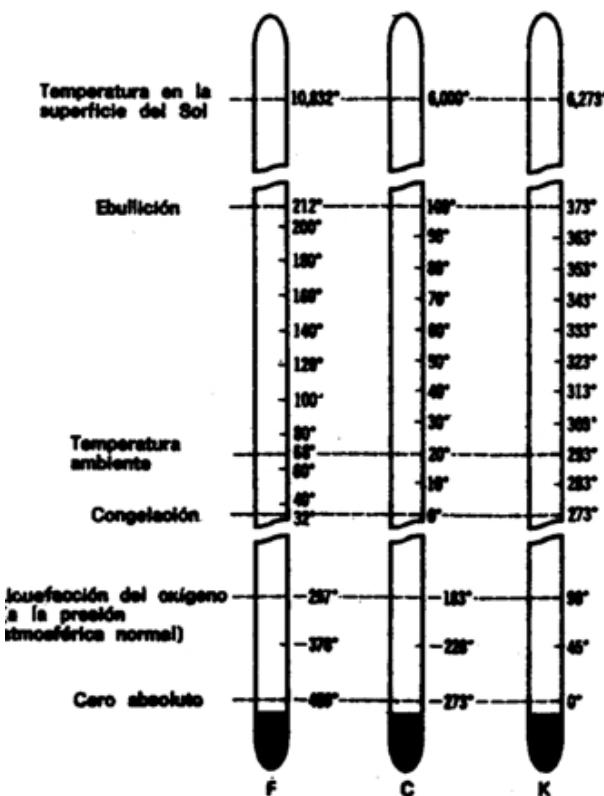
Estas presiones ultraelevadas permitieron a Bridgman forzar a los átomos y moléculas de una sustancia a adoptar agrupaciones más compactas, que a veces se mantenían una vez eliminada la presión. Por ejemplo, convirtió el fósforo amarillo corriente, mal conductor de la electricidad, en fósforo negro, una forma de fósforo conductora. Logró sorprendentes cambios, incluso en el agua. El hielo normal es menos denso que el agua líquida. Utilizando altas presiones, Bridgman produjo una serie de hielos («hielo-II», «hielo-III», etc.), que no sólo eran más densos que el líquido, sino que eran hielo sólo a temperaturas muy por encima del punto normal de congelación del agua. El hielo-VII es un sólido a temperaturas superiores a la del punto de ebullición del agua.

La palabra «diamante» es la más sugestiva en el mundo de las altas presiones. Como sabemos, el diamante es carbón cristalizado, igual que el grafito. (Cuando aparece un elemento en dos formas distintas, estas formas se llaman «alótropas»).

El diamante y el grafito constituyen los ejemplos más espectaculares de este fenómeno. Otros ejemplos los tenemos en el ozono y el oxígeno corriente.) La naturaleza química del diamante la demostraron por vez primera, en 1772, Lavoisier y algunos químicos franceses colegas suyos. Compraron un diamante y procedieron a calentarlo a temperaturas lo suficientemente elevadas como para quemarlo. Descubrieron que el gas resultante era anhídrido carbónico. Más tarde, el químico británico Smithson Tennant demostró que la cantidad de anhídrido carbónico medida sólo podía obtenerse si el diamante era carbono puro, y, en 1799, el químico francés Guyton de Morveau puso punto final a la investigación convirtiendo un diamante en un pedazo de grafito.

Desde luego, se trataba de un mal negocio; pero, ¿por qué no podía realizarse el experimento en sentido contrario? El diamante es un 55 % más denso que el grafito. ¿Por qué no someter el grafito a presión y forzar a los átomos componentes a adoptar la característica disposición más densa que poseen en el diamante?

Se realizaron muchos esfuerzos, y, al igual que había sucedido con los alquimistas, varios investigadores informaron haber alcanzado éxito. El más famoso fue el químico francés Ferdinand-Frédéric-Henri Moissan. En 1893 disolvió grafito en hierro colado fundido, e informó que había encontrado pequeños diamantes en la masa después de enfriada. La mayor parte de los objetos eran negros, impuros y pequeños; pero uno de ellos era incoloro y medía casi un milímetro de largo. Estos resultados se aceptaron en general, y durante largo tiempo se creyó que Moissan había obtenido diamantes sintéticos. Pese a ello, nunca se repitieron con éxito sus resultados.



*Comparación de las escalas termométricas Fahrenheit, Centígrada y Kelvin.*

Sin embargo, la búsqueda de diamantes sintéticos proporcionó algunos éxitos marginales. En 1891, el inventor americano Edward Goodrich Acheson descubrió, durante sus investigaciones en este campo, el carburo de silicio, al que dio el nombre comercial de «Carborundo». Este material era más duro que cualquier sustancia conocida hasta entonces, a excepción del diamante, y se ha empleado mucho como abrasivo, es decir, que se trata de una sustancia usada para pulir y abrillantar.

La eficacia de un abrasivo depende de su dureza. Un abrasivo puede pulir o moler sustancias menos duras que él, y, en este aspecto, el diamante, como la sustancia más dura, es la más eficaz. La dureza de las diversas sustancias suele medirse por la «escala de Mohs», introducida, en 1818, por el mineralólogo alemán Friedrich Mohs. Dicha escala asigna a los minerales números desde el 1, para el talco, hasta el 10, para el diamante-. Un mineral de un número determinado puede rayar todos los minerales de números más bajos que él. En la escala de Mohs, el carborundo tiene el número 9. Sin embargo, las divisiones no son iguales. En una escala

absoluta, la diferencia de dureza entre el número 10 (el diamante) y el 9 (carborundo) es cuatro veces mayor que la existente entre el 9 (carborundo) y el 1 (talco).

En la década de 1930, los químicos lograron, al fin, obtener las presiones necesarias para convertir el grafito en diamante. Dicha conversión requería presiones de 10.000 atmósferas por lo menos, y aun así, la velocidad de conversión era tan lenta, que no resultaba rentable. Si se aumentaba la temperatura, se aceleraba la conversión, pero ello exigía, a su vez, un aumento de la presión. A 1.500º C se necesitaba una presión de 30.000 atmósferas por lo menos. Todo ello demostró que Moissan y sus contemporáneos, en las condiciones de la época, no podían haber obtenido diamantes, del mismo modo que los alquimistas no podían haber obtenido oro. (Existen pruebas que Moissan fue realmente víctima de uno de sus ayudantes, quien, cansado de los aburridos experimentos, decidió poner fin a los mismos dejando caer un verdadero diamante en la mezcla de hierro fundido.)

Ayudados por los trabajos experimentales de Bridgman en la obtención de las temperaturas y presiones suficientemente altas que se necesitaban, los científicos de la «General Electric Company» lograron, al fin, el éxito en 1955. Se obtuvieron presiones de 100.000 atmósferas o más, junto con temperaturas de hasta 2.500º C. Además se empleó una pequeña cantidad de metal, como el cromo, para formar una película líquida a través del grafito. Y precisamente sobre esta película, el grafito se convirtió en diamante. Hacia 1962 se obtuvieron presiones de 200.000 atmósferas y temperaturas de 5.000º C, con las cuales el grafito podía ser convertido directamente en diamante, sin ayuda de un catalizador.

Los diamantes sintéticos son demasiado pequeños e impuros, lo cual no permite usarlos como gemas, pero sí como abrasivos y herramientas de corte. Sin embargo un producto más reciente obtenido con el mismo tratamiento puede remplazar al diamante. Es un compuesto de boro y nitrógeno (nitruro de boro) muy similar, en sus propiedades, al grafito (con la excepción que el nitruro de boro es blanco, en lugar de negro). Sometido a las altas temperaturas y presiones que convierten el grafito en diamante, el nitruro de boro experimenta una mutación similar. A partir de la disposición cristalina como la del grafito, los átomos de nitruro de boro adquieren una distribución parecida a la del diamante. En su nueva forma reciben el

nombre de «borazón». El borazón es cuatro veces más duro que el carborundo. Además, tiene la gran ventaja de ser más resistente al calor. A una temperatura de 900º C, el diamante se quema, mientras que el borazón no experimenta cambio alguno. En la década de los 60, además del diamante y el borazón se formaron más de veinte materiales nuevos mediante el empleo de altas presiones.

## Metales

La mayor parte de los elementos de la tabla periódica son metales. En realidad, sólo 20 de los 102 pueden considerarse como no metálicos. Sin embargo, el empleo de los metales se introdujo relativamente tarde. Una de las causas es la de que, con raras excepciones, los elementos metálicos están combinados en la Naturaleza con otros elementos y no son fáciles de reconocer o extraer. El hombre primitivo empleó al principio sólo materiales que pudieran manipularse mediante tratamientos simples como cincelar, desmenuzar, cortar y afilar. Ello limitaba a huesos, piedras y madera los materiales utilizables.

Su iniciación al uso de los metales se debió al descubrimiento de los meteoritos, o de pequeños núcleos de oro, o del cobre metálico presente en las cenizas de los fuegos hechos sobre rocas que contenían venas de cobre. En cualquier caso se trataba de gentes lo bastante curiosas (y afortunadas) como para encontrar las extrañas y nuevas sustancias y tratar de descubrir las formas de manejarlas, lo cual supuso muchas ventajas. Los metales diferían de la roca por su atractivo brillo una vez pulimentados. Podían ser golpeados hasta obtener de ellos láminas, o ser transformados en varillas. Podían ser fundidos y vertidos en un molde para solidificarlos. Eran mucho más hermosos y adaptables que la piedra, e ideales para ornamentación. Probablemente se emplearon para esto mucho antes que para otros usos.

Al ser raros, atractivos y no alterarse con el tiempo, los metales llegaron a valorarse hasta el punto de convertirse en un medio reconocido de intercambio. Al principio, las piezas de metal (oro, plata o cobre) tenían que ser pesadas por separado en las transacciones comerciales, pero hacia el 700 a. de J.C. fabricaron ya patrones de metal algunas entidades oficiales en el reino de Lidia, en Asia Menor y en la isla egea de Egina. Aún hoy seguimos empleando las monedas.

Lo que realmente dio valor a los metales por sí mismos fue el descubrimiento que algunos de ellos podían ser transformados en una hoja más cortante que la de la piedra, hoja que se mantenía sometida a pruebas que estropearían un hacha de piedra. Más aún, el metal era duro. Un golpe que pudiera romper una porra de madera o mellar un hacha de piedra, sólo deformaba ligeramente un objeto metálico de tamaño similar. Estas ventajas compensaban el hecho que el metal fuera más pesado que la piedra y más difícil de obtener.

El primer metal obtenido en cantidad razonable fue el cobre, que se usaba ya hacia el 4000 a. de J.C. Por sí solo, el cobre era demasiado blando para permitir la fabricación de armas o armaduras (si bien se empleaba para obtener bonitos ornamentos), pero a menudo se encontraba en la mena aleado con una pequeña cantidad de arsénico o antimonio, lo cual daba por resultado una sustancia más dura que el metal puro. Entonces se encontrarían algunas menas de cobre que contendrían estaño. La aleación de cobre-estaño (bronce) era ya lo suficientemente dura como para utilizarla en la obtención de armas. El hombre aprendió pronto a añadir el estaño. La Edad del Bronce remplazó a la de la Piedra, en Egipto y Asia Occidental, hacia el 3500 a. de J.C., y en el sudeste de Europa, hacia el 2000 a. de J.C. *La Ilíada* y *La Odisea*, de Homero, conmemoran este período de la cultura.

Aunque el hierro se conoció tan pronto como el bronce, durante largo tiempo los meteoritos fueron su única fuente de obtención. Fue, pues, sólo un metal precioso, limitado a empleos ocasionales, hasta que se descubrieron métodos para fundir la mena de hierro y obtener así éste en cantidades ilimitadas. La fundición del hierro se inició, en algún lugar del Asia Menor, hacia el 1400 a. de J.C., para desarrollarse y extenderse lentamente.

Un ejército con armas de hierro podía derrotar a otro que empleara sólo las de bronce, ya que las espadas de hierro podían cortar las de bronce. Los hititas de Asia Menor fueron los primeros en utilizar masivamente armas de hierro por lo cual vivieron un período de gran poder en el Asia Occidental. Los asirios sucedieron a los hititas. Hacia el 800 a. de J.C. tenían un ejército completamente equipado con armas de hierro, que dominaría el Asia Occidental y Egipto durante dos siglos y medio. Hacia la misma época, los dorios introdujeron la Edad del Hierro en Europa, al invadir Grecia y derrotar a los aqueos, que habían cometido el error de seguir en

la Edad del Bronce.

El hierro se obtiene, esencialmente, calentando con carbón la mena de hierro (normalmente, óxido férrico). Los átomos de carbono extraen el oxígeno del óxido férrico, dejando una masa de hierro puro. En la Antigüedad, las temperaturas empleadas no fundían el hierro, por lo cual, el producto era un metal basto, que podía moldearse golpeándolo con un martillo, es decir, se obtenía el «hierro forjado». La metalurgia del hierro a gran escala comenzó en la Edad Media. Se emplearon hornos especiales y temperaturas más elevadas, que fundían el hierro. El hierro fundido podía verterse en moldes para formar coladas, por lo cual se llamó «hierro colado». Aunque mucho más barato y duro que el hierro forjado, era, sin embargo, quebradizo y no podía ser golpeado con el martillo.

La creciente demanda de ambas formas de hierro desencadenó una tala exhaustiva de los bosques ingleses, por ejemplo, pues Inglaterra consumía su madera en las fraguas. Sin embargo, allá por 1780, el herrero inglés Abraham Darby demostró que el coke (hulla carbonizada) era tan eficaz como el carbón vegetal (leña carbonizada), si no mejor. Así se alivió la presión ejercida sobre los bosques y empezó a imponerse el carbón mineral como fuente de energía, situación que duraría más de un siglo.

Finalmente, en las postrimerías del siglo XVIII, los químicos, gracias a las investigaciones del físico francés René-Antoine Ferchault de Réaumur, comprendieron que lo que determinaba la dureza y resistencia del hierro era su contenido en carbono. Para sacar el máximo partido a tales propiedades el contenido de carbono debería oscilar entre el 0,2 y el 1,5 %, así, el acero resultante era más duro y resistente, más fuerte que el hierro colado o forjado. Pero hasta mediados del siglo XIX no fue posible mejorar la calidad del acero, salvo mediante un complicado procedimiento, consistente en agregar la cantidad adecuada de carbono al hierro forjado (labor cuyo coste era comparativamente muy elevado). Por tanto, el acero siguió siendo un metal de lujo, usado sólo cuando no era posible emplear ningún elemento sustitutivo, como en el caso de las espadas y los muelles. La Edad del Acero la inició un ingeniero británico llamado Henry Bessemer. Interesado, al principio, ante todo, en cañones y proyectiles, Bessemer inventó un sistema que permitía que los cañones dispararan más lejos y con mayor precisión.

Napoleón III se interesó en su invento y ofreció financiar sus experimentos. Pero un artillero francés hizo abortar la idea, señalando que la explosión propulsora que proyectaba Bessemer destrozaría los cañones de hierro colado que se empleaban en aquella época. Contrariado, Bessemer intentó resolver el problema mediante la obtención de un hierro más resistente. No sabía nada sobre metalurgia, por lo cual podía tratar el problema sin ideas preconcebidas. El hierro fundido era quebradizo por su contenido en carbono. Así, el problema consistía en reducir el contenido de este elemento. ¿Por qué no quemar el carbono y disiparlo; fundiendo el hierro y haciendo pasar a través de éste un chorro de aire? Parecía una idea ridícula. Lo normal era que el chorro de aire enfriase el metal fundido y provocase su solidificación. De todas formas, Bessemer lo intentó, y al hacerlo descubrió que ocurría precisamente lo contrario. A medida que el aire quemaba el carbono, la combustión desprendía calor y se elevaba la temperatura del hierro, en vez de bajar. El carbono se quemaba muy bien. Mediante los adecuados controles podía producirse acero en cantidad y a un costo comparativamente bajo.

En 1856, Bessemer anunció su «alto horno». Los fabricantes de hierro adoptaron el método con entusiasmo; pero luego lo abandonaron, al comprobar que el acero obtenido era de calidad inferior. Bessemer descubrió que la mena de hierro empleada en la industria contenía fósforo (elemento que no se encontraba en sus muestras de 4 menas). A pesar que explicó a los fabricantes de hierro que la causa del fracaso era el fósforo, éstos se negaron a hacer una nueva prueba. Por consiguiente, Bessemer tuvo que pedir prestado dinero e instalar su propia acería en Sheffield. Importó de Suecia mena carente de fósforo y produjo enseguida acero a un precio muy inferior al de los demás fabricantes de hierro.

En 1875, el metalúrgico británico Sidney Gilchrist Thomas descubrió que revistiendo el interior del horno con piedra caliza y magnesia, podía extraer fácilmente el fósforo del hierro fundido. Con este sistema podía emplearse en la fabricación del acero casi cualquier tipo de mena. Mientras tanto, el inventor anglo alemán Karl Wilhelm Siemens desarrolló, en 1868, el «horno de solera abierta», en el cual la fundición bruta era calentada junto con mena de hierro. Este proceso reducía también el contenido del fósforo en la mena.

Ya estaba en marcha la «Edad del Acero». El nombre no es una simple frase. Sin acero, serían casi inimaginables los rascacielos, los puentes colgantes, los grandes barcos, los ferrocarriles y muchas otras construcciones modernas, y, a pesar del reciente empleo de otros metales, el acero sigue siendo el metal preferido para muchos objetos, desde el bastidor de los automóviles hasta los cuchillos.

(Desde luego, es erróneo pensar que un solo paso adelante puede aportar cambios trascendentales en la vida de la Humanidad. El progreso ha sido siempre el resultado de numerosos adelantos relacionados entre sí, que forman un gran complejo. Por ejemplo, todo el acero fabricado en el mundo no permitiría levantar los rascacielos sin la existencia de ese artefacto cuya utilidad se da por descontada con excesiva frecuencia: el ascensor. En 1861, el inventor americano Elisha Graves Otis patentó un ascensor hidráulico, y en 1889, la empresa por él fundada instaló los primeros ascensores eléctricos en un edificio comercial neoyorquino.)

Una vez obtenido con facilidad acero barato, se pudo experimentar con la adición de otros metales («aleaciones de acero»), para ver si podía mejorarse aún más el acero. El británico Robert Abbott Hadfield, experto en metalurgia, fue el primero en trabajar en este terreno. En 1882 descubrió que añadiendo al acero un 13 % de manganeso, se obtenía una aleación más sólida, que podía utilizarse en la maquinaria empleada para trabajos muy duros, por ejemplo, el triturado de metales. En 1900, una aleación de acero que contenía tungsteno y cromo siguió manteniendo su dureza a altas temperaturas, incluso al rojo vivo y resultó excelente para máquinas-herramientas que hubieran de trabajar a altas velocidades. Hoy existen innumerables aceros de aleación para determinados trabajos, que incluyen, por ejemplo, molibdeno, níquel, cobalto y vanadio.

La principal dificultad que plantea el acero es su vulnerabilidad y la corrosión, proceso que devuelve el hierro al estado primitivo de mena del que proviene. Un modo de combatirlo consiste en proteger el metal pintándolo o recubriendo con planchas de un metal menos sensible a la corrosión, como el níquel, cromo, cadmio o estaño. Un método más eficaz aún es el de obtener una aleación que no se corroa. En 1913, el británico Harry Brearley, experto en metalurgia, descubrió casualmente esta aleación. Estaba investigando posibles aleaciones de acero que fueran especialmente útiles para los cañones de fusil. Entre las muestras descartó como

inadecuadas una aleación de níquel y cromo. Meses más tarde advirtió que dicha muestra seguía tan brillante como al principio, mientras que las demás estaban oxidadas. Así nació el «acero inoxidable». Es demasiado blando y caro para emplearlo en la construcción a gran escala, pero de excelentes resultados en cuchillería y en otros objetos donde la resistencia a la corrosión es más importante que su dureza.

Puesto que en todo el mundo se gastan algo así como mil millones de dólares al año en el casi inútil esfuerzo de preservar de la corrosión el hierro y el acero, prosiguieron los esfuerzos en la búsqueda de un anticorrosivo. En este sentido es interesante un reciente descubrimiento: el de los pertecnenatos, compuestos que contienen tecnecio y protegen el hierro contra la corrosión. Como es natural, este elemento, muy raro, fabricado por el hombre, nunca será lo bastante corriente como para poderlo emplear a gran escala, pero constituye una valiosa herramienta de trabajo. Su radiactividad permite a los químicos seguir su destino y observar su comportamiento en la superficie del hierro. Si esta aplicación del tecnecio conduce a nuevos conocimientos que ayuden a resolver el problema de la corrosión, ya sólo este logro bastaría para amortizar en unos meses todo el dinero que se ha gastado durante los últimos 25 años en la investigación de elementos sintéticos.

Una de las propiedades más útiles del hierro es su intenso ferromagnetismo. El hierro mismo constituye un ejemplo de «imán débil». Queda fácilmente imantado bajo la influencia de un campo eléctrico o magnético, o sea, que sus dominios magnéticos (véase capítulo IV), son alineados con facilidad. También puede desmantelarse muy fácilmente cuando se elimina el campo magnético, con lo cual los dominios vuelven a quedar orientados al azar. Esta rápida pérdida de magnetismo puede ser muy útil, al igual que en los electroimanes, donde el núcleo de hierro es imantado con facilidad al dar la corriente; pero *debería* quedar desmantelado con la misma facilidad cuando cesa el paso de la corriente.

Desde la Segunda Guerra Mundial se ha conseguido desarrollar una nueva clase de imanes débiles: las «ferritas», ejemplos de las cuales son la ferrita de níquel ( $\text{Fe}_2\text{O}_4\text{Ni}$ ) y la ferrita de manganeso ( $\text{Fe}_2\text{O}_4\text{Mn}$ ), que se emplean en las computadoras como elementos que pueden imantarlas o desmantarlas con la máxima rapidez y facilidad.

Los «imanres duros», cuyos dominios son difíciles de orientar o, una vez orientados, difíciles de desorientar, retienen esta propiedad durante un largo período de tiempo, una vez imantados. Varias aleaciones de acero son los ejemplos más comunes, a pesar de haberse encontrado imanes particularmente fuertes y potentes entre las aleaciones que contienen poco o ningún hierro. El ejemplo más conocido es el del «alnico», descubierto en 1931 y una de cuyas variedades está formada por aluminio, níquel y cobalto, más una pequeña cantidad de cobre. (El nombre de la aleación está compuesto por la primera sílaba de cada una de las sustancias.)

En la década de 1950 se desarrollaron técnicas que permitían emplear como imán el polvo de hierro; las partículas eran tan pequeñas, que consistían en dominios individuales; éstos podían ser orientados en el seno de una materia plástica fundida, que luego se podía solidificar, sin que los dominios perdieran la orientación que se les había dado. Estos «imanres plásticos» son muy fáciles de moldear, aunque pueden obtenerse también dotados de gran resistencia.

En las últimas décadas se han descubierto nuevos metales de gran utilidad, que eran prácticamente desconocidos hace un siglo o poco más y algunos de los cuales no se han desarrollado hasta nuestra generación. El ejemplo más sorprendente es el del aluminio, el más común de todos los metales (un 60 % más que el hierro). Pero es también muy difícil de extraer de sus menas. En 1825, Hans Christian Oersted, quien había descubierto la relación que existe entre electricidad y magnetismo, separó un poco de aluminio en forma impura. A partir de entonces, muchos químicos trataron, sin éxito, de purificar el metal, hasta que al fin, en 1854, el químico francés Henri-Étienne Sainte-Clair Deville ideó un método para obtener aluminio en cantidades razonables. El aluminio es químicamente tan activo, que se vio obligado a emplear sodio metálico (elemento más activo aún) para romper la sujeción que ejercía el metal sobre los átomos vecinos. Durante un tiempo, el aluminio se vendió a centenares de dólares el kilo, lo cual lo convirtió prácticamente en un metal precioso. Napoleón III se permitió el lujo de tener una cubería de aluminio, e hizo fabricar para su hijo un sonajero del mismo metal; en los Estados Unidos, y como prueba de la gran estima de la nación hacia George Washington, su monumento fue coronado con una plancha de aluminio sólido.

En 1886, Charles Martin Hall, joven estudiante de Química del «Oberlin College», quedó tan impresionado al oír decir a su profesor que quien descubriese un método barato para fabricar aluminio se haría inmensamente rico, que decidió intentarlo. En un laboratorio casero, instalado en su jardín, se dispuso a aplicar la teoría de Humphry Davy, según la cual el paso de una corriente eléctrica a través de metal fundido podría separar los iones metálicos y depositarlos en el cátodo. Buscando un material que pudiese disolver el aluminio, se decidió por la criolita, mineral que se encontraba en cantidades razonables sólo en Groenlandia. (Actualmente se puede conseguir criolita sintética.) Hall disolvió el óxido de aluminio en la criolita, fundió la mezcla e hizo pasar a través de la misma una corriente eléctrica. Como es natural, en el cátodo se recogió aluminio puro, Hall corrió hacia su profesor con los primeros lingotes del metal. (Hoy se conservan en la «Aluminum Company of America».) Mientras sucedía esto, el joven químico francés Paul-Louis Toussaint Héroult, de la misma edad que Hall (veintidós años), descubrió un proceso similar en el mismo año. (Para completar la serie de coincidencias, Hall y Héroult murieron en 1914.) El proceso Hall-Héroult convirtió el aluminio en un metal barato, a pesar que nunca lo sería tanto como el acero, porque la mena de aluminio es menos común que la del hierro, y la electricidad (clave para la obtención de aluminio) es más cara que el carbón (clave para la del acero). De todas formas, el aluminio tiene dos grandes ventajas sobre el acero. En primer lugar, es muy liviano (pesa la tercera parte del acero). En segundo lugar, la corrosión toma en él la forma de una capa delgada y transparente, que protege las capas más profundas, sin afectar el aspecto del metal.

El aluminio puro es más bien blando, lo cual se soluciona aleándolo con otro metal. En 1906 el metalúrgico alemán Alfred Wilm obtuvo una aleación más fuerte añadiéndole un poco de cobre y una pequeñísima cantidad de magnesio. Vendió sus derechos de patente a la metalúrgica «Durener», de Alemania, compañía que dio a la aleación el nombre de «Duraluminio».

Los ingenieros comprendieron en seguida lo valioso que resultaría en la aviación un metal ligero, pero resistente. Una vez que los alemanes hubieron empleado el «Duraluminio» en los zeppelines durante la Primera Guerra Mundial, y los ingleses se enteraron de su composición al analizar el material de un zeppelin que se había

estrellado, se extendió por todo el mundo el empleo de este nuevo metal. Debido a que el «Duraluminio» no era tan resistente a la corrosión como el aluminio, los metalúrgicos lo recubrieron con delgadas películas de aluminio puro, obteniendo así el llamado «Alclad».

Hoy existen aleaciones de aluminio que, a igualdad de pesos, son más resistentes que muchos aceros. El aluminio tiende a remplazar el acero en todos los usos en que la ligereza y la resistencia a la corrosión son más importantes que la simple dureza. Como todo el mundo sabe, hoy es de empleo universal, pues se utiliza en aviones, cohetes, trenes, automóviles, puertas, pantallas, techos, pinturas, utensilios de cocina, embalajes, etc.

Tenemos también el magnesio, metal más ligero aún que el aluminio. Se emplea principalmente en la aviación, como era de esperar. Ya en 1910, Alemania usaba aleaciones de magnesio y cinc para estos fines. Tras la Primera Guerra Mundial, se utilizaron cada vez más las aleaciones de magnesio y aluminio.

Sólo unas cuatro veces menos abundante que el aluminio, aunque químicamente más activo, el magnesio resulta más difícil de obtener a partir de las menas. Mas, por fortuna, en el océano existe una fuente muy rica del mismo. Al contrario que el aluminio o el hierro, el magnesio se halla presente en grandes cantidades en el agua de mar. El océano transporta materia disuelta, que forma hasta un 3,5 % de su masa. De este material en disolución, el 3,7 % es magnesio. Por tanto, el océano, considerado globalmente, contiene unos dos mil billones (2.000.000.000.000) de toneladas de magnesio, o sea, todo el que podamos emplear en un futuro indefinido.

El problema consistía en extraerlo. El método escogido fue el de bombear el agua del mar hasta grandes tanques y añadir óxido de cal (obtenido también del agua del mar, es decir, de las conchas de las ostras). El óxido de cal reacciona con el agua y el ion del magnesio para formar hidróxido de magnesio, que es insoluble y, por tanto, precipita en la solución. El hidróxido de magnesio se convierte en cloruro de magnesio mediante un tratamiento con ácido clorhídrico, y luego se separa el magnesio del cloro por medio de una corriente eléctrica.

En enero de 1941, la «Dow Chemical Company» produjo los primeros lingotes de magnesio a partir del agua del mar, y la planta de fabricación se preparó para decuplicar la producción de magnesio durante los años de la guerra.

De hecho, cualquier elemento que pueda extraerse del agua de mar a un precio razonable, puede considerarse como de una fuente virtualmente ilimitada, ya que, después de su uso, retorna siempre al mar. Se ha calculado que si se extrajesen cada año del agua de mar 10 millones de toneladas de magnesio durante un millón de años, el contenido del océano en magnesio descendería de su porcentaje actual, que es del 0,13 al 0,12 %.

Si el acero fue el «metal milagroso» de mediados del siglo XIX, el aluminio fue el del principio del siglo XX y el magnesio el de mediados del mismo, ¿cuál será el nuevo metal milagroso? Las posibilidades son limitadas. En realidad hay sólo siete metales comunes en la corteza terrestre. Además del hierro, aluminio y magnesio, tenemos el sodio, potasio, calcio y titanio: El sodio, potasio y calcio son demasiado activos químicamente para ser empleados como metales en la construcción. (Por ejemplo, reaccionan violentamente con el agua.) Ello nos deja sólo el titanio, que es unas ocho veces menos abundante que el hierro.

El titanio posee una extraordinaria combinación de buenas cualidades: su peso resulta algo superior a la mitad del acero; es mucho más resistente que el aluminio o el acero, difícilmente afectado por la corrosión y capaz de soportar temperaturas muy elevadas. Por todas estas razones, el titanio se emplea hoy en la aviación, construcción de barcos, proyectiles teledirigidos y en todos los casos en que sus propiedades puedan encontrar un uso adecuado.

¿Por qué ha tardado tanto la Humanidad en descubrir el valor del titanio? La razón es casi la misma que puede esgrimirse para el aluminio y el magnesio. Reacciona demasiado rápidamente con otras sustancias, y en sus formas impuras, combinado con oxígeno o nitrógeno, es un metal poco atractivo, quebradizo y aparentemente inútil. Su resistencia y sus otras cualidades positivas se tienen sólo cuando es aislado en su forma verdaderamente pura (en el vacío o bajo un gas inerte). El esfuerzo de los metalúrgicos ha tenido éxito en el sentido que 1 kg de titanio, que costaba 6 dólares en 1947, valía 3 en 1969.

No se tienen que encauzar forzosamente las investigaciones para descubrir metales «maravillosos». Los metales antiguos (y también algunos no metales) pueden llegar a ser más «milagrosos» de lo que lo son actualmente.

En el poema *The Deacon's Masterpiece*, de Oliver Wendell Holmes, se cuenta la historia de una «calesa» construida tan cuidadosamente, que no tenía ni un solo punto débil. Al fin, el carricoche desapareció por completo, se descompuso en polvo. Pero había durado 100 años.

La estructura atómica de los sólidos cristalinos, tanto metales como no metales, es muy parecida a la de esta imaginaria calesa. Los cristales de un metal están acribillados por cientos de fisuras y araños submicroscópicos. Bajo la fuerza de la presión, en uno de esos puntos débiles puede iniciarse una fractura y extenderse a través de todo el cristal. Si, al igual que la maravillosa calesa del diácono, un cristal pudiese estar construido sin puntos débiles, tendría muchísima más resistencia.

Estos cristales sin ningún punto débil toman la forma de delgados filamentos, denominados «triquitas», sobre la superficie de los cristales. La resistencia a la elongación de las triquitas de carbono puede alcanzar hasta las  $1.400 \text{ Tm/cm}^2$ , es decir, de 16 a 17 veces más que las del acero. Si pudieran inventarse métodos para la fabricación de metal sin defecto alguno y en grandes cantidades, encontraríamos viejos metales, que podrían ser nuevos y «milagrosos». Por ejemplo, en 1968 los científicos soviéticos fabricaron un delicado cristal de tungsteno sin defecto alguno, que podía soportar una carga de  $1.635 \text{ Tm/cm}^2$ , cantidad respetable comparada con las  $213 \text{ Tm/cm}^2$  de los mejores aceros. Y aunque tales fibras puras no podían adquirirse a granel, la integración de fibras nítidas con los metales serviría para reforzarlos y fortalecerlos.

También en 1968 se inventó un nuevo método para combinar metales. Los dos métodos de importancia tradicional eran, hasta entonces, la aleación, o sea, la fusión simultánea de dos o más metales, con objeto de formar una mezcla más o menos homogénea, y la galvanización, que consiste en unir sólidamente un metal con otro. (Para ello se aplica una sutil capa de metal caro a una masa voluminosa de metal barato, de forma que la superficie resulta tan bonita y anticorrosiva como la del oro, por ejemplo, pero cuyo conjunto es casi tan económico como el cobre.)

El metalúrgico americano Newell C. Cook y sus colaboradores intentaron galvanizar con silicio una superficie de platino, empleando fluorita fundida como solución para bañar el platino. Contra todos los pronósticos, no hubo galvanización. Al parecer, la fluorita fundida disolvió la fina película de oxígeno que cubre, por lo general, casi todos los metales, incluso los más resistentes, y dejó «expuesta» la superficie del platino a los átomos de silicio.

Así, pues, éstos se abrieron paso por la superficie, en lugar de unirse a ella por la parte inferior de los átomos de oxígeno. El resultado fue que una fina capa externa del platino se transformó en aleación.

Siguiendo esta inesperada línea de investigación, Cook descubrió que se podían combinar muchas sustancias para formar una aleación «galvanizada» sobre metal puro (o sobre otra aleación). Llamó a este proceso «metalización», cuya utilidad demostró. Así, se fortalece excepcionalmente el cobre agregándole un 2-4 % de berilio en forma de aleación corriente. Pero se puede obtener un resultado idéntico si se «beriliza» el cobre, cuyo costo es muy inferior al que representaría el berilio puro, elemento relativamente raro. También se endurece el acero metalizado con boro. La adición de silicio, cobalto y titanio da asimismo unas propiedades útiles.

Dicho de otra forma: si los metales maravillosos no se encuentran en la Naturaleza, el ingenio humano es capaz de crearlos.

## Capítulo 6

### LAS PARTÍCULAS

#### **El Átomo Nuclear**

Como ya hemos indicado en el capítulo anterior, hacia 1900 se sabía que el átomo no era una partícula simple e indivisible, pues contenía, por lo menos, un corpúsculo subatómico: el electrón, cuyo descubridor fue J. J. Thomson, el cual supuso que los electrones se arracimaban como uvas en el cuerpo principal del átomo con carga positiva.

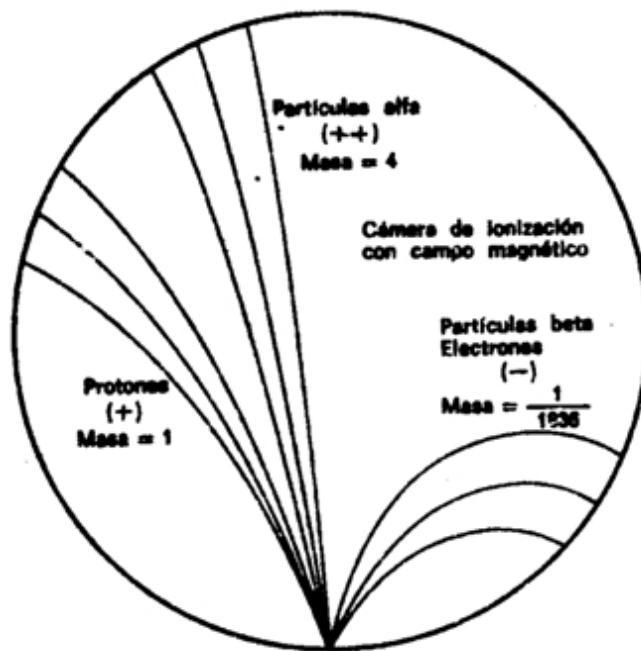
Poco tiempo después resultó evidente que existían otras subpartículas en el interior del átomo. Cuando Becquerel descubrió la radiactividad, identificó como emanaciones constituidas por electrones algunas de las radiaciones emitidas por sustancias radiactivas. Pero también quedaron al descubierto otras emisiones. Los Curie en Francia y Ernest Rutherford en Inglaterra, detectaron una emisión bastante menos penetrante que el flujo electrónico. Rutherford la llamó «rayos alfa», y denominó «rayos beta» a la emisión de electrones. Los electrones volantes constitutivos de esta última radiación son, individualmente, «partículas beta». Asimismo se descubrió que los rayos alfa estaban formados por partículas, que fueron llamadas «partículas alfa». Como ya sabemos, «alfa» y «beta» son las primeras letras del alfabeto griego.

Entretanto, el químico francés Paul Ulrich Villard descubría una tercera forma de emisión radiactiva, a la que dio el nombre de «rayos gamma», es decir, la tercera letra del alfabeto griego. Pronto se identificó como una radiación análoga a los rayos X, aunque de menor longitud de onda.

Mediante sus experimentos, Rutherford comprobó que un campo magnético desviaba las partículas alfa con mucha menos fuerza que las partículas beta. Por añadidura, las desviaba en dirección opuesta, lo cual significaba que la partícula alfa tenía una carga positiva, es decir, contraria a la negativa del electrón. La intensidad de tal desviación permitió calcular que la partícula alfa tenía, como mínimo, una masa dos veces mayor que la del hidrógenión cuya carga positiva era la más pequeña conocida hasta entonces. Así, pues, la masa y la carga de la partícula influían a la vez sobre la intensidad de la desviación. Si la carga positiva de la

partícula alfa era igual a la del hidrógenión, su masa sería dos veces mayor que la de éste; si su carga fuera el doble, la partícula sería cuatro veces mayor que el hidrógenión; etcétera.

En 1909, Rutherford solucionó el problema aislando las partículas alfa. Puso material radiactivo en un tubo de vidrio fino rodeado por vidrio grueso e hizo el vacío entre ambas superficies. Las partículas alfa pudieron atravesar la pared fina, pero no la gruesa. Rebotaron, por decirlo así, contra la pared externa, y al hacerlo perdieron energía, o sea, capacidad para atravesar incluso la pared delgada. Por consiguiente quedaron aprisionadas entre ambas. Rutherford recurrió entonces a la descarga eléctrica para excitar las partículas alfa, hasta llevarlas a la incandescencia. Entonces mostraron las rayas espectrales del helio. (Hay pruebas que las partículas alfa producidas por sustancias radiactivas en el suelo constituyen el origen del helio en los pozos de gas natural.)



*Deflexión de las partículas por un campo magnético.*

Si la partícula alfa es helio, su masa debe ser cuatro veces mayor que la del hidrógeno. Ello significa que la carga positiva de este último, equivale a dos unidades, tomando como unidad la carga del hidrógenión.

Más tarde, Rutherford identificó otra partícula positiva en el átomo. A decir verdad, había sido detectada y reconocida ya muchos años antes. En 1886, el físico alemán Eugen Goldstein, empleando un tubo catódico con un cátodo perforado, descubrió una nueva radiación, que fluía por los orificios del cátodo en dirección opuesta a la de los rayos catódicos. La denominó *Kanalstrahlen* («rayos canales»). En 1902, esta radiación sirvió para detectar por vez primera el efecto Doppler-Fizeau (véase capítulo 1) respecto a las ondas luminosas de origen terrestre. El físico alemán Johannes Stark orientó un espectroscopio de tal forma que los rayos cayeron sobre éste, revelando la desviación hacia el violeta. Por estos trabajos se le otorgó el premio Nobel de Física en 1919.

Puesto que los rayos canales se mueven en dirección opuesta a los rayos catódicos de carga negativa, Thomson propuso que se diera a esta radiación el nombre de «rayos positivos». Entonces se comprobó que las partículas de los «rayos positivos» podían atravesar fácilmente la materia. De aquí, que fuesen considerados, por su volumen, mucho más pequeños que los iones corrientes o átomos. La desviación determinada, en su caso, por un campo magnético, puso de relieve que la más ínfima de esas partículas tenía carga y masa similares a las del hidrogenión, suponiendo que este ion contuviese la mínima unidad posible de carga positiva. Por consiguiente, se dedujo que la partícula del rayo positivo era la partícula positiva elemental, o sea, el elemento contrapuesto al electrón. Rutherford la llamó «protón» del neutro griego *proton*. («lo primero»).

Desde luego, el protón y el electrón llevan cargas eléctricas iguales, aunque opuestas; ahora bien, la masa del protón, referida al electrón, es 1.836 veces mayor. Parecía probable, pues, que el átomo estuviese compuesto por protones y electrones, cuyas cargas se equilibraran entre sí. También parecía claro que los protones se hallaban en el interior del átomo y no se desprendían, como ocurría fácilmente con los electrones. Pero entonces se planteó el gran interrogante: ¿cuál era la estructura de esas partículas en el átomo?

El propio Rutherford empezó a vislumbrar la respuesta. Entre 1906 y 1908 realizó constantes experimentos disparando partículas alfa contra una lámina sutil de metal (como oro o platino), para analizar sus átomos. La mayor parte de los proyectiles atravesaron la barrera sin desviarse (como balas a través de las hojas de un árbol).

Pero no todos. En la placa fotográfica que le sirvió de blanco tras el metal, Rutherford descubrió varios impactos dispersos e insospechados alrededor del punto central, y comprobó que algunas partículas habían rebotado. Era como si en vez de atravesar las hojas, algunos proyectiles hubiesen chocado contra algo más sólido. Rutherford supuso que aquellas «balas» habían chocado contra una especie de núcleo denso, que ocupaba sólo una parte mínima del volumen atómico. Cuando las partículas alfa se proyectaban contra la lámina metálica, solían encontrar electrones y, por decirlo así, apartaban las burbujas de partículas luminosas sin sufrir desviaciones. Pero, a veces, la partícula alfa tropezaba con un núcleo atómico más denso, y entonces se desviaba. Ello ocurría en muy raras ocasiones, lo cual demostraba que los núcleos atómicos debían ser realmente ínfimos, porque un proyectil había de encontrar por fuerza muchos millones de átomos al atravesar la lámina metálica.

Era lógico suponer, pues, que los protones constituyan ese núcleo duro. Rutherford representó los protones atómicos como elementos apiñados alrededor de un minúsculo «núcleo atómico» que servía de centro. (Desde entonces acá se ha demostrado que el diámetro de ese núcleo equivale a algo más de una cienmilésima del volumen total del átomo.)

He aquí, pues, el modelo básico del átomo: un núcleo de carga positiva que ocupa muy poco espacio, pero que representa casi toda la masa atómica; está rodeado por electrones corticales, que abarcan casi todo el volumen del átomo, aunque, prácticamente no tienen apenas relación con su masa. En 1908 se concedió el premio Nobel de Química a Rutherford por su extraordinaria labor investigadora sobre la naturaleza de la materia.

Desde entonces se pueden describir con términos más concretos los átomos específicos y sus diversos comportamientos. Por ejemplo, el átomo de hidrógeno posee un solo electrón. Si se elimina, el protón restante se asocia inmediatamente a alguna molécula vecina; y cuando el núcleo desnudo de hidrógeno no encuentra por este medio un electrón que participe, actúa como un protón, es decir, una partícula subatómica, lo cual le permite penetrar en la materia y reaccionar con otros núcleos si conserva la suficiente energía.

El helio, que posee dos electrones, no cede uno con tanta facilidad. Como ya dijimos en el capítulo anterior, sus dos electrones forman un caparazón hermético, por lo cual el átomo es inerte. No obstante, si se despoja al helio de ambos electrones, se convierte en una partícula alfa, es decir, una partícula subatómica portadora de dos unidades de carga positiva.

Hay un tercer elemento, el litio, cuyo átomo tiene tres electrones. Si se despoja de uno o dos, se transforma en ion. Y si pierde los tres, queda reducido a un núcleo desnudo... con una carga positiva de tres unidades.

Las unidades de una carga positiva en el núcleo atómico deben ser numéricamente idénticas a los electrones que contiene como norma, pues el átomo suele ser un cuerpo neutro. Y, de hecho, los números atómicos de sus elementos se basan en sus unidades de carga positiva, no en las de carga negativa, porque resulta fácil hacer variar el número de electrones atómicos dentro de la formación iónica, pero, en cambio, se encuentran grandes dificultades si se desea alterar el número de sus protones.

Apenas esbozado el esquema de la construcción atómica, surgieron nuevos enigmas. El número de unidades con carga positiva en un núcleo no equilibró, en ningún caso, el peso nuclear ni la masa, exceptuando el caso del átomo de hidrógeno. Para citar un ejemplo, se averiguó que el núcleo de helio tenía una carga positiva dos veces mayor que la del núcleo de hidrógeno; pero, como ya se sabía, su masa era cuatro veces mayor que la de este último. Y la situación empeoró progresivamente a medida que se descendía por la tabla de elementos, e incluso cuando se alcanzó el uranio, se encontró un núcleo con una masa igual a 238 protones, pero una carga que equivalía sólo a 92. ¿Cómo era posible que un núcleo que contenía cuatro protones, según se suponía del núcleo helio-, tuviera sólo dos unidades de carga positiva? Según la primera y más simple conjectura emitida, la presencia en el núcleo de partículas cargadas negativamente y con un peso despreciable, neutralizaba las dos unidades de su carga. Como es natural, se pensó también en el electrón. Se podría componer el rompecabezas si se suponía que el núcleo de helio estaba integrado por cuatro protones y dos electrones neutralizadores, lo cual dejaba libre una carga positiva neta de dos, y así sucesivamente, hasta llegar al uranio, cuyo núcleo tendría, pues, 238 protones y

146 electrones, con 92 unidades libres de carga positiva. El hecho que los núcleos radiactivos emitieran electrones, según se había comprobado ya, por ejemplo, con las partículas beta- reforzó esta idea general.

Dicha teoría prevaleció durante más de una década, hasta que, por caminos indirectos, llegó una respuesta mejor, como resultado de otras investigaciones. Pero entre tanto se habían presentado algunas objeciones rigurosas contra dicha hipótesis. Por lo pronto, si el núcleo estaba constituido esencialmente de protones, mientras que los ligeros electrones no aportaban prácticamente ninguna contribución a la masa, ¿cómo se explicaba que las masas relativas de varios núcleos no estuvieran representadas por números enteros? Según los pesos atómicos conocidos, el núcleo del átomo cloro, por ejemplo, tenía una masa 35,5 veces mayor que la del núcleo de hidrógeno. ¿Acaso significaba esto que contenía 35,5 protones? Ningún científico, ni entonces ni ahora- podía aceptar la existencia de medio protón.

Este singular interrogante encontró una respuesta incluso antes de solventar el problema principal, y ello dio lugar a una interesante historia.

## Isótopos

Allá por 1816, el físico inglés William Prout había insinuado ya que el átomo de hidrógeno debía de entrar en la constitución de todos los átomos. Con el tiempo se fueron desvelando los pesos atómicos, y la teoría de Prout quedó arrinconada, pues se comprobó que muchos elementos tenían pesos fraccionarios (para lo cual se tomó el oxígeno, tipificado a 16). El cloro, según hemos dicho- tiene un peso atómico aproximado de 35,5, o para ser exactos, de 35,457. Otros ejemplos son el antimonio, con 121,75; el bario, con 137,34; el boro, con 10,811, y el cadmio, con 112,41.

Hacia principios de siglo se hizo una serie de observaciones desconcertantes, que condujeron al esclarecimiento. El inglés William Crookes (el del «tubo Crookes») logró disociar del uranio una sustancia cuya ínfima cantidad resultó ser mucho más radiactiva que el propio uranio. Apoyándose en su experimento, afirmó que el uranio no tenía radiactividad, y que ésta procedía exclusivamente de dicha impureza, que él denominó «uranio X». Por otra parte, Henri Becquerel descubrió

que el uranio purificado y ligeramente radiactivo adquiría mayor radiactividad con el tiempo, por causas desconocidas. Si se dejaba reposar durante algún tiempo, se podía extraer de él repetidas veces uranio activo X. Para expresarlo de otra forma: por su propia radiactividad, el uranio se convertía en el uranio X, más activo aún. Por entonces, Rutherford, a su vez, separó del torio un «torio X» muy radiactivo, y comprobó también que el torio seguía produciendo más torio X. Hacia aquellas fechas se sabía ya que el más famoso de los elementos radiactivos, el radio, emitía un gas radiactivo, denominado radón. Por tanto, Rutherford y su ayudante, el químico Frederick Soddy, dedujeron que, durante la emisión de sus partículas, los átomos radiactivos se transformaban en otras variedades de átomos radiactivos. Varios químicos, que investigaron tales transformaciones, lograron obtener un surtido muy variado de nuevas sustancias, a las que dieron nombres tales como radio A, radio B, mesotorio I, mesotorio II y actinio C. Luego los agruparon todos en tres series, de acuerdo con sus históricos atómicos. Una serie se originó del uranio disociado; otra, del torio; y la tercera, del actinio (si bien más tarde se encontró un predecesor del actinio, llamado «protactinio»). En total se identificaron unos cuarenta miembros de esas series, y cada uno se distinguió por su peculiar esquema de radiación. Pero los productos finales de las tres series fueron idénticos: en último término, todas las cadenas de sustancias conducían al mismo elemento estable: plomo.

Ahora bien, esas cuarenta sustancias no podían ser, sin excepción, elementos disociados; entre el uranio (92) y el plomo (82) había sólo diez lugares en la tabla periódica, y todos ellos, salvo dos, pertenecían a elementos conocidos. En realidad, los químicos descubrieron que aunque las sustancias diferían entre sí por su radiactividad, algunas tenían propiedades químicas idénticas. Por ejemplo, ya en 1907, los químicos americanos Herbert Newby McCoy y W. H. Ross descubrieron que el «radio-torio», (uno entre los varios productos de la desintegración del torio) mostraba el mismo comportamiento químico que el torio, y el «radio D», el mismo que el del plomo; tanto, que era llamado a menudo «radioplomo». De todo ello se infirió que tales sustancias eran en realidad variedades del mismo elemento: el radiotorio, una forma del torio; el radioplomo, un miembro de una familia de plomos, y así sucesivamente.

En 1913, Soddy esclareció esta idea y le dio más amplitud. Demostró que cuando un átomo emitía una partícula alfa, se transformaba en un elemento que ocupaba dos lugares más abajo en la lista de elementos, y que cuando emitía una partícula beta, ocupaba, después de su transformación, el lugar inmediatamente superior. Con arreglo a tal norma, el «radiotorio» descendería en la tabla hasta el lugar del torio, y lo mismo ocurriría con las sustancias denominadas «uranio X» y «uranio Y», es decir, que las tres serían variedades del elemento 90. Asimismo, el «radio D», el «radio B», el «torio B» y el «actinio B» compartirían el lugar del plomo como variedades del elemento 82.

Soddy dio el nombre de «isótopos» (del griego *iso* y *topos*, «el mismo lugar») a todos los miembros de una familia de sustancias que ocupaban el mismo lugar en la tabla periódica. En 1921 se le concedió el premio Nobel de Química.

El modelo protón-electrón del núcleo concordó perfectamente con la teoría de Soddy sobre los isótopos. Al retirar una partícula alfa de un núcleo, se reducía en dos unidades la carga positiva de dicho núcleo, exactamente lo que necesitaba para bajar dos lugares en la tabla periódica. Por otra parte, cuando el núcleo expulsaba un electrón (partícula beta), quedaba sin neutralizar un protón adicional, y ello incrementaba en una unidad la carga positiva del núcleo, lo cual era como agregar una unidad al número atómico, y, por tanto, el elemento pasaba a ocupar la posición inmediatamente superior en la tabla periódica.

¿Cómo se explica que cuando el torio se descompone en «radiotorio» después de sufrir no una, sino tres desintegraciones, el producto siga siendo torio? Pues bien, en este proceso el átomo de torio pierde una partícula alfa, luego una partícula beta y, más tarde, una segunda partícula beta. Si aceptamos la teoría sobre el bloque constitutivo de los protones, ello significa que el átomo ha perdido cuatro electrones (dos de ellos, contenidos presuntamente en la partícula alfa) y cuatro protones. (La situación actual difiere bastante de este cuadro, aunque, en cierto modo, esto no afecta al resultado.) El núcleo de torio constaba inicialmente (según se suponía) de 232 protones y 142 electrones. Al haber perdido cuatro protones y otros cuatro electrones, quedaba reducido a 228 protones y 138 electrones. No obstante, conservaba todavía el número atómico 90, es decir, el mismo de antes. Así, pues, el «radiotorio», a semejanza del torio, posee 90 electrones planetarios, que giran

alrededor del núcleo. Puesto que las propiedades químicas de un átomo están sujetas al número de sus electrones planetarios, el torio y el «radiotorio» tienen el mismo comportamiento químico, sea cual fuere su diferencia en peso atómico (232 y 228, respectivamente).

Los isótopos de un elemento se identifican por su peso atómico, o «número másico». Así, el torio corriente se denomina torio 232, y el «radiotorio», torio 228. Los isótopos radiactivos del plomo se distinguen también por estas denominaciones: plomo 210 («radio D»), plomo 214 («radio B»), plomo 212 («torio B») y plomo 211 («actinio B»).

Se descubrió que la noción de isótopos podía aplicarse indistintamente tanto a los elementos estables como a los radiactivos. Por ejemplo, se comprobó que las tres series radiactivas anteriormente mencionadas terminaban en tres formas distintas de plomo. La serie del uranio acababa en el plomo 206; la del torio, en el plomo 208, y la del actinio, en el plomo 207. Cada uno de éstos era un isótopo estable y «corriente» del plomo, pero los tres plomos diferían por su peso atómico.

Mediante un dispositivo inventado por cierto ayudante de J. J. Thomson, llamado Francis William Aston, se demostró la existencia de los isótopos estables. Se trataba de un mecanismo que separaba los isótopos con extremada sensibilidad aprovechando la desviación de sus iones bajo la acción de un campo magnético; Aston lo llamó «espectrógrafo de masas». En 1919, Thomson, empleando la versión primitiva de dicho instrumento, demostró que el neón estaba constituido por dos variedades de átomos: una, cuyo número de masa era 20, y otra, 22. El neón 20 era el isótopo común; el neón 22 lo acompañaba en la proporción de un átomo por cada diez. (Más tarde se descubrió un tercer isótopo, el neón 21, cuyo porcentaje en el neón atmosférico era de un átomo por cada 400.)

Entonces fue posible, al fin, razonar el peso atómico fraccionario de los elementos. El peso atómico del neón (20,183) representaba el peso conjunto de los tres isótopos, de pesos diferentes, que integraban el elemento en su estado natural. Cada átomo individual tenía un número entero de masa, pero el promedio de sus masas, el peso atómico- era un número fraccionario.

Aston procedió a mostrar que varios elementos estables comunes eran, en realidad, mezclas de isótopos. Descubrió que el cloro, con un peso atómico fraccionario de

35,453, estaba constituido por el cloro 35 y el cloro 37, en la «proporción» de cuatro a uno. En 1922 se le otorgó el Premio Nobel de Química.

En el discurso pronunciado al recibir dicho premio, Aston predijo la posibilidad de aprovechar la energía almacenada en el núcleo atómico, vislumbrando ya las futuras bombas y centrales nucleares (véase el capítulo IX). Allá por 1935, el físico canadiense Arthur Jeffrey Dempster empleó el instrumento de Aston para avanzar sensiblemente en esa dirección. Demostró que, si bien 993 de cada 1.000 átomos de uranio eran uranio 238, los siete restantes eran uranio 235. Muy pronto se haría evidente el profundo significado de tal descubrimiento.

Así, después de estar siguiendo huellas falsas durante un siglo, se reivindicó definitivamente la teoría de Prout. Los elementos *estaban* constituidos por bloques estructurales uniformes; si no átomos de hidrógeno, sí, por lo menos, unidades con masa de hidrógeno. Y si los elementos no parecían evidenciarlo así en sus pesos, era porque representaban mezclas de isótopos que contenían diferentes números de bloques constitutivos. De hecho se empleó incluso el oxígeno, cuyo peso atómico es 16- como referencia para medir los pesos relativos de los elementos, lo cual no fue un capricho en modo alguno. Por cada 10.000 átomos de oxígeno común 16, aparecieron 20 átomos de un isótopo de peso equivalente a las 18 unidades, y 4 con el número de masa 17.

En realidad son muy pocos los elementos que constan de «un solo isótopo». (Esto es anfibológico: decir que un elemento tiene un solo isótopo es como afirmar que una mujer ha dado a luz un «solo gemelo».) Esta especie incluye elementos tales como el berilio y todos aquellos cuyo número de masa es 9; el flúor está compuesto únicamente de flúor 19; el aluminio, sólo de aluminio 27; y así unos cuantos más. Siguiendo la sugerencia hecha en 1947 por el químico americano Truman Paul Kohman, hoy se llama «nucleoide» al núcleo con una estructura singular. Cabe decir que un elemento tal como el aluminio está constituido por un solo nucleoide.

Desde que Rutherford identificara la primera partícula nuclear (la partícula alfa), los físicos se han ocupado activamente en el núcleo, intentando transformar un átomo en otro, o bien desintegrarlo para examinar su composición. Al principio tuvieron sólo la partícula alfa como campo de experimentación. Rutherford hizo un excelente uso de ella.

Entre los fructíferos experimentos realizados por Rutherford y sus ayudantes, hubo uno que consistía en bombardear con partículas alfa una pantalla revestida de sulfato de cinc. Cada impacto producía un leve destello, Crookes fue quien descubrió este efecto en 1903, de forma que se podía percibir a simple vista la llegada de las distintas partículas, así como contarlas. Para ampliar esta técnica, los experimentadores colocaron un disco metálico que impidiera a las partículas alfa alcanzar la pantalla revestida de sulfato de cinc, con lo cual se interrumpían los destellos. Cuando se introdujo hidrógeno en el aparato, reaparecieron los destellos en la pantalla, pese al bloqueo del disco metálico. Sin embargo, los nuevos destellos no se asemejaron a los producidos por las partículas alfa. Puesto que el disco metálico detenía las partículas alfa, parecía lógico pensar que penetraba hasta la pantalla otra radiación, que debía de consistir en protones rápidos. Para expresarlo de otra forma: las partículas alfa chocarían ocasionalmente contra algún núcleo de átomo de hidrógeno, y lo impulsarían hacia delante como una bola de billar a otra. Como quiera que los protones así golpeados eran relativamente ligeros, saldrían disparados a tal velocidad, que perforarían el disco metálico y chocarían contra la pantalla revestida de sulfato de cinc.

Esta detección de las diversas partículas mediante el destello constituye un ejemplo del «recuento por destellos». Rutherford y sus ayudantes hubieron de permanecer sentados en la oscuridad durante quince minutos para poder acomodar su vista a la misma y hacer los prolijos recuentos. Los modernos contadores de destellos no dependen ya de la mente ni de la vista humana. Convierten los destellos en vibraciones eléctricas, que son contadas por medios electrónicos. Luego basta leer el resultado final de los distintos cuadrantes. Cuando los destellos son muy numerosos, se facilita su recuento mediante circuitos eléctricos, que registran sólo uno de cada dos o cada cuatro destellos (e incluso más). Tales «escardadores» (así pueden llamarse, ya que «escardan» el recuento) los ideó, en 1931, el físico inglés C. E. Wynn-Williams. Desde la Segunda Guerra Mundial, el sulfato de cinc fue sustituido por sustancias orgánicas, que dan mejores resultados.

Entretanto se produjo una inesperada evolución en las experimentaciones iniciales de Rutherford con los destellos. Cuando se realizaba el experimento con nitrógeno en lugar de hidrógeno como blanco para el bombardeo de las partículas alfa, en la

pantalla revestida de sulfato de cinc aparecían destellos idénticos a los causados por los protones. Inevitablemente, Rutherford llegó a una conclusión: bajo aquel bombardeo, los protones habían salido despedidos del núcleo de nitrógeno.

Deseando averiguar lo que había pasado, Rutherford recurrió a la «cámara de ionización Wilson». En 1895, el físico escocés Charles Thomson Rees Wilson había concebido este artificio: un recipiente de cristal, provisto de un émbolo y que contenía aire con vapor sobresaturado. Al reducirse la presión a causa del movimiento del émbolo, el aire se expande súbitamente, lo cual determina un enfriamiento inmediato. A una temperatura muy baja se produce una saturación de humedad, y entonces cualquier partícula cargada origina la condensación del vapor. Cuando una partícula atraviesa velozmente la cámara e ioniza los átomos que hay en su interior, deja como secuela una nebulosa línea de gotas condensadas.

La naturaleza de esa estela puede revelarnos muchas cosas sobre la partícula. Las leves partículas beta dejan un rastro tenue, ondulante, y se desvanecen al menor roce, incluso cuando pasan cerca de los electrones. En cambio, las partículas alfa, mucho más densas, dejan una estela recta y bien visible; si chocan contra un núcleo y rebotan, su trayectoria describe una clara curvatura. Cuando la partícula recoge dos electrones, se transforma en átomo neutro de helio, y su estela se desvanece. Aparte de los caracteres y dimensiones de ese rastro, existen otros medios para identificar una partícula en la cámara de ionización. Su respuesta a la aplicación de un campo magnético nos dice si lleva carga positiva o negativa, y la intensidad de la curvatura indica cuáles son su masa y su energía. A estas alturas, los físicos están ya tan familiarizados con las fotografías de estelas en toda su diversidad, que pueden interpretarlas como si leyieran letra impresa. El invento de la cámara de ionización, permitió a Wilson compartir el premio Nobel de Física en 1927 (con Compton).

La cámara de ionización ha experimentado varias modificaciones desde que fue inventada, y de entonces acá se han ideado otros instrumentos similares. La cámara de ionización de Wilson quedaba inservible tras la expansión, y para utilizarla de nuevo había que recomponer su interior. En 1939, A. Langsdorf, de los Estados Unidos, ideó una «cámara de difusión» donde el vapor de alcohol, caldeado, se difundía hacia una parte más fría, de tal forma que siempre había una zona

sobresaturada, y las estelas se sucedían continuamente ante los ojos del observador.

Luego llegó la «cámara de burbujas», un artificio análogo, en el que se da preferencia a los líquidos supercaldeados y bajo presión y se prescinde del gas sobresaturado. Aquí son burbujas de vapor las que trazan la estela de la partícula cargada en el líquido, mientras que antes eran gotitas de líquido en el vapor. Se dice que su inventor, el físico norteamericano Donald Arthur Glaser, tuvo la idea de dicha cámara en 1953, cuando contemplaba un vaso de cerveza. Si esto es cierto, aquel vaso de cerveza fue el más provechoso para el mundo de la Física y para el propio inventor, pues ello valió a Glaser el premio Nobel de Física en 1960.

La primera cámara de burbujas tenía un diámetro de sólo algunos centímetros. Pero no había finalizado aún la década cuando ya había cámaras de burbujas, como las de ionización, que se hallan constantemente preparadas para actuar. Por añadidura, hay muchos más átomos en un determinado volumen de líquido que de gas, por lo que, en consecuencia, la cámara de burbujas produce más iones, lo cual es idóneo para el estudio de partículas rápidas y efímeras. Apenas transcurrida una década desde su invención, las cámaras de burbujas proporcionaban centenares de miles de fotografías por semana. En 1960 se descubrieron partículas de vida ultracorta, que habrían pasado inadvertidas sin la cámara de burbujas.

El hidrógeno líquido es el mejor elemento para llenar la cámara de burbujas, pues los núcleos de hidrógeno son tan simples, están constituidos por un solo protón, que reducen a un mínimo las dificultades. Hoy existen cámaras de burbujas de 3,60 m de anchura y 2,10 m de altura, que, consumen casi 29.000 litros de hidrógeno líquido; en Gran Bretaña funciona una que emplea 200 litros de helio líquido.

Aunque la cámara de burbujas sea más sensible que la de ionización para las partículas efímeras, tiene también sus limitaciones. A diferencia de la de ionización, no se presta a improvisar cuando se intenta provocar un fenómeno determinado. Necesita registrar todo en bloque, y entonces es preciso investigar innumerables rastros para seleccionar los significativos. Por eso continuó la búsqueda para idear algún método detector de huellas, en que se combinaran la selectividad inherente a la cámara de ionización y la sensibilidad propia de la cámara de burbujas.

Esta necesidad se satisfizo provisionalmente mediante la «cámara de chispas», en la cual las partículas que entran ionizan el gas y proyectan corrientes eléctricas a través del neón, en cuyo espacio se cruzan muchas placas metálicas. Las corrientes se manifiestan mediante líneas visibles de chispas, que señalan el paso de las partículas; se puede ajustar el mecanismo para hacerlo reaccionar únicamente ante las partículas que se deseé estudiar. La primera cámara de chispas funcional fue construida, en 1959, por los físicos japoneses S. Fukui y S. Miyamoto. En 1963, los físicos soviéticos la perfeccionaron al incrementar su sensibilidad y flexibilidad. Se producían en ella breves ráfagas de luz que, al sucederse sin cesar, trazaban una línea virtualmente continua (en lugar de las chispas consecutivas que emitía la cámara de chispas). Así, pues, el aparato modificado es una «cámara de chorro». Puede detectar cuantos fenómenos se produzcan en el interior de la cámara, así como las partículas que se dispersen en varias direcciones, dos cosas que no se hallaban al alcance de la cámara original.

Pero volvamos a los comienzos de siglo para ver lo ocurrido cuando Rutherford bombardeó núcleos de nitrógeno con partículas alfa dentro de una primitiva cámara de ionización. Pues ocurrió que la partícula alfa trazó inesperadamente una bifurcación. Esto significaba, a todas luces, una colisión con un núcleo de nitrógeno. Una rama de la bifurcación era una estela relativamente sutil que representaba el disparo de un protón. La otra bifurcación, más corta y gruesa, correspondía, aparentemente, a los restos del núcleo de nitrógeno desprendidos tras la colisión. Pero no se vio ni rastro de la partícula alfa propiamente dicha. Tal vez fue absorbida por el núcleo de nitrógeno, suposición comprobada más tarde por el físico británico Patrick Maynard Stuart Blackett, quien, según se calcula- tomó 20.000 o más fotografías para registrar sólo ocho colisiones, ejemplo, sin duda, de paciencia, fe y persistencia sobrehumanas-. Por éste y por otros trabajos en el terreno de la Física nuclear, Blackett recibió el premio Nobel de Física en 1948.

Entonces se pudo averiguar, por deducción, el destino del núcleo de nitrógeno. Cuando absorbía a la partícula alfa, su peso atómico (14) y su carga positiva (7) se elevaban a 18 y 9, respectivamente. Pero como quiera que esta combinación perdía enseguida un protón, el número de masa descendía a 17, y la carga positiva a 8. Ahora bien, el elemento con carga positiva de 8 es el oxígeno, y el número de masa

17 pertenece al isótopo del oxígeno 17. Para expresarlo de otra forma: En 1919, Rutherford transmutó el nitrógeno en oxígeno. Fue la primera transmutación hecha por el hombre. Se hizo realidad el sueño de los alquimistas, aunque ninguno de ellos podía preverlo así.

Las partículas alfa de fuentes radiactivas mostraron ciertas limitaciones como proyectiles: no poseían la energía suficiente para penetrar en los núcleos de elementos más pesados, cuyas altas cargas positivas ofrecían gran resistencia a las partículas cargadas positivamente. Pero se había abierto brecha en la fortaleza nuclear, y aún eran de esperar nuevos y más enérgicos ataques.

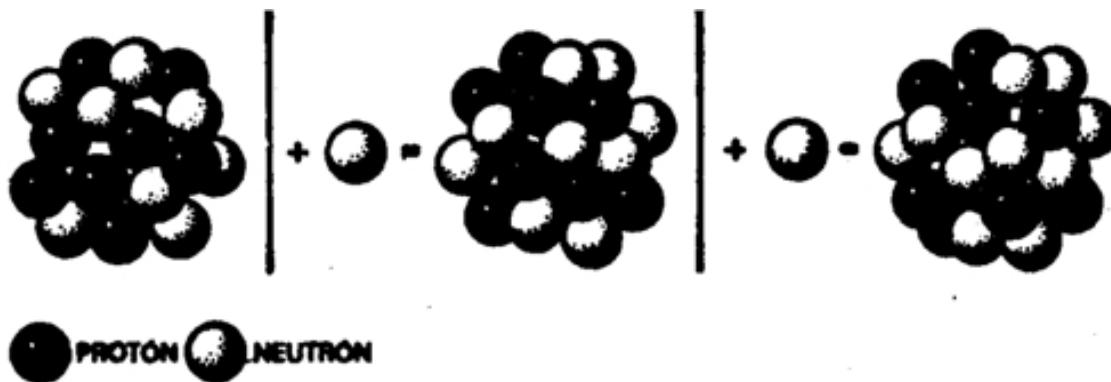
### Nuevas Partículas

El tema de los ataques contra el núcleo nos remite de nuevo a la pregunta sobre la constitución de éste. En 1930, dos físicos alemanes, Walther Bothe y H. Becker, anunciaron que habían conseguido liberar del núcleo una misteriosa radiación, cuyo poder de penetración era inmenso. Un año antes, Bothe había ideado ciertos métodos para utilizar, a la vez, dos o más contadores: los llamados «contadores coincidentes». Se aplicarían para identificar los acontecimientos nucleares desarrollados en una millonésima de segundo. Este trabajo y otros más le permitieron compartir el premio Nobel de Física en 1954 (con Born).

Dos años después del descubrimiento de Bothe-Becker, se habían dado a conocer los físicos franceses Frédéric e Irène Joliot-Curie. (Irène era hija de Pierre y Marie Curie, y Joliot había fundido ambos apellidos al casarse con ella.) La pareja utilizó la radiación del berilio, recién descubierta, para bombardear la parafina, sustancia cerosa compuesta por carbono e hidrógeno. Dicha radiación expulsó los protones de la parafina.

El físico inglés James Chadwick apuntó inmediatamente que dicha radiación constaba de partículas. Para determinar su tamaño, bombardeó con ellas átomos de boro, y tomando como base la masa acrecentada del nuevo núcleo, calculó que la partícula agregada tenía una masa aproximadamente igual a la del protón. Sin embargo, no se pudo detectar la partícula en la cámara de ionización. Chadwick explicó este hecho diciendo que la partícula no tenía carga eléctrica (porque una

partícula sin carga no produce ionización y, por tanto, no condensa el vapor de agua).



*Estructura nuclear del oxígeno 16, el oxígeno 17 y el oxígeno 18. Los tres contienen ocho protones y, por añadidura, ocho, nueve y diez neutrones respectivamente.*

Así, pues, Chadwick llegó a la conclusión que había aparecido una partícula inédita, equivalente, por su masa, al protón, pero sin carga alguna, o, dicho con otras palabras, eléctricamente neutra. Ya se había previsto la posible aparición de dicha partícula, e incluso se había propuesto un nombre para ella: «neutrón» que fue aceptado por Chadwick. Por este descubrimiento, se le concedió el premio Nobel de Física en 1935.

La nueva partícula disipó al instante ciertas dudas que habían tenido los físicos teóricos sobre el modelo fotón-electrón del núcleo. El físico teórico alemán Werner Heisenberg manifestó que el concepto de un núcleo consistente en protones y neutrones, más bien que en protones y electrones, ofrecía un cuadro mucho más satisfactorio y concordaba mejor con lo que debería ser el núcleo según las Matemáticas aplicadas.

Por añadidura, el nuevo modelo se ajustaba con tanta exactitud como el antiguo a los datos de la tabla periódica de elementos. Por ejemplo, el núcleo de helio constaba de 2 protones y 2 neutrones, lo cual daba razón de su masa de 4 unidades y su carga nuclear de 2. Y el concepto explicaba los isótopos con gran simplicidad. Por ejemplo, el núcleo de cloro 35 debería tener 17 protones y 18 neutrones; el núcleo de cloro 37, 17 protones y 20 neutrones. Ello concedería a ambos la misma carga nuclear, y la carga extra del isótopo, más pesado, estribaría en sus 2

neutrones adicionales. Asimismo, los 3 isótopos del oxígeno diferirían sólo en su número de neutrones: el oxígeno 16 tendría 8 protones y 8 neutrones; el oxígeno 17, 8 protones y 9 neutrones; el oxígeno 18, 8 protones y 10 neutrones.

En resumen, cada elemento se podría definir simplemente por el número de protones en su núcleo, lo cual equivaldría al número atómico. Sin embargo, todos los elementos, excepto el hidrógeno, tenían también neutrones en sus núcleos, y el número másico de un nucleido era la suma de sus protones y neutrones. Así, pues, el protón se incorporaba al neutrón como un bloque básico constitutivo de la materia. Para simplificar la tarea fueron designados conjuntamente con el término general de «nucleones», término que empleó por primera vez, en 1941, el físico danés Christian Moller. De esta voz se derivó la de «nucleónicos», sugerida, en 1944, por el ingeniero americano Zay Jeffries para representar el estudio de la ciencia nuclear y de la tecnología.

Esta nueva interpretación de la estructura nuclear ha originado clasificaciones adicionales, de los nucleidos. Los nucleidos con el mismo número de protones son, como ya hemos dicho, isótopos. Asimismo, los nucleidos con igual número de neutrones (como, por ejemplo, el hidrógeno 2 y el helio 3, cuyos respectivos núcleos contienen un neutrón) son «isótonos». Y los nucleidos con el mismo número de nucleones, y, por tanto, iguales números másicos, tales como el calcio 40 y el argón 40- son «isóbaros».

No es probable que el modelo protón-neutrón del núcleo experimente importantes variaciones en lo futuro. Al principio no bastó para explicar el hecho que los núcleos radiactivos emitieran electrones, pero, como veremos más adelante, no se tardó en esclarecer la cuestión.

Ahora bien, el descubrimiento del neutrón decepcionó a muchos físicos en relación con un aspecto importante. Habían llegado a ver el Universo como una estructura integrada por dos partículas fundamentales: el protón y el electrón. ¡Y ahora venía a añadirse a ellos una tercera! Toda desviación de lo simple resulta deplorable para los científicos.

Y lo peor fue que, tal como se presentaban las cosas, aquello podía ser únicamente el comienzo. Un sólo paso atrás en la simplicidad significaba un nuevo trayecto vertiginoso. Aún quedaban por llegar más partículas.

Durante muchos años, los físicos han estudiado los misteriosos «rayos cósmicos» del espacio, descubiertos, en 1911, por el físico austriaco Victor Francis Hess con ayuda de globos lanzados a la alta atmósfera.

Se detectó la presencia de tal radiación con un instrumento lo suficientemente simple como para alentar a quienes suelen creer que la Ciencia sólo parece capaz de progresar cuando emplea artificios increíblemente complejos. Dicho instrumento era un «electroscopio», que consistía en dos laminillas de oro, pendientes de una varilla metálica vertical, en el interior de un recipiente metálico provisto de ventanillas. (Nada menos que en 1706, el físico inglés Hauksbee construyó el precursor de este artificio.)

Si se carga la varilla metálica con electricidad estática, se separan las laminillas de oro. Lo ideal sería que permanecieran separadas de manera indefinida; pero en la atmósfera circundante, los iones conducen lentamente la carga eléctrica hacia el exterior, hasta que las laminillas se van acercando una a otra. Las radiaciones energéticas, tales como los rayos X, los rayos gamma o los flujos de partículas cargadas eléctricamente- producen los iones necesarios para ese escape de la carga. Aún cuando el electroscopio esté bien protegido, no podrá evitarse un lento escape, que será revelado por la presencia de una radiación muy penetrante, sin relación directa con la radiactividad. Esa penetrante radiación de creciente intensidad fue la que percibió Hess al elevarse en la atmósfera, y que le valió compartir el premio Nobel de Física en 1936 (con Anderson).

El físico americano Robert Andrews Millikan, quien recopiló numerosos informes sobre esa radiación, a la que dio el nombre de «rayos cósmicos»- pensó que se trataría de alguna variedad de radiación electromagnética. Tenía tal poder de penetración, que en ocasiones atravesaba planchas de varios centímetros de plomo. Millikan dedujo de ello que la radiación era similar a los penetrantes rayos gamma, pero de una longitud de onda aún más corta.

Otros, particularmente el físico americano Arthur Holly Compton- adujeron que los rayos cósmicos eran partículas. Pero esto era algo que podía investigarse. Si, en realidad, eran partículas cargadas, el campo magnético terrestre las haría desviarse cuando se acercaran a la Tierra desde el espacio exterior. Compton estudió las mediciones de la radiación cósmica en diversas latitudes y descubrió que, en efecto,

se curvaba bajo la acción del campo magnético. Tal influjo era débil junto al ecuador magnético, mientras que se incrementaba cerca de los polos, donde las fuerzas magnéticas se intensifican y profundizan hacia la Tierra.

Cuando las partículas cósmicas «primarias» penetran en la atmósfera, traen consigo una energía de fantástica intensidad. Muchas de ellas son protones, aunque a veces se trata de núcleos de elementos más pesados. En general, cuanto más pesado es el núcleo, tanto más rara es su presencia entre las partículas cósmicas. No tardaron en detectarse núcleos tan complejos como los que componen los átomos del hierro, y en 1968 se descubrieron núcleos de la complejidad de los del uranio. Diez millones de núcleos de uranio forman sólo una partícula. También se incluyen algunos electrones de elevada energía.

Al chocar con átomos y moléculas del aire, las partículas primarias fragmentan esos núcleos y producen toda clase de partículas «secundarias». Precisamente esta radiación secundaria (todavía muy energética) es la que detectamos cerca de la Tierra, si bien los globos enviados a la atmósfera superior registran la radiación primaria.

Ahora bien, la siguiente partícula inédita, después del neutrón- se descubrió en los rayos cósmicos. A decir verdad, cierto físico teórico había predicho ya este descubrimiento. Paul Adrien Maurice Dirac había aducido, fundándose en un análisis matemático de las propiedades inherentes a las partículas subatómicas, que cada partícula debería tener su «antipartícula». (Los científicos desean no sólo que la Naturaleza sea simple, sino también simétrica.) Así, pues, debería haber un «antielectrón» idéntico al electrón, salvo por su carga, que sería positiva, y no negativa, y un «antiproton» con carga negativa en vez de positiva.

En 1930, cuando Dirac expuso su teoría, no impresionó mucho al mundo de la Ciencia. Pero, fiel a la cita, dos años después apareció el «antielectrón». Por entonces, el físico americano Carl David Anderson trabajaba con Millikan, en un intento por averiguar si los rayos cósmicos eran radiación electromagnética o partículas. Por aquellas fechas, casi todo el mundo estaba dispuesto a aceptar las pruebas presentadas por Compton, según las cuales, se trataría de partículas cargadas; pero Millikan no acababa de darse por satisfecho con tal solución. Anderson se propuso averiguar si los rayos cósmicos que penetraban en una cámara

de ionización se curvaban bajo la acción de un potente campo magnético. Al objeto de frenar dichos rayos lo suficiente como para poder detectar la curvatura, si la había, puso en la cámara una barrera de plomo de 6,35 mm de espesor. Descubrió que, cuando cruzaba el plomo, la radiación cósmica trazaba una estela curva a través de la cámara. Y descubrió algo más. A su paso por el plomo, los rayos cósmicos energéticos arrancaban partículas de los átomos de plomo. Una de esas partículas dejó una estela similar a la del electrón. ¡Allí estaba, pues, el «antielectrón» de Dirac! Anderson le dio el nombre de «positrón». Tenemos aquí un ejemplo de radiación secundaria producida por rayos cósmicos. Pero aún había más, pues en 1963 se descubrió que los positrones figuraban también entre las radiaciones primarias. Abandonado a sus propios medios, el positrón es tan estable como el electrón, ¿y por qué no habría de serlo, si es idéntico al electrón, excepto en su carga eléctrica?-. Además, su existencia puede ser indefinida. Ahora bien, en realidad no queda abandonado nunca a sus propios medios, ya que se mueve en un universo repleto de electrones. Apenas inicia su veloz carrera, cuya duración ronda la millonésima de segundo, se encuentra ya con uno.

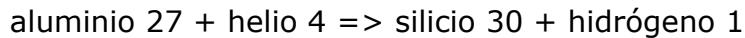
Así durante un momento relampagueante quedarán asociados el electrón y el positrón; ambas partículas girarán en torno a un centro de fuerza común. En 1945, el físico americano Arthur Edward Ruark sugirió que se diera el nombre de «positrónio» a este sistema de dos partículas, y en 1951, el físico americano de origen austriaco Martin Deutsch consiguió detectarlo guiándose por los rayos gamma característicos del conjunto.

Ahora bien, aunque se forme un sistema positrónio, su existencia durará, como máximo, una diezmillonésima de segundo. Como culminación de esa danza se combinan el positrón y el electrón. Cuando se combinan los dos ápices opuestos, proceden a la neutralización recíproca y no dejan ni rastro de materia («aniquilamiento mutuo»), sólo queda la energía en forma de radiación gamma. Ocurre, pues, tal como había sugerido Albert Einstein: la materia puede convertirse en energía, y viceversa. Por cierto que Anderson consiguió detectar muy pronto el fenómeno inverso: desaparición súbita de los rayos gamma, para dar origen a una pareja electrón-positrón. Este fenómeno se llama «producción de parejas». (Anderson compartió con Hess el premio Nobel de Física en 1936.)

Poco después, los Joliot-Curie detectaron el positrón por otros medios, y, al hacerlo así, realizaron, de paso, un importante descubrimiento. Al bombardear los átomos de aluminio con partículas alfa, descubrieron que con tal sistema no sólo se obtenían protones, sino también positrones. Esta novedad era interesante, pero no extraordinaria. Sin embargo, cuando suspendieron el bombardeo, el aluminio siguió emitiendo positrones, emisión que se debilitó sólo con el tiempo. Aparentemente habían creado, sin proponérselo, una nueva sustancia radiactiva.

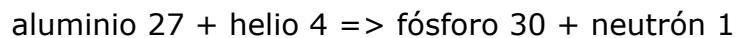
He aquí la interpretación de lo ocurrido, según los Joliot-Curie: cuando un núcleo de aluminio absorbe una partícula alfa, la adición de los dos protones transforma el aluminio (número atómico, 13) en fósforo (número atómico 15). Puesto que la partícula alfa contiene un total de 4 nucleones, el número másico se eleva 4 unidades es decir, del aluminio 27, al fósforo 31. Ahora bien, si al reaccionar se expulsa un protón de ese núcleo, la reducción en una unidad de sus números atómicos y másico hará surgir otro elemento, o sea, el silicio 30.

Puesto que la partícula alfa es el núcleo del helio, y un protón, el núcleo del hidrógeno, podemos escribir la siguiente ecuación de esta «reacción nuclear»:



Nótese que los números másicos se equilibran:  $27 + 4 = 30 + 1$ . Lo mismo ocurre con los números atómicos, pues el del aluminio, 13, y el del hierro, 2, suman 15, mientras que los números atómicos del silicio e hidrógeno, 14 y 1 respectivamente, dan también un total de 15. Este equilibrio entre los números másicos y los atómicos es una regla general de las reacciones atómicas.

Los Joliot-Curie supusieron que tanto los neutrones como los protones se habían formado con la reacción. Si el fósforo 31 emitía un neutrón en lugar de un protón, el número atómico no sufriría cambio alguno, pero el másico descendería una unidad. En tal caso, el elemento seguiría siendo fósforo, aunque fósforo 30. Esta ecuación se escribiría así:



Puesto que el número atómico del fósforo es 15 y el del neutrón 0, se produciría nuevamente el equilibrio entre los números atómicos de ambos miembros.

Ambos procesos, absorción de alfa, seguida por emisión de protón, y absorción de alfa seguida por emisión de neutrón- se desarrollan cuando se bombardea el aluminio con partículas alfa. Pero hay una importante distinción entre ambos resultados. El silicio 30 es un isótopo perfectamente conocido del silicio, que representa el 3 % o algo más del silicio existente en la Naturaleza. Sin embargo, el fósforo 30 no existe en estado natural. La única forma natural de fósforo que se conoce es el fósforo 31. Resumiendo: el fósforo 30 es un isótopo radiactivo de vida muy breve, que sólo puede obtenerse artificialmente; de hecho es el primer isótopo creado por el hombre. En 1935, los Joliot-Curie recibieron el premio Nobel de Química por su descubrimiento de la radiactividad artificial.

El inestable fósforo 30 producido por los Joliot-Curie mediante el bombardeo de aluminio, se desintegró rápidamente bajo la emisión de positrones. Puesto que el positrón, como el electrón- carece prácticamente de masa, dicha emisión no cambió el número másico del núcleo. Sin embargo, la pérdida de una carga positiva redujo en una unidad su número atómico, de tal forma que, el fósforo pasó a ser silicio.

¿De dónde proviene el positrón? ¿Figuran los positrones entre los componentes del núcleo? La respuesta es negativa. Lo cierto es que, dentro del núcleo, el positrón se transforma en neutrón al desprenderse de su carga positiva, que se libera bajo la forma de positrón acelerado.

Ahora es posible explicar la emisión de partículas beta, lo cual nos parecía un enigma a principios del capítulo. Es la consecuencia de un proceso inverso al seguido por el protón en su decadencia hasta convertirse en neutrón. Es decir, el neutrón se transforma en protón. Este cambio protón-neutrón libera un positrón, y, para poder conservar la simetría, el cambio neutrón-protón libera un electrón (la partícula beta). La liberación de una carga negativa equivale a ganar una carga positiva y responde a la formación de un protón cargado positivamente sobre la base de un neutrón descargado. Pero, ¿cómo logra el neutrón descargado extraer una carga negativa de su seno, para proyectarla al exterior?

En realidad, si fuera una simple carga negativa, el neutrón no podría hacer semejante cosa. Dos siglos de experiencia han enseñado a los físicos que no es

possible crear de la nada cargas eléctricas negativas ni positivas. Tampoco se puede destruir ninguna de las dos cargas, ésta es la ley de «conservación de la carga eléctrica».

Sin embargo, un neutrón no crea sólo un electrón en el proceso que conduce a obtener una partícula beta; origina también un protón. Desaparece el neutrón descargado y deja en su lugar un protón con carga positiva y un electrón con carga negativa. Las dos nuevas partículas, *consideradas como un conjunto*, tienen una carga eléctrica total de cero. No se ha creado ninguna carga *neta*. De la misma forma cuando se encuentran un positrón y un electrón para emprender el aniquilamiento mutuo, la carga de ambos, *considerados como un conjunto*, es cero. Cuando el protón emite un positrón y se convierte en neutrón, la partícula original (el protón) tiene carga positiva, lo mismo que las partículas finales (el neutrón y el positrón), también *consideradas como un conjunto*.

Asimismo, es posible que un núcleo absorba un electrón. Cuando ocurre esto, el protón se transforma en neutrón en el interior del núcleo. Un electrón más un protón (que, considerados como conjunto, tienen una carga de cero) forman un neutrón, cuya carga es también de cero. El electrón capturado procede de la capa cortical más interna del átomo, puesto que los electrones de dicha capa son los más cercanos al núcleo y, por tanto, fácilmente absorbibles. La capa más interna es la K, por lo cual este proceso se denomina «captura K».

Todas estas interacciones entre partículas cumplen la ley de conservación de la carga eléctrica y deben satisfacer también otras numerosas leyes de este tipo. Puede ocurrir, y así lo sospechan los físicos- que ciertas interacciones entre partículas violen alguna de las leyes de conservación, fenómeno que puede ser detectado por un observador provisto de los instrumentos y la paciencia necesarios. Tales atentados contra las leyes de conservación están «prohibidos» y no se producirán. Sin embargo, los físicos se llevan algunas sorpresas al comprobar que lo que había parecido una ley de conservación, no es tan rigurosa ni universal como se había creído. Más adelante lo demostrarímos con diversos ejemplos.

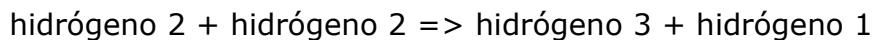
Tan pronto como los Joliot-Curie crearon el primer isótopo radiactivo artificial, los físicos se lanzaron alegremente a producir tribus enteras de ellos. En realidad, las variedades radiactivas de cada elemento en la tabla periódica son producto del

laboratorio. En la moderna tabla periódica, cada elemento es una familia con miembros estables e inestables, algunos, procedentes de la Naturaleza; otros, sólo del laboratorio.

Por ejemplo, el hidrógeno presenta tres variedades: En primer lugar, el corriente, que tiene un solo protón. En 1932, el químico Harold Urey logró aislar el segundo. Lo consiguió sometiendo a lenta evaporación una gran cantidad de agua, de acuerdo con la teoría que los residuos representarían una concentración de la forma más pesada de hidrógeno que se conocía. Y, en efecto, cuando se examinaron al espectroscopio las últimas gotas del agua no evaporada, descubrióse en el espectro una leve línea cuya posición matemática revelaba la presencia de «hidrógeno pesado».

El núcleo del hidrógeno pesado está constituido por un protón y un neutrón. Como tiene un número másico de 2, el isótopo es hidrógeno 2. Urey llamó a este átomo «deuterio» (de la voz griega *deútoros*, «segundo»), y al núcleo, «deuterón». Una molécula de agua que contenga deuterio se denomina «agua pesada». Al ser la masa del deuterio dos veces mayor que la del hidrógeno corriente, el agua pesada tiene puntos de ebullición y congelación superiores a los del agua ordinaria. Mientras que ésta hiere a 100º C y se congela a 0º C, el agua pesada hiere a 101,42º C y se congela a 3,79º C. El punto de ebullición del deuterio es de, 249,30 C, frente a los -252º C del hidrógeno corriente. El deuterio se presenta en la Naturaleza en la proporción de una parte por cada 6.000 partes de hidrógeno corriente. En 1934 se otorgó a Urey el premio Nobel de Química por su descubrimiento del deuterio.

El deuterón resultó ser una partícula muy valiosa para bombardear los núcleos. En 1934, el físico australiano Marcus Lawrence Elwin Oliphant y el austriaco P. Harteck atacaron el deuterio con deuterones y produjeron una tercera forma de hidrógeno, constituido por 1 protón y 2 neutrones. La reacción se planteó así:



Este nuevo hidrógeno superpesado se denominó «tritio» (del griego *tritos*, «tercero»), cuyo núcleo es el «tritón»; sus puntos de ebullición y fusión,

respectivamente, son  $-248^{\circ}\text{ C}$  y  $-252^{\circ}\text{ C}$ . Se ha preparado incluso el óxido puro de tritio («agua superpesada»), cuyo punto de fusión es,  $268,5^{\circ}\text{ C}$ <sup>3</sup>. El tritio es radiactivo y se desintegra con bastante rapidez. Se encuentra en la Naturaleza y figura entre los productos formados cuando los rayos cósmicos bombardean la atmósfera. Al desintegrarse, emite un electrón y se transforma en helio 3, isótopo estable, pero muy raro, del helio.



*Núcleos del hidrógeno, deuterio y tritio ordinarios.*

El helio 3 difiere del helio corriente 4 en algunas características interesantes, en especial, el hecho de no poseer las mismas propiedades de superconductividad y superfluidez en estado líquido, tal como las hemos expuesto en el capítulo anterior. El helio atmosférico contiene sólo un 0,0003 % de helio 3, el cual se origina, sin duda, al desintegrarse el tritio. (Por su inestabilidad, el tritio es más raro aún. Se calcula que hay sólo un total de 1,586 kg en la atmósfera y los océanos.) El helio 3 contiene un porcentaje más ínfimo aún de helio, cuya procedencia son los pozos de gas natural, donde los rayos cósmicos tienen menos posibilidades de formar tritio. Pero estos dos isótopos, el helio 3 y 4, no son los únicos helios conocidos. Los físicos han creado otras dos formas radiactivas: el helio 5, uno de los núcleos más inestables que se conocen- y el helio 6, también muy inestable. Y la cuestión sigue adelante. A estas alturas, la lista de isótopos conocidos se ha elevado hasta un total de 1.400. De ellos, 1.100 son radiactivos, y se han creado muchos mediante nuevas formas de artillería atómica bastante más potente que las

<sup>3</sup> El punto de fusión del óxido de tritio incluido en el original resultaba incorrecto y fue reemplazado por el de la Tercera Edición de Plaza & Janés (N. de Xixoxux)

partículas alfa de procedencia radiactiva, es decir, los únicos proyectiles que dispusieron Rutherford y los Joliot-Curie.

El experimento realizado por los Joliot-Curie a principios de la década de 1930-1940 fue, por aquellas fechas, un asunto que quedó limitado a la torre de marfil científica; pero hoy tiene una aplicación eminentemente práctica. Supongamos que se bombardea con neutrones un conjunto de átomos iguales o de distinta especie. Certo porcentaje de cada especie absorberá un neutrón, de lo cual resultará, en general, un átomo radiactivo. Este elemento radiactivo, al decaer, emitirá una radiación subatómica en forma de partículas o rayos gamma.

Cada tipo de átomo absorberá neutrones para formar un tipo distinto de átomo radiactivo y emitir una radiación diferente y característica. La radiación se puede detectar con procedimientos excepcionalmente sutiles. Se puede identificar el átomo radiactivo por su tipo y por el ritmo al que decrece su producción. En consecuencia, puede hacerse lo mismo con el átomo antes que absorba un neutrón. De esta forma se pueden analizar las sustancias con gran precisión («análisis de activación-neutrón»). Así se detectan cantidades tan ínfimas como una trillonésima de gramo de cualquier nucleido.

El análisis de activación-neutrón sirve para determinar con toda precisión el contenido de impurezas en muestras de pigmentos específicos de muy diversos siglos. Así, este método permite comprobar la autenticidad de una pintura supuestamente antigua, pues basta utilizar un fragmento mínimo de su pigmento.

Gracias a su ayuda se pueden hacer también otras investigaciones no menos delicadas: incluso permitió estudiar un pelo del cadáver de Napoleón, con sus ciento cincuenta años de antigüedad, y se descubrió que contenía elevadas cantidades de arsénico (que quizás ingirió como medicamento).

### Aceleradores de Partículas

Dirac predijo no sólo la existencia del antielectrón (el positrón), sino también la del antiproton. Mas para obtener el antiproton se necesitaba mucha más energía, ya que la energía requerida es proporcional a la masa de la partícula. Como el protón tenía 1.836 veces más masa que el electrón, para obtener un antiproton se necesitaba, por lo menos, 1.836 veces más energía que para un positrón. Este logro

hubo de esperar el invento de un artificio para acelerar las partículas subatómicas con energías lo suficientemente elevadas.

Precisamente cuando Dirac hizo su predicción, se dieron los primeros pasos en este sentido. Allá por 1928, los físicos ingleses John D. Cockcroft y Ernest Walton, colaboradores en el laboratorio de Rutherford- desarrollaron un «multiplicador de voltaje», cuyo objeto era el de obtener un gran potencial eléctrico, que diera al protón cargado una energía de hasta 400.000 electronvolts (eV) aproximadamente. (Un electronvolt es igual a la energía que desarrolla un electrón acelerado a través de un campo eléctrico con el potencial de 1 V.) Mediante los protones acelerados de dicha máquina, ambos científicos consiguieron desintegrar el núcleo del litio, lo cual les valió el premio Nobel de Física en 1951.

Mientras tanto, el físico americano Robert Jemison van de Graff había inventado otro tipo de máquina aceleradora. Esencialmente operaba separando los electrones de los protones, para depositarlos en extremos opuestos del aparato mediante una correa móvil. De esta forma, el «generador electrostático Van de Graff» desarrolló un potencial eléctrico muy elevado entre los extremos opuestos; Van de Graff logró generar hasta 8 millones de voltios. Su máquina puede acelerar fácilmente los protones a una velocidad de 4 millones de electronvolts. (Los físicos utilizan hoy la abreviatura MeV para designar el millón de electronvolts.)

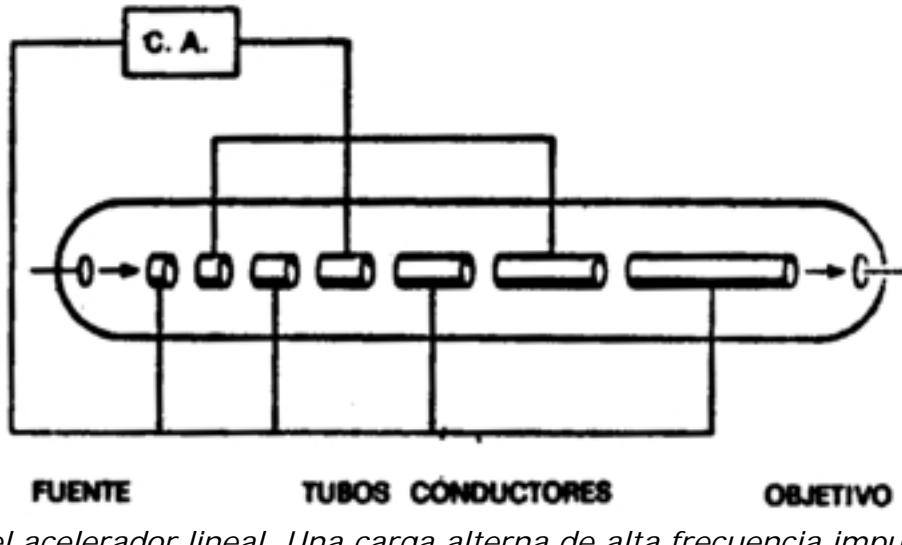
Los fantásticos espectáculos ofrecidos por el generador electrostático «Van de Graff», con sus impresionantes chispazos, cautivaron la imaginación popular y familiarizaron al público con los «quebrantadores del átomo». Se lo llamó popularmente «artificio para fabricar rayos», aunque, desde luego, era algo más. (Ya en 1922, el ingeniero electricista germano americano Charles Proteus Steinmetz había construido un generador sólo para producir rayos artificiales.)

La energía que se puede generar con semejante máquina se reduce a los límites prácticos del potencial obtenible. Sin embargo, poco después se diseñó otro esquema para acelerar las partículas. Supongamos que en vez de proyectar partículas con un solo y potente disparo, se aceleran mediante una serie de impulsos cortos. Si se cronometra exactamente la aplicación de cada impulso, la velocidad aumentará en cada intervalo, de la misma forma que un columpio se eleva cada vez más si los impulsos se sincronizan con sus oscilaciones.

Esta idea inspiró, en 1931, el «acelerador lineal», en el que las partículas se impulsan a través de un tubo dividido en secciones. La fuerza propulsora es un campo eléctrico alterante, concebido de tal forma que las partículas reciben un nuevo impulso cuando penetran en cada sección.

No es nada fácil sincronizar tales movimientos, y, de cualquier forma, la longitud funcional del tubo tiene unos límites difícilmente definibles. Por tanto, no es extraño que el acelerador lineal mostrara poca eficacia en la década de los años treinta. Una de las cosas que contribuyeron a relegarlo fue una idea, bastante más afortunada, de Ernest Orlando Lawrence, de la Universidad de California.

En vez de dirigir las partículas a través de un tubo recto, ¿por qué no hacerlas girar a lo largo de un itinerario circular? Una magneto podría obligarlas a seguir esa senda. Cada vez que completaran medio círculo, el campo alterante les daría un impulso, y en tales circunstancias no resultaría difícil regular la sincronización. Cuando las partículas adquiriesen velocidad, la magneto reduciría la curvatura de su trayectoria y, por tanto, se moverían en círculos cada vez más amplios, hasta invertir quizás el mismo tiempo en todas las traslaciones circulares.



*Principio del acelerador lineal. Una carga alterna de alta frecuencia impulsa y atrae alternativamente las partículas cargadas en los sucesivos tubos conductores, acelerándolas en una dirección.*

Al término de su recorrido espiral, las partículas surgirían de la cámara circular (dividida en semicilindros, denominados «des») y se lanzarían contra el blanco.

Este nuevo artificio de Lawrence se llamó «ciclotrón». Su primer modelo, con un diámetro inferior a los 30 cm, pudo acelerar los protones hasta alcanzar energías de 1,25 MeV aproximadamente. Hacia 1939, la Universidad de California tenía un ciclotrón con magnetos de 1,50 m y la suficiente capacidad para lanzar las partículas a unos 20 MeV, es decir, dos veces la velocidad de las partículas alfa más enérgicas emitidas por fuentes radiactivas. Por este invento, Lawrence recibió aquel mismo año el premio Nobel de Física.



*Principio del ciclotrón visto desde arriba (parte superior) y en su sección transversal (parte inferior). Las partículas inyectadas por la fuente reciben el impulso de cada «de» mediante la carga alterna, mientras la magneto las hace curvarse en su trayectoria espiral.*

El funcionamiento del ciclotrón hubo de limitarse a los 29 MeV, porque con esta energía las partículas viajaban ya tan aprisa, que se podía apreciar el incremento de la masa bajo el impulso de la velocidad (efecto ya implícito en la teoría de la relatividad). Este acrecentamiento de la masa determinó el desfase de las partículas con los impulsos eléctricos. Pero a esto pusieron remedio en 1945,

independientemente, el físico soviético Vladimir Yosifovich Veksler y el físico californiano Edwin Mattison McMillan. Tal remedio consistió, simplemente, en sincronizar las alteraciones del campo eléctrico con el incremento en la masa de las partículas. Esta versión modificada del ciclotrón se denominó «sincrociclotrón».

Hacia 1946, la Universidad de California construyó uno que aceleraba las partículas hasta alcanzar energías de 200 a 400 MeV. Más tarde, los gigantescos sincrociclotrones de los Estados Unidos y la Unión Soviética generaron energías de 700 a 800 MeV.

Entretanto, la aceleración de electrones fue objeto de una atención muy diversa. Para ser útiles en la desintegración de átomos, los electrones ligeros deberían alcanzar velocidades mucho mayores que las de los protones (de la misma forma que la pelota de tenis de mesa debe moverse mucho más deprisa que la de golf para conseguir la misma finalidad). El ciclotrón no sirve para los electrones, porque a las altas velocidades que exige su efectividad, sería excesivo el acrecentamiento de sus masas. En 1940, el físico americano Donald William Kerst diseñó un artificio para acelerar electrones, que equilibraba la creciente masa con un campo eléctrico de potencia cada vez mayor. Se mantuvo a los electrones dentro de la misma trayectoria circular, en vez de hacerles seguir una espiral hacia fuera. Este aparato se denominó betatrón (término derivado de las partículas beta). Hoy el betatrón genera velocidades de 340 MeV.

Al aparato se le incorporó luego otro instrumento, de diseño ligeramente distinto, denominado «electrón-sincrotrón». En 1946, F. K. Goward y D. E. Barnes construyeron el primer modelo en Inglaterra, el cual elevaba la energía del electrón hasta los 1.000 MeV, pero no pudo rebasar este límite porque los electrones con movimiento circular radiaban energía a un ritmo proporcional al aumento de la velocidad. La radiación emitida por una partícula acelerada recibió el nombre de *Bremsstrahlung* (voz alemana que significa «radiación reguladora»).

Tomando como guías el betatrón y el electrón-sincrotrón, hacia 1947, los físicos empezaron a construir un «protón-sincrotrón», que mantenía también las partículas en una sola trayectoria circular. Ello permitió ahorrar peso. Donde las partículas sigan trayectorias espirales externas, la magneto debe extender su acción a toda la anchura de la espiral, para mantener uniforme la fuerza magnética. Con una

trayectoria circular basta una magneto de dimensiones regulares para cubrir un área estrecha.

Puesto que el protón, siempre de mayor masa, no pierde energía, con el movimiento circular, tan rápidamente como el electrón, los físicos se aprestaron a rebasar la marca de los 1.000 MeV mediante el protón-sincrotrón. Este valor de 1.000 MeV equivale a 1.000 millones de electronvolts y su abreviatura es BeV.

En 1952, el «Brookhaven National Laboratory» de Long Island puso a punto un protón-sincrotrón que alcanzaba los 2 y 3 BeV. Se le dio el nombre de «Cosmotrón», porque alcanzó el máximo nivel de energía corpuscular en los rayos cósmicos. Dos años después, la Universidad de California dio a conocer su «Bevatrón», capaz de producir partículas situadas entre los 5 y 6 BeV. Por último, en 1957 la Unión Soviética anunció que su «Fasotrón» había alcanzado los 10 BeV.

Pero a estas alturas, dichas máquinas parecen insignificantes comparadas con los aceleradores de diseños más recientes, denominados «sincrotrones de enfoque estricto». Las limitaciones de la máquina tipo bevatrón consisten en que las partículas de la corriente se desvían hacia las paredes del conducto por el que circulan. Este nuevo modelo corrige esa tendencia mediante campos magnéticos alternantes de distintas formas, que mantienen las partículas dentro de una estrecha corriente. Quien sugirió primero esta idea fue el ingeniero griego Nicholas Christofilos. Por cierto que esta innovación permitió reducir el tamaño de la magneto necesaria para alcanzar los niveles adecuados de energía. Mientras la energía de las partículas aumentaba cincuenta veces más, el peso de la magneto se incrementó en menos del doble.

En noviembre de 1959, el Comité Europeo de Investigación Nuclear (CERN), agencia cooperativa de doce naciones, terminó en Ginebra un sincrotrón de enfoque estricto que alcanzó los 24 BeV y proyectó grandes pulsaciones de partículas (que contenían 10.000 millones de protones) cada 3 seg. El Sincrotrón tiene un diámetro equivalente casi a tres manzanas de casas, y para recorrer su perímetro se ha de andar unos 644 m. En ese período de 3 seg, durante el cual se forma la pulsación, los protones recorren quinientas mil veces su itinerario. El instrumento tiene una magneto que pesa 3.500 Tm y cuesta 30 millones de dólares.

Ahora bien, ésta no es la última palabra. Brookhaven ha terminado una máquina

aún mayor, que ha sobrepasado ampliamente los 30 BeV, y la URSS dispone ahora de una cuyo diámetro es de 1.600 m y que alcanzó los 70 BeV cuando se puso en marcha, en 1967. Los físicos americanos están supervisando la construcción de una cuyo diámetro será de 4.800 m y que podrá alcanzar los 300 BeV, y se sueña con otras que lleguen a los 1.000 BeV.

Mientras tanto, el acelerador lineal, o «linac», ha experimentado cierto resurgimiento. Algunas mejoras técnicas han eliminado los inconvenientes de los primeros modelos. Para energías extremadamente elevadas, el acelerador lineal tiene varias ventajas sobre el tipo cíclico. Puesto que los electrones no pierden energía cuando viajan en línea recta, un linac puede acelerar los electrones con más potencia y dirigir bien las corrientes hacia los blancos. La Universidad de Stanford proyecta un acelerador lineal de 3.218 m de longitud, que tal vez desarrolle energías de 45 BeV.

El tamaño no es lo único que se necesita para conseguir más energía. Repetidas veces se ha sugerido la conveniencia de emplear dos aceleradores juntos, de modo que un rayo de partículas energéticas choque de frente con otro que se mueva en dirección opuesta. Esto cuadruplicaría las energías obtenidas al producirse la colisión de uno de tales rayos con un objeto estacionario. Esta combinación de aceleradores puede ser el próximo paso.

Con los bevatrones, el hombre poseyó, al fin, los medios para crear el antiproton. Los físicos californianos se aprestaron a detectarlo y producirlo. En 1955, Owen Chamberlain y Emilio G. Segrè captaron definitivamente el antiproton después de bombardear el cobre hora tras hora con protones de 6,2 BeV: lograron retener sesenta. No fue nada fácil identificarlos. Por cada antiproton producido, se formaron 40.000 partículas de otros tipos. Pero mediante un elaborado sistema de detectores, concebido y diseñado para que sólo un antiproton pudiera tocar todas las bases, los investigadores reconocieron la partícula sin lugar a dudas. El éxito proporcionó a Chamberlain y Segrè el premio Nobel de Física en 1959.

El antiproton es tan evanescente como el positrón, por lo menos en nuestro Universo. En una ínfima fracción de segundo después de su creación, la partícula desaparece, arrastrada por algún núcleo normal cargado positivamente. Entonces se

aniquilan entre sí el antiproton y un protón del núcleo, que se transforman en energía y partículas menores.

En ocasiones, el protón y el antiproton sólo se rozan ligeramente en vez de llegar al choque directo. Cuando ocurre esto, ambos neutralizan mutuamente sus respectivas cargas. El protón se convierte en neutrón, lo cual es bastante lógico. Pero no lo es tanto que el antiproton se transforme en un «antineutrón». ¿Qué será ese «antineutrón»? El positrón es la contrapartida del electrón en virtud de su carga contraria, y el antiproton es también «anti» por razón de su carga. Mas, ¿qué es lo que transmite esa calidad antinómica al antineutrón descargado?

Aquí se impone una digresión hacia el tema del movimiento rotatorio de las partículas. Usualmente se ve cómo la partícula gira sobre su eje, a semejanza de un trompo, o como la Tierra o el Sol, o nuestra Galaxia o, si se nos permite decirlo, como el propio Universo. En 1925, los físicos holandeses George Eugene Uhlenbeck y Samuel Abraham Goudsmit aludieron por vez primera a esa rotación de la partícula. Ésta, al girar, genera un minúsculo campo magnético; tales campos han sido objeto de medidas y exploraciones, principalmente por parte del físico alemán Otto Stern y el físico americano Isidor Isaac Rabi, quienes recibieron los premios Nobel de Física en 1943 y 1944, respectivamente, por sus trabajos sobre dicho fenómeno. Para medir este movimiento giratorio, se dice que la rotación de un electrón o un protón es igual a una mitad, y cuando aquélla se duplica, equivale a un número entero impar. Fermi y Dirac elaboraron un sistema de normas para manipular las energías de las partículas cuya rotación, al duplicarse, es igual a un número entero impar.

Estas normas constituyen las llamadas «estadísticas Fermi-Dirac», y las partículas que obedecen a esas leyes (tales como el electrón o el protón) se llaman «fermiones». El neutrón es también un fermión.

Hay también partículas cuya rotación, al duplicarse, resulta igual a un número par. Para manipular sus energías hay otra serie de reglas, ideadas por Einstein y el físico indio S. N. Bose. Las partículas que se adaptan a las «estadísticas Bose-Einstein» son «bosones». Por ejemplo, la partícula alfa, es un bosón.

Estas variedades de partículas tienen diferentes propiedades. Por ejemplo, el principio de exclusión de Pauli (véase capítulo V) tiene aplicación no sólo a los electrones, sino también a los fermiones; pero no a los bosones.

Es fácil comprender cómo forma un campo magnético la partícula cargada, pero ya no resulta tan fácil saber por qué ha de hacerla lo mismo un neutrón descargado. Lo cierto es que ocurre así. La prueba directa más evidente de ello es que cuando un rayo de neutrones incide sobre un hierro magnetizado, no se comporta de la misma forma que lo haría si el hierro no estuviese magnetizado.

El magnetismo del neutrón sigue siendo un misterio; los físicos sospechan que contiene cargas positivas y negativas equivalentes a cero, aunque, por alguna razón desconocida, logran crear un campo magnético cuando gira la partícula.

Sea como fuere, la rotación del neutrón nos da la respuesta a esta pregunta: ¿Qué es el antineutrón? Pues, simplemente, un neutrón cuyo movimiento rotatorio se ha invertido; su polo sur magnético, por decirlo así, está arriba y no abajo. En realidad, el protón y el antiproton, el electrón y el positrón, muestran exactamente el mismo fenómeno de los polos invertidos.

Es indudable que las antipartículas pueden combinarse para formar la «antimateria», de la misma forma que las partículas corrientes forman la materia ordinaria. La primera demostración efectiva de antimateria se tuvo en Brookhaven en 1965, donde fue bombardeado un blanco de berilio con 7 protones BeV, y se produjeron combinaciones de antiprotones y antineutrones, o sea un «antideuterón». Desde entonces se ha producido el «antihelio 3», y no cabe duda que se podrían crear otros antinúcleos más complicados aún si se abordara el problema con el suficiente interés. Ahora bien, por lo pronto, el principio es de una claridad meridiana, y ningún físico lo pone en duda. La antimateria puede existir.

Pero, ¿existe en realidad? ¿Hay masas de antimateria en el Universo? Si las hubiera, nos revelarían su presencia a cierta distancia. Sus efectos gravitatorios y la luz que produjeran serían idénticos a los de la materia corriente. Sin embargo, cuando se encontrasen con esta materia, deberían ser claramente perceptibles las reacciones masivas de aniquilamiento resultantes. Así, pues, los astrónomos se afanan en observar especulativamente las galaxias, para comprobar si hay alguna actividad inusitada que delate las interacciones materia-antimateria. ¿Qué decir sobre la

explosión de galaxias? ¿Y sobre el Messier-87, con el brillante chorro luminoso que surge de su cuerpo globular? ¿Y sobre las enormes energías que fluyen de los cuásares? Y, por otra parte, ¿qué decir del formidable impacto meteórico ocurrido en Siberia en 1908 y de sus destructoras consecuencias? ¿Fue un simple meteoro, o quizás un trozo (y tal vez no demasiado grande) de antimateria?

Pero se plantean algunas preguntas incluso más fundamentales. ¿Por qué habría de haber algunos fragmentos de antimateria en un Universo compuesto principalmente por materia? Al ser la materia y la antimateria dos cosas equivalentes en todos los sentidos, excepto el de la antítesis electromagnética, cualquier fuerza que hubiese creado la una habría originado también la otra, y el Universo estaría constituido por cantidades idénticas de ambas. Si éstas estuviesen íntimamente mezcladas, las partículas de materia y antimateria se aniquilarían mutuamente; pero, ¿qué ocurriría si interviniere algún efecto para separarlas después de su creación?

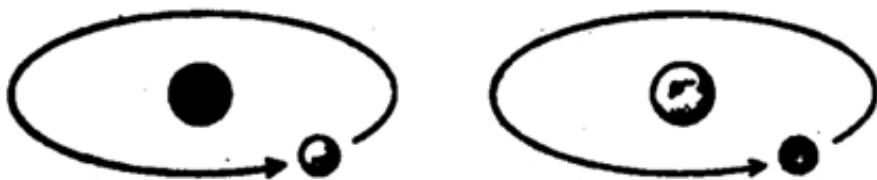
A este respecto, el físico sueco Oskar Klein hizo una sugerencia, que fue divulgada más tarde por su compatriota Hannes Alfven. Supongamos que el Universo se constituyó como una agrupación muy enrarecida de partículas, diseminadas por una esfera cuyo diámetro tuviese 3.000 billones o más de años-luz. Una mitad de las partículas podrían ser corrientes, y la otra mitad, antipartículas; pero en tales condiciones de rarefacción, ambas se moverían libremente, y apenas chocarían entre sí ni se aniquilarían.

Si hubiese campos magnéticos en tan tenue Universo, las partículas de una determinada región tenderían a curvarse en una dirección, y las antipartículas, en dirección contraria, es decir, ambas tenderían a separarse. Después de la separación, se aglomerarían a su debido tiempo para formar galaxias y antigalaxias. Si entonces iniciaran una interacción algunos fragmentos considerables de materia y antimateria, ya mientras las galaxias se estuviesen formando, ya después de su formación, la radiación liberada en sus volúmenes de contacto las separaría en virtud de la presión. De esta forma se encontrarían, al fin, galaxias y antigalaxias extendidas uniformemente.

Luego, la mutua atracción gravitatoria las haría aproximarse en un «Universo contráctil». Cuando más se trajese el Universo, tanto mayores serían las probabilidades de colisiones galaxia-antigalaxia y tanto mayor también la radiación

energética producida. Finalmente, cuando el diámetro del Universo se redujese a mil millones de años-luz, la radiación generada ejercería, la presión suficiente para hacerlo estallar y separar con violencia las galaxias de las antgalaxias. Según Klein y Alfven ahora nos encontramos en esta fase de expansión, y lo que nosotros interpretamos como evidencia del «gran estallido», serían pruebas demostrativas del momento crucial en que el Universo-Antiuniverso produce la energía suficiente para provocar su propia explosión, por así decirlo.

Si esto fuera cierto, la mitad de las galaxias que hoy vemos serían antgalaxias. Pero, ¿cuál es esa mitad? ¿Cómo podemos averiguarlo? Por ahora no hay respuesta. Otra consideración sobre la antimateria a escala algo menor replantea la cuestión de los rayos cósmicos. Casi todas las partículas del rayo cósmico tienen energías que oscilan entre 1 y 10 BeV. Esto podría explicarse mediante la interacción materia-antimateria. Pero unas cuantas partículas cósmicas rebasan ampliamente ese límite, pues llegan a 20, 30 y hasta 40 BeV. Los físicos del «Massachusetts Institute of Technology» han detectado algunas que poseen la colossal energía de 20.000 millones de BeV. Aunque tales cifras sean inconcebibles para la mente humana, podemos formarnos una idea de lo que significa esa energía haciendo el siguiente cálculo: si la cantidad de energía representada por 10.000 billones de BeV se comunicara a una partícula submicroscópica, le permitiría levantar 1 Tm de peso a 50 mm de altura.



*Un átomo de hidrógeno y un átomo de su contrapartida, la antimateria, consistente en un antiproton y un positrón.*

Desde el descubrimiento de los rayos cósmicos, el mundo se viene preguntando de dónde proceden y cómo se forman. El concepto más simple es el que en algún punto de la Galaxia, ya en nuestro Sol, ya en un astro más distante, se originan

continuas reacciones nucleares, que disparan partículas cuya inmensa energía conocemos ya.

En realidad, estallidos de rayos cósmicos leves se producen, poco más o menos, a años alternos (como se descubrió en 1942), en relación con las protuberancias solares. Y, ¿qué podemos decir de fuentes como las supernovas, pulsares y cuásares? Pero no se sabe de ninguna reacción nuclear que pueda producir nada semejante a esos miles de millones de BeV. La fuente energética que podemos concebir sería el aniquilamiento mutuo entre núcleos pesados de materia y antimateria, lo cual liberaría a lo sumo 250 BeV.

Otra posibilidad consiste en suponer, como hiciera Fermi, que alguna fuerza existente en el espacio acelera las partículas cósmicas, las cuales pueden llegar al principio, con moderadas energías, procedentes de explosiones tales como las de las supernovas, para ir acelerándose progresivamente a medida que cruzan por el espacio. La teoría más popular hoy es la que son aceleradas por los campos magnéticos cósmicos, que actúan como gigantescos sincrotrones. En el espacio existen campos magnéticos, y se cree que nuestra Galaxia posee uno, si bien su intensidad debe de equivaler, como máximo, a 1/20.000 de la del campo magnético asociado a la Tierra.

Al proyectarse a través de ese campo, las partículas cósmicas experimentarían una lenta aceleración a lo largo de una trayectoria curva. A medida que ganasen energía, sus órbitas se irían ensanchando, hasta que las más energéticas se proyectarían fuera de la Galaxia. Muchas de esas partículas no lograrían escapar jamás siguiendo esta trayectoria, porque las colisiones con otras partículas o cuerpos mayores amortiguarían sus energías, pero algunas sí lo conseguirían. Desde luego, muchas de las partículas cósmicas energéticas que llegan hasta la Tierra pueden haber atravesado nuestra Galaxia después de haber sido despedidas de otras galaxias de la forma descrita.

### Más Partículas Nuevas

En realidad, el descubrimiento de las antipartículas no perturbó a los físicos; por el contrario, fue para ellos una grata confirmación de la simetría del Universo. Lo que

sí los desconcertó fue la rápida sucesión de descubrimientos, demostrativo que las «partículas elementales» no eran sólo el protón, el electrón y el neutrón.

La primera de estas complicaciones surgió incluso antes que se descubriera el neutrón. Se relacionaba con la emisión de partículas beta por los núcleos radiactivos.

La partícula emitida por un núcleo radiactivo suele transportar una considerable cantidad de energía. ¿De dónde procede ésta? Se origina al convertirse en energía una pequeña parte de la masa nuclear. Dicho de otra forma: el núcleo pierde siempre cierta porción de masa al expeler la partícula. Los físicos se sienten desconcertados ante este otro hecho: la partícula beta desprendida al decaer el núcleo carece a menudo de la suficiente energía para explicar la cantidad de masa que pierde el núcleo. En realidad, no todos los electrones mostraban la misma deficiencia. Emergieron con un amplio espectro de energía: el máximo (alcanzado por muy pocos electrones) era casi correcto, mientras que todos los demás fallaban en menor o mayor medida. Esto no era un factor necesariamente concomitante en la emisión de partículas subatómicas. Las partículas alfa emitidas por un nucleido particular poseían energías iguales en las cantidades esperadas. Entonces, ¿qué iba mal en la emisión de partículas beta? ¿Qué sucedió con la energía desaparecida?

En 1922, Lise Meitner se hizo por primera vez esta pregunta, y, hacia 1930, Niels Bohr estaba dispuesto a abandonar el gran principio de conservación de la energía, al menos en lo concerniente a partículas subatómicas. En 1931, Wolfgang Pauli sugirió una solución para el enigma de la energía desaparecida. Tal solución era muy simple: junto con la partícula beta del núcleo se desprendía otra, que se llevaba la energía desaparecida. Esa misteriosa segunda partícula tenía propiedades bastante extrañas. No poseía carga ni masa. Lo único que llevaba, mientras se movía a la velocidad de la luz era cierta cantidad de energía. A decir verdad, aquello parecía un cuerpo ficticio creado exclusivamente para equilibrar el contraste de energías.

Sin embargo, tan pronto como se propuso la posibilidad de su existencia, los físicos creyeron en ella a pies juntillas. Y esta certeza se intensificó al descubrirse el neutrón y al saberse que se desintegraba en un protón y se liberaba un electrón, que, como en la decadencia beta, portaba insuficientes cantidades de energía.

Enrico Fermi dio a esta partícula putativa el nombre de «neutrino», palabra italiana que significa «pequeño neutro».

El neutrón dio a los físicos otra prueba palpable de la existencia del neutrino. Como ya hemos dicho, casi todas las partículas describen un movimiento rotatorio. Esta rotación se expresa, más o menos, en múltiplos de una mitad según la dirección del giro. Ahora bien, el protón el neutrón y el electrón tienen rotación de una mitad. Por tanto, si el neutrón con rotación de una mitad origina un protón y un electrón, cada uno con rotación de una mitad, ¿qué sucede respecto a la ley sobre conservación del momento angular? Aquí hay algún error. El protón y el electrón totalizan una unidad con sus rotaciones (si ambas rotaciones siguen la misma dirección) o cero (si sus rotaciones son apuestas); pero sus rotaciones no pueden sumar jamás una mitad. Sin embargo, por otra parte, el neutrino viene a solventar la cuestión. Supongamos que la rotación del neutrón sea  $+1/2$ , y admitamos también que la rotación del protón sea  $+1/2$ , y la del electrón,  $1/2$ , para dar un resultado neto de 0. Demos ahora al neutrino una rotación de  $+1/2$ , y la balanza quedará equilibrada.

$$+1/2 \text{ (n)} = +1/2 \text{ (p)} -1/2 \text{ (e)} +1/2 \text{ (neutrino)}$$

Pero aún queda algo por equilibrar. Una sola partícula (el neutrón) ha formado dos partículas (el protón y el electrón), y, si incluimos el neutrino, tres partículas. Parece más razonable suponer que el neutrón se convierte en dos partículas y una antipartícula. En otras palabras: lo que realmente necesitamos equilibrar no es un neutrino, sino un antineutrino.

El propio neutrino surgiría de la conversión de un protón en un neutrón. Así, pues, los productos serían un neutrón (partícula), un positrón (antipartícula) y un neutrino (partícula). Esto también equilibra la balanza.

Las más importantes conversiones protón-neutrón son las relacionadas con las reacciones nucleares que se desarrollan en el Sol y en otros astros. Por consiguiente, las estrellas emiten radiaciones rápidas de neutrinos, y se calcula que tal vez pierdan a causa de esto el 6 u 8 % de su energía. Sin embargo, esto es cierto sólo para estrellas tales como nuestro Sol. En 1961, el físico americano Hong Yee Chiu manifestó que cuando se elevan las temperaturas centrales de un astro,

pueden ser importantes las reacciones productoras de neutrinos adicionales. Cuando una estrella, en su curso evolutivo, progresá hacia un centro de temperatura cada vez más elevada (véase capítulo 1), los neutrinos le arrebatarían su energía en proporción creciente.

Esto tiene una gran importancia. El método habitual de transmitir energía, mediante los fotones- es lento. Los fotones mantienen una interacción con la materia y se abren camino desde el centro del Sol hacia la periferia, tras innumerables series de absorciones y reemisiones. Por consiguiente, aunque la temperatura, en el centro del Sol, sea de  $15.000.000^{\circ}$  C, su superficie está sólo a  $6.000^{\circ}$  C. La sustancia solar es un buen aislante del calor.

Sin embargo, los neutrinos no mantienen virtualmente interacción con la materia. Se ha calculado que el neutrino corriente podría atravesar 100 años luz de plomo sólido sin que sus probabilidades de resultar absorbido superaran el 50 %. Esto significa que el neutrino formado en el centro del Sol parte instantáneamente, a la velocidad de la luz, para alcanzar, sin interferencias, la superficie del astro en menos de tres segundos, y proseguir su veloz trayectoria. (Cualquier neutrino lanzado en nuestra dirección, nos atravesará sin afectarnos en forma alguna. Así ocurrirá siempre, día y noche, pues con la oscuridad, cuando la masa terrestre se interpone entre nosotros y el Sol, los neutrinos pueden atravesar fácilmente tanto la Tierra como nuestros cuerpos.)

Según calcula Chiu, cuando se alcanza la temperatura central de unos  $6.000.000.000^{\circ}$  C, casi toda la energía del astro se deposita en los neutrinos. Éstos parten al instante, llevándose consigo la energía, y el centro solar se enfria de un modo drástico. Tal vez sea esto lo que determine la catastrófica contracción, que luego se manifiesta en forma de una supernova. Cualquier conversión neutrón-protón origina antineutrinos, mas por ahora no se sabe que éstos actúen en las vastas proporciones que conducen a esos aludes de neutrinos procedentes de cada estrella. Las fuentes más importantes de antineutrinos son la radiactividad natural y la fisión del uranio (a las cuales nos referiremos más detenidamente en el capítulo IX).

Naturalmente, los físicos no se dieron por satisfechos hasta encontrar el rastro del neutrino. El científico no se siente feliz mientras haya de aceptar como artículo de fe

los fenómenos o leyes de la Naturaleza. Pero, ¿cómo detectar una entidad tan nebulosa cual el neutrino, un objeto sin masa ni carga prácticamente sin tendencia alguna a la interacción con la materia corriente?

Sin embargo, aún quedaba una leve esperanza, y si bien parecen extremadamente reducidas, no son nulas las probabilidades que un neutrino reaccione ante cualquier partícula. El atravesar cien años luz de plomo sin experimentar modificación, se considera como un promedio; pero ciertos neutrinos reaccionarán con una partícula antes de alcanzar semejante distancia, y algunos, una proporción ínfima, casi inconcebible, del número total detendrán su carrera ante el equivalente de 2,5 mm de plomo.

En 1953, un equipo de físicos dirigido por Clyde L. Cowan y Frederick Reines, del «Los Alamos Scientific Laboratory», intentaron abordar lo «casi imposible». Instalaron los aparatos para detectar neutrinos junto a un inmenso reactor de fisión de la «Atomic Energy Commission», a orillas del río Savannah, en Georgia. El reactor proporcionaría corrientes de neutrones, que liberarían aludes de antineutrinos, o al menos así se esperaba. Para capturarlos, los investigadores emplearon grandes tanques de agua.

El plan consistió en dejar que los antineutrinos bombardearan los protones (núcleos de hidrógeno) dentro del agua, al objeto de poder detectar así los resultados cuando un protón capturara un antineutrino.

¿Qué sucedería? Cuando el neutrón se desintegra, desprende un protón, un electrón y un antineutrino. Ahora bien, la absorción del antineutrino por el protón debería originar, fundamentalmente, lo contrario. Es decir, el protón debería convertirse en neutrón al emitir un positrón en el proceso. Así, pues, sería preciso estar atento a dos acontecimientos: 1º La creación de neutrones, 2º La creación de positrones. Para detectar los neutrones, se disolvería un compuesto de cadmio en el agua, pues cuando el cadmio absorbe los neutrones, emite rayos gamma de energía característica. Y los positrones se podrían identificar por su interacción aniquiladora con los electrones, lo cual originaría otra especie de rayos gamma. Si los instrumentos de los investigadores detectaran esos rayos gamma de energías tan reveladoras, con el intervalo exacto, se podría tener la certeza que habrían captado los antineutrinos.

Los investigadores pusieron a punto sus ingeniosos artificios detectores y esperaron pacientemente hasta 1956, en que lograron capturar el antineutrino. Hacía entonces veinticinco años que Pauli había descubierto la partícula. Los periódicos, e incluso algunas revistas especializadas, lo llamaron, simplemente «neutrino».

Para llegar hasta el auténtico neutrino necesitamos alguna fuente rica en neutrinos. Y la idónea es, evidentemente, el Sol. ¿Qué sistema puede emplearse para detectar el neutrino como elemento opuesto al antineutrino? Se perfila una posibilidad, según cierta sugerencia del físico italiano Bruno Pontecorvo- con el cloro 37, que representa, aproximadamente, 1/4 de todo el cloro contenido en los átomos. Su núcleo posee 17 protones y 20 neutrones. Si uno de estos neutrones absorbe un neutrino, se transforma en protón (y desprende un electrón). Entonces, el núcleo tendrá 18 protones y 19 neutrones, y será el argón 37.

Para constituir un blanco aceptable de neutrones-cloro se podría usar el cloro líquido; pero se trata de una sustancia muy corrosiva y tóxica; además, si se quiere mantener líquida, se ha de resolver un problema de refrigeración. En su lugar podemos utilizar compuestos orgánicos que contengan cloro; para este propósito es adecuado el tetracloroetileno.

En 1956, el físico americano Raymond R. Davis tendió dicha «trampa» al neutrino, para demostrar que existe realmente una diferencia entre el neutrino y el antineutrino. Suponiendo que ambas partículas fueran distintas, la «trampa» detectaría sólo neutrinos, no antineutrinos. Cuando fue montada junto a un reactor de fisión en condiciones que le permitieran detectar antineutrinos (suponiendo que éstos fuesen idénticos a los neutrinos), *no* los detectó.

Luego se intentó detectar los neutrinos del Sol. Para ello se empleó un enorme tanque con 450.000 litros de tetracloroetileno. Se instaló en una profunda mina de Dakota del Sur, o sea, que encima había la tierra suficiente para absorber cualesquiera partículas que llegaran del Sol, excepto los neutrinos. (Así, pues, nos encontramos ante la peregrina situación que es preciso zambullirse en las entrañas de la Tierra para poder estudiar el Sol.) Aquel tanque permaneció expuesto a los neutrinos solares durante varios meses... para que el argón 37 tuviera tiempo de acumularse en cantidad apreciable. Luego se llenó el tanque hasta el borde con helio, se mantuvo así veintidós horas y se determinó la minúscula cantidad de argón

37. En 1968 se detectaron los neutrinos solares, pero en una cantidad inferior a la mitad de lo que se había supuesto, según las teorías actuales acerca de lo que ocurre en el interior del Sol. Ahora bien, para esto se requieren unas técnicas experimentales enormemente laboriosas, y, además, en este sentido nos hallamos todavía en los comienzos.

Así, pues, nuestra lista de partículas abarca ya ocho elementos: protón, neutrón, electrón, neutrino; y sus respectivas antipartículas. Sin embargo, esto no representó el fin de la lista. A los físicos les parecían necesarias otras partículas si querían explicar concretamente cómo se agrupaban éstas en el núcleo.

Las atracciones habituales entre protones y electrones, entre un átomo y otro, entre una molécula y otra, se explicaban mediante las fuerzas electromagnéticas: la mutua atracción de cargas eléctricas opuestas. Pero eso no bastaba para el núcleo, en el cual los protones eran las únicas partículas cargadas. Si recurriéramos a los razonamientos electromagnéticos, cabría suponer que los protones, todos con carga positiva- se repelerían violentamente unos a otros, y que todo núcleo atómico estallaría apenas formado (suponiendo que se pudiera formar).

Evidentemente, aquí debía intervenir otra fuerza, algo de mayor potencia que la fuerza electromagnética y capaz de dominarla. La potencialidad superior de esa «fuerza nuclear» se puede demostrar con facilidad mediante la siguiente consideración: Los átomos de una molécula muy compacta, como el monóxido de carbono, pueden disociarse si se les aplican sólo 11 eV de energía. Tal energía basta para obtener una poderosa manifestación de fuerza electromagnética.

Por otra parte, el protón y el neutrón integrantes de un deuterón, uno de los núcleos menos compactos- requieren 2 millones de electronvoltos para la disociación. A decir verdad, las partículas del interior del núcleo están mucho más apelotonadas que los átomos dentro de la molécula; pero, aún admitiendo esto, se puede afirmar, sin vacilación, que la fuerza nuclear es 130 veces más potente que la electromagnética.

Ahora bien, ¿cuál es la naturaleza de esa fuerza nuclear? El primer indicio cierto se tuvo en 1932, cuando Werner Heisenberg señaló que el «intercambio de fuerzas» mantenía los protones unidos. Heisenberg describió los protones y neutrones en el núcleo como un continuo intercambio de identidades. Así, pues, según este

investigador, una determinada partícula fue, primero, protón; luego, neutrón; más tarde, protón, etc. De esta forma se conservaba la estabilidad del núcleo a semejanza de como nosotros podemos sostener una patata caliente pasándola sin cesar de una mano a otra. Cuando el protón aún no «se había dado cuenta» que era protón, e intentaba reunirse con los protones vecinos, se transformaba en neutrón y podía permanecer donde estaba. Naturalmente, sólo se «saldría con la suya» si se produjera esa transformación con increíble rapidez, digamos en una trillonésima de trillonésima de segundo.

Otra forma de enfocarlo consiste en imaginar dos partículas que se intercambian una tercera. Cada vez que la partícula *A* emite la partícula intercambiable, retrocede para conservar su momento. Y cada vez que la partícula *B* acepta la partícula intercambiable recibe un impulso hacia atrás, por idéntica razón. Mientras la partícula intercambiable va de un lado a otro, las partículas *A* y *B* se distancian entre sí cada vez más, como si estuvieran sometidas a una repulsión. Si, por otro lado, la partícula intercambiable se mueve como un bumerang desde la parte posterior de la partícula *A* hasta la posterior de la *B*, ambas partículas se acercarán como si obedecieran a una fuerza de atracción.

Según la teoría de Heisenberg, parece ser que todas las fuerzas de atracción y repulsión derivan de las partículas intercambiables. En el caso de la atracción y repulsión electromagnética, la partícula intercambiable será el fotón, que, como veremos en el capítulo siguiente- es una partícula sin masa, generalmente asociada a la luz y a la radiación electromagnética. Aquí cabría aducir que, precisamente porque el fotón no tiene masa, la atracción y repulsión electromagnéticas son de largo alcance, pierden intensidad sólo con el cuadrado de la distancia y, por tanto, tienen importancia para las distancias interestelares e incluso intergalácticas.

Según dicho razonamiento, la gravitación, también de largo alcance y qué asimismo, pierde intensidad con el cuadrado de la distancia, debe implicar un continuo intercambio de partículas sin masa. Esta partícula fue denominada «gravitón» por los físicos.

La gravitación es mucho más débil que la fuerza electromagnética. Cuando un protón y un electrón se atraen mutuamente por medio de la gravitación, lo hacen sólo con una fuerza equivalente al  $1/10^{39}$  del impulso que los uniría mediante

conductos electromagnéticos. Así, pues, el gravitón debe de ser mucho menos energético que el fotón, y, en consecuencia, su detección deberá ser dificilísima.

Sin embargo, el físico americano Joseph Weber intenta detectarlo desde 1957. En sus tentativas más recientes ha utilizado dos cilindros de aluminio, de 1,53 m de longitud y 66 cm de anchura, suspendido de un alambre en cámara de vacío. Los gravitones (que se detectarían en forma de ondas) moverían levemente dichos cilindros, y entonces se emplearía un sistema medidor con capacidad para apreciar desplazamientos de 100 trillónésimas de centímetro. Las sutiles ondas de los gravitones que llegan de la profundidad espacial, quizá borran todo el Planeta, por lo cual, los cilindros separados entre sí por grandes distancias deberían mostrar simultáneamente los mismos efectos de las ondas gravitatorias. Si es así, se plantea este interrogante: ¿Qué pueden representar en la inmensidad espacial esas fluctuaciones de la gravitación, lo bastante potentes como para producir ondas perceptibles? ¿Serán fenómenos en los que intervengan estrellas-neutrón, orificios negros o qué? Lo ignoramos.

Pero volvamos a la fuerza nuclear. Ésta es de corto alcance, a diferencia de los campos electromagnéticos y gravitatorios. Aún siendo muy fuerte dentro del núcleo, se desvanece casi por completo fuera de él. De consiguiente, la partícula intercambiable y sin masa no tiene aquí finalidad alguna.

En 1935, el físico japonés Hideki Yukawa intentó analizar matemáticamente el problema. Su razonamiento llevó a este resultado: la transferencia alternativa de cargas entre protón y neutrón debe correr a cargo de una partícula que posea cierta masa. Dicha masa se podría calcular tomando como base el alcance del campo de fuerza nuclear, evidentemente, un alcance muy parco, pues no se dejaba sentir más allá del ultramicroscópico núcleo-. La masa estaría en razón inversa al alcance: a mayor masa, menor alcance. Resultó que la masa de la partícula apropiada figuraba en algún lugar entre las masas del protón y el electrón. Yukawa estimó que sería 200 o 300 veces mayor que la masa de un electrón.

Escasamente un año después se descubrió esa partícula tan especial. En el «California Institute of Technology», Carl Anderson (descubridor del positrón), cuando examinaba las huellas dejadas por unos rayos cósmicos secundarios, halló un rastro muy corto, más curvilíneo que el del protón y menos que el del electrón.

En otras palabras, la partícula en cuestión tenía una masa intermedia. Pronto se detectaron otros rastros semejantes, y las partículas recibieron el nombre de «mesotrones» o «mesones», para abreviar.

Más tarde se descubrió otra partícula perteneciente a este tipo de masa intermedia, que recibió el nombre de «mu mesón», «mesón mu» o «muon» («mu» es una letra del alfabeto griego; hoy se emplea ya casi todo este alfabeto para denominar partículas subatómicas). Como en el caso de las partículas citadas anteriormente, el muon presenta dos variedades: positiva y negativa.

El muon negativo, que tiene 206,77 veces más masa que el electrón (y, por tanto, una novena parte del protón) es la partícula; el muon positivo es la antipartícula. El muon negativo y el muon positivo corresponden, respectivamente, al electrón y al positrón. Por cierto que en 1960 se hizo evidente que el muon negativo era idéntico al electrón en todos los aspectos, excepto en la masa. Era, pues, un «electrón pesado». Asimismo, el muon positivo era un «positrón pesado».

Hasta ahora no se ha podido explicar esta identidad, pese a ser tan real, que los muones negativos pueden remplazar a los electrones en el átomo para formar «átomos muon». Asimismo, los muones positivos remplazan a los positrones en la antimateria.

Los muones positivos y negativos se aniquilarán entre sí, y tal vez giren antes brevemente en torno a un centro común de fuerza; lo mismo cabe decir de los electrones positivos y negativos. Sin embargo, en 1960 el físico americano Vernon Willard Hughes descubrió una situación mucho más interesante. Detectó un sistema en que el electrón giraba alrededor de un muon positivo: lo denominó «muonio» (el positrón que gira alrededor de un muon negativo sería el «antimuonio»).

El átomo muonio (si se nos permite llamarlo así) es análogo al hidrógeno I, en el cual el electrón gira en torno a un protón positivo, y ambos son similares en muchas de sus propiedades. Aunque los muones y electrones parecen ser idénticos, si se exceptúa la masa, esta diferencia de masas basta para evitar una verdadera oposición entre el electrón y el muon positivo, de forma que ninguno de ellos aniquilaría al otro. Por consiguiente, el muonio no tiene la inestabilidad característica del positrónio. El muonio resiste más tiempo, y resistiría indefinidamente, siempre y cuando no fuese perturbado desde el exterior- si no

fuera porque el muon es mucho menos resistente. Apenas transcurridas dos millonésimas de segundo aproximadamente, el muon se desmorona, y el átomo muonio deja de existir.

He aquí otro punto de similitud: así como las partículas pesadas pueden producir electrones más antineutrinos, como cuando un neutrón se convierte en protón, o positrones más neutrinos (como cuando un protón se convierte en neutrón), esas mismas partículas pesadas pueden mantener una interacción para formar muones negativos más antineutrinos, o muones positivos más neutrinos. Durante largos años, los físicos dieron por supuesto que los neutrinos que acompañaban a los electrones y positrones eran idénticos a los que iban unidos a los muones negativos y positivos. Sin embargo, en 1962 se comprobó que los neutrinos no pasaban nunca al otro campo, por así decirlo; el neutrino del electrón no emprendía jamás una interacción que condujera a formar un muon, y, por su parte, el neutrino del muon tampoco procedía en el mismo sentido respecto a formar un electrón o un positrón. Resumiendo: los físicos se encontraron con los pares de partículas sin cargas ni masas: el antineutrino del electrón y el neutrino del positrón, más el antineutrino del muon negativo y neutrino del muon positivo. ¿Cuál sería la diferencia entre los dos neutrinos y entre los dos antineutrinos? De momento no puede decirse nada en este sentido, pero no cabe duda que son diferentes. Los muones difieren de los electrones y positrones en otro aspecto: el de la estabilidad. El electrón o positrón abandonado a su propia suerte, permanece invariable indefinidamente. En cambio, el muon es inestable y se desintegra al cumplirse las dos millonésimas de segundo, que es su promedio de vida. El muon negativo se desintegra para formar un electrón (más un antineutrino de la variedad electrón y un neutrino de la variedad muon), mientras que el muon positivo hace lo mismo, aunque a la inversa, o sea, da un positrón, un electrón-neutrino y un muon-antineutrino.

Puesto que el muon constituye una especie de electrón pesado, no puede ser ese aglutinante nuclear que buscaba Yukawa. Los electrones no se encuentran dentro del núcleo; por tanto, tampoco puede estar allí el muon. Así se comprobó, sobre una base puramente experimental, mucho antes que se barruntara la identidad aproximada del muon y el electrón; los muones no mostraron la menor tendencia a

mantener interacciones con el núcleo. Durante algún tiempo pareció tambalearse la teoría de Yukawa.

No obstante, en 1947 el físico británico Cecil Frank Powell descubrió otro tipo de mesón en las fotografías de rayos cósmicos. Su masa era algo mayor que la del muon y, como se pudo demostrar, poseía la masa de un electrón multiplicado por 273. Este nuevo mesón se denominó «mesón pi» o «pion».

Se descubrió que el pion reaccionaba poderosamente con el núcleo y que, sin duda, era la partícula preanunciada por Yukawa. (Éste obtuvo el premio Nobel de Física en 1949, y Powell en 1950.) En realidad había un pion positivo que actuaba como fuerza alterna entre los protones y neutrones, así como la correspondiente antipartícula, el pion negativo, que prestaba el mismo servicio a los antiprotones y antineutrones. La vida de ambos es más corta incluso que la de los muones; transcurrido  $1/14$  de microsegundo, su vida media, se desintegran en muones y neutrinos de la variedad muon. (Y, por supuesto, el muon sufre una segunda desintegración, para formar electrones y neutrinos adicionales.) Hay también un pion neutro que es, al mismo tiempo, su propia antipartícula. (Digamos, de pasada, que existe sólo una variedad de esta partícula.) Es extremadamente inestable, y se desintegra en una quintillonésima escasa de segundo, para formar una pareja de rayos gamma. Desde 1960 los físicos estudian algunos «átomos exóticos» inestables, a fin de obtener más detalles sobre la estructura de la molécula.

Desde su descubrimiento, el pion ha adquirido una gran importancia en el panorama del mundo subatómico, visto por los físicos. Hasta los protones y neutrones libres aparecen rodeados de sutiles nubecillas de piones, e incluso éstos forman parte de su composición. El físico americano Robert Hofstadter investigó los núcleos con electrones extremadamente energéticos producidos por un acelerador lineal. Según Hofstadter, los centros de protones y neutrones están constituidos por mesones. Las investigaciones en este campo le valieron compartir con Mössbauer el premio Nobel de Física en 1961.

Al aumentar el número de partículas conocidas, los físicos creyeron necesario dividirlas en grupos. Las más ligeras recibieron el nombre de «leptones» (de la voz griega que significa «débil, pequeño»). (En este grupo se incluyeron los electrones, los muones, sus antipartículas y sus neutrinos. En general se incluye también el

fotón, partícula de masa y carga cero, pero de spin igual a 1. Por esto último, el fotón difiere de varios neutrinos, cuyas cargas y masas son también nulas, pero cuyo spin es de media unidad.) Se considera que el fotón es, al mismo tiempo, su propia antipartícula. También se incluye el gravitón, que difiere de otras partículas sin masa ni carga por tener un spin de 2 El hecho que los fotones y los gravitones sean sus propias antipartículas contribuye a explicar por qué resulta tan difícil averiguar si una galaxia distante es materia o antimateria. Mucho de lo que recibimos desde galaxias remotas son fotones y gravitones; una galaxia de antimateria emite exactamente los mismos fotones y gravitones que una galaxia de materia. No hay antifotones ni antigravitones que puedan dejar huellas perceptibles de la antimateria. Sin embargo, deberíamos recibir neutrinos... o antineutrinos. El predominio de neutrinos revelaría la materia; el de antineutrinos, la antimateria. Con el desarrollo de técnicas para detectar neutrinos o antineutrinos del espacio exterior, algún día será posible determinar la existencia y localización de antigalaxias.

Algunos leptones no tienen carga eléctrica ni masa. Todas estas partículas sin carga ni masa son estables. Abandonadas a sus propios medios, subsisten inalterables (por lo menos, que nosotros sepamos) hasta el infinito.

Por alguna razón ignorada, sólo puede haber carga si hay masa; pero las partículas con masa tienden a desintegrar a las de menos masa. Así, pues, un muon, por ejemplo, tiende a desintegrar el electrón; y el electrón (o positrón) es, de acuerdo con nuestros conocimientos actuales, la partícula de menos masa entre todas las conocidas. Para éste, la progresiva desintegración implica la pérdida total de masa, lo cual significa también la pérdida de carga eléctrica. Ahora bien, puesto que la ley de conservación de la carga eléctrica niega toda pérdida de carga eléctrica, el electrón no puede desintegrarse. Un electrón y un positrón están expuestos al mutuo aniquilamiento, porque las cargas opuestas se neutralizan recíprocamente; pero cualquiera de ellos, abandonado a sus propios medios, puede tener una existencia ilimitada.

Los leptones tienen menos masa que los «mesones», cuya familia no incluye ya el muon, aún cuando ésta partícula fuera el mesón original. Entre los mesones se incluyen hoy los piones y una nueva variedad: el «mesón K», o «kayón». Fue

detectado, en 1952, \_por dos físicos polacos: Marian Danysz y Jerzy Pniewski. Es el más pesado de todos los mesones conocidos: tiene 970 veces más masa que un electrón; así, pues, equivale a medio protón o neutrón. El kayón presenta dos variedades: el positivo y el neutro, cada uno asociado a su correspondiente antipartícula. Desde luego, es inestable y se desintegra en un microsegundo, para formar piones.

Por encima del mesón está el «barión» (de la voz griega que significa «pesado»). Hasta la década de los cincuenta, el protón y el neutrón fueron las únicas especies conocidas. Hacia 1954 se descubrió una serie de partículas de mayor masa aún (llamadas, por algunos, «hiperones»). Estas partículas barión, se han multiplicado de un modo particular en años recientes; el protón y el electrón son los más ligeros de una larga serie.

Según han descubierto los físicos, hay una «ley de conservación del número barión», pues en todas las desintegraciones de partículas, el número neto de bariones (es decir, bariones menos antibariones) permanece inalterable. La desintegración se produce siempre para pasar de una partícula de cierta masa a otra de masa menor, lo cual explica la estabilidad del protón y por qué es el *único* barión estable. No hay ningún barión tan ligero como él. Si se desintegrara, dejaría de ser barión, lo cual quebrantaría la ley de conservación del número barión. El antiproton es estable por el mismo motivo, ya que se trata del antibarión más ligero. Desde luego, un protón y un antineutrón pueden aniquilarse mutuamente, puesto que, unidos, forman un barión más un antibarión, para un número neto barión igual a cero.

Los primeros bariones que se descubrieron, aparte el protón y el neutrón, recibieron nombres griegos. Así, tenemos la «partícula lambda», la «partícula sigma» y la «partícula xi». La primera mostró una sola variedad: una partícula neutra; la segunda, tres variedades: positiva, negativa y neutra; y la tercera, dos: negativa y neutra. Cada una de éstas tenía una antipartícula asociada, lo cual daba un total de doce partículas. Todas eran extremadamente inestables; ninguna vivía más de una centésima de microsegundo, y algunas, como la partícula sigma neutra- se desintegraban al cabo de cien billonésimas de microsegundo.

La partícula lambda, que es neutra, puede remplazar al neutrón en un núcleo para formar un «hipernúcleo», entidad cuya vida es de una billonésima escasa de segundo. El primer hipernúcleo que se descubrió fue el del tritio, constituido por un protón, un neutrón y una partícula lambda. Danysz y Pniewski lo detectaron, en 1952, en los productos de la radiación cósmica. Y en 1963, Danysz informó acerca de ciertos hipernúcleos que contenían dos partículas lambda. Por añadidura, se consiguió que el hiperón negativo remplazara al electrón en la estructura atómica, según se informó en 1968. Estos sustitutos del electrón contornean el núcleo a una distancia tan corta que, en realidad, su vida transcurre dentro de las regiones nucleares externas.

Pero, después de todo, estas partículas son comparativamente estables; viven lo suficiente como para poderlas localizar a todas de un modo directo y atribuirseles una vida y personalidad propias. En la década de 1960, Álvarez detectó la primera de toda una serie de partículas, por lo cual se le otorgó el premio Nobel de Física en 1968. Estas partículas tenían una existencia tan breve, que se podía deducir sólo por la necesidad de hacer el recuento de sus productos residuales. Sus períodos de semivida alcanzan a veces sólo unas pocas billonésimas de billonésima de segundo, por lo cual se impone la pregunta a intervalos, como si se detuvieran un momento para «saludarse». antes de extinguirse para siempre en el vacío.

Estas partículas ultraefímeras se llaman «de resonancia». Al hacer su recuento, encontramos entre 50 y 100 partículas subatómicas diferentes, y los físicos no saben a ciencia cierta cuántas quedan aún por descubrir. Esta situación respecto a las partículas se asemeja a la planteada hace un siglo por los elementos, antes que Mendeléiev propusiera la tabla periódica.

Algunos físicos creen que ciertos mesones y bariones no son partículas del todo independientes; que los bariones pueden absorber y emitir mesones para alcanzar diversos niveles de excitación, y que se puede tomar fácilmente cada barión excitado por una partícula distinta. (Entre los átomos encontramos una situación similar, o sea, que un átomo determinado puede absorber o emitir fotones para alcanzar diversos grados de excitación electrónica, salvo la particularidad que un átomo de hidrógeno excitado es reconocible como tal.) Así, lo que se requiere es una especie de tabla periódica para las partículas subatómicas, algo que permita

agruparlas en familias integradas por uno o varios miembros básicos, junto con otras partículas que representen los diversos grados de excitación de ese miembro o miembros básicos.

En 1961, el físico americano Murray Gell-Mann y el físico israelí Yuval Ne'emen, independientemente, propusieron algo parecido. En un esquema de simetría perfecta se reunieron las partículas para formar grupos de acuerdo con sus distintas propiedades. Gell-Mann lo denominó «método óctuple», pero hoy se le llama universalmente « $SU \neq 3$ ». Por lo pronto, dicha agrupación necesitó una partícula más para estar completa. Si esta partícula hubiera de encajar perfectamente en el grupo, habría de tener una masa y un conjunto característicos de propiedades. Era poco probable que se encontrara una partícula con semejante combinación. Sin embargo, en 1964 se detectó una (la «omega-minus») que reunía las propiedades anunciadas, y en años sucesivos se volvió a detectar unas doce veces. En 1971 se localizó su antipartícula: la «antiomega-minus».

Aunque los bariones estuviesen ya divididos en grupos y se hubiese ideado una tabla periódica subatómica, quedaba aún el suficiente número de partículas distintas como para que los físicos sintiesen la necesidad de encontrar algo más simple y fundamental aún. En 1964, Gell-Mann, quien se había esforzado por hallar el sistema más sencillo para relacionar todos los bariones con un número mínimo de las «partículas subbariónicas» más importantes- propuso la voz «quark» y calculó que serían necesarios sólo tres quarks diferentes. Según este investigador, las distintas combinaciones con tales quarks bastarían para constituir todos los bariones conocidos. Esto le recordó un pasaje de la obra *Finnegans Wake*, de James Joyce, en que se dice: «Three quarks for Muster Mark».

Para confirmar las propiedades conocidas de los bariones, esos tres quarks diferentes deberían tener propiedades específicas. Entre ellas, la más sorprendente era la carga eléctrica fraccionaria. A este respecto, todas las partículas conocidas poseían una de las siguientes cualidades: o carecían de carga eléctrica, o dicha carga era exactamente igual a la del electrón (o positrón), o igual a un múltiplo exacto del electrón (o positrón). Dicho de otra forma: las cargas conocidas eran 0, + 1, 1, +2, 2, etc. Sin embargo, un quark (el «quark *p*») tenía una carga de +2/3, mientras que la carga de los otros dos (el «quark *n*» y el «quark lambda») era de,

1/3. Los quarks *n* y lambda se distinguían entre sí por algo denominado «número de rareza». Mientras el quark *n* (y el *p*) tenía un número de rareza 0, el del quark lambda era, 1.

Cada quark tenía su «antiquark». Había un antiquark *p*, con una carga de, 2/3 y un número de rareza 0; el antiquark *n*, con una carga de +1/3 y un número de rareza 0; y el antiquark lambda, con una carga de + 1/3 y un número de rareza +1.

Ahora bien, se puede imaginar un protón integrado por dos quarks *p* y un quark *n*, mientras que, por otra parte dos quarks *n* y un quark *p* formarían un neutrón (por lo cual añadimos a los quarks los sufijos *p* y *n*). Una partícula lambda está constituida por un quark *p*, un quark *n* y un quark lambda (de aquí el sufijo lambda), una partícula omega-minus está compuesta por tres quarks lambda, etc. Incluso se pueden combinar los quarks por parejas para formar diferentes mesones. No obstante, la cuestión consiste en saber hasta qué punto convienen matemáticamente los quarks. ¿Existen en realidad? Es decir, podemos admitir que un dólar está compuesto por cuatro cuartos; pero, ¿acaso significa esto que haya cuatro cuartos metálicos en un billete de dólar? Una forma de esclarecer tales incógnitas podría consistir en golpear con tal energía un protón, neutrón o cualquier otra partícula, que quedara desintegrado en sus quarks constitutivos. Por desgracia, las fuerzas aglutinantes que mantienen unidos a los quarks son muy superiores a las que unen a los bariones (de la misma forma que éstas superan ampliamente a las de los átomos), y por ahora no se posee la energía suficiente para desintegrar el barión. Ciertas partículas del rayo cósmico poseen sobrada energía para hacerlo (si se pudiera hacer), pero aunque se tengan ya noticias sobre algunas partículas semejantes a los quarks y presentes en los productos del rayo cósmico, esto no se ha aceptado aún generalmente.

A la hora de escribir estas líneas, la hipótesis del quark puede considerarse como una suposición interesante, pero sólo especulativa.

Los mesones K y los hiperones introdujeron a los físicos en un cuarto campo de fuerza cuyos rasgos característicos lo diferenciaban de los tres ya conocidos: gravitatorio, electromagnético y nuclear.

De estos tres, la fuerza nuclear es, con mucho, la más poderosa, aunque actúa sólo a distancias extremadamente cortas. Mientras que las fuerzas electromagnética y

gravitatoria son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia, las fuerzas nucleares decaen tan rápidamente con la distancia, que la atracción entre dos nucleones queda reducida casi a cero cuando están separados por una distancia superior a su propio diámetro. (Es como si la gravitación terrestre se extinguiera prácticamente a unos 6.500 km de la superficie.) En consecuencia, la interacción entre partículas sometidas a la influencia de fuerzas nucleares debe producirse con gran celeridad.

Este ejemplo es lo que denominan los físicos «interacción fuerte». Los bariones y mesones sometidos a interacciones fuertes se denominan, en conjunto, «hadrones» (de la voz griega que significa «volumen»). La «interacción débil» requiere bastante más tiempo. La teoría de semejantes interacciones fue elaborada por Fermi en 1934. Como ejemplo de semejante interacción podemos citar la designación de un mesón K o un hiperón. Ésta se produce más o menos en diez mil millonésimas de segundo, lo cual, aunque puede parecernos una brevedad inconcebible, es un intervalo muy largo comparado con el tiempo que necesitan un mesón pi y un protón para actuar entre sí. En realidad; mil millones de millones de veces más largo de lo que habían esperado los físicos, considerando la velocidad de casi todas las interacciones nucleares

Los científicos llegaron a esta conclusión: las «interacciones débiles» se hallan bajo el gobierno de fuerzas mucho más débiles que las nucleares. Por consiguiente, decidieron denominar «partículas raras» a aquellas que se desintegraban como resultado de las interacciones débiles. Primero se aplicó este nombre a los mesones K y a los hiperones.

Gell-Mann asignó incluso a diversas partículas de los llamados «números de rareza», distribuyendo los números de tal forma que la rareza subsistía en todas las interacciones de partículas. Esto significa que el número neto de rareza es el mismo antes y después.

En este cuarto tipo de interacción mediaría también una partícula intercambiable. Las poderosas interacciones gravitatorias y electromagnéticas tienen como propios el gravitón, el fotón y el pion: las interacciones débiles deben de tener algo denominado «partícula W». Se llama también «bosón intermedio», tanto porque coincide con las estadísticas de Bose-Einstein, como porque debe de tener un índice intermedio de decadencia. Hasta ahora no se ha detectado dicha partícula W.

Los físicos nucleares manipulan hoy doce leyes de conservación más o menos. Algunas son leyes ya familiares de la Física decimonónica: conservación de la energía, conservación del momento, conservación del momento angular y conservación de la carga eléctrica. En cambio, otras leyes de conservación resultan menos familiares: conservación de la rareza, conservación del número barión, conservación del spin isotópico, etc.

Las interacciones fuertes parecen seguir todas estas leyes de conservación. Hacia principios de la década de 1950, los físicos dieron por supuesto que tales leyes eran universales e irrevocables. Pero no lo son, como se vio después. En el caso de interacciones débiles, se han violado algunas leyes de conservación.

#### **Partículas Subatómicas de Larga Vida<sup>4</sup>**

---

<sup>4</sup> Tomado de una tabla de The World of Elementary Particles, de K. W. Ford. Reproducida por cortesía de «Blaisdell Publishing Company», perteneciente a «Ginn & Company».

ANTIPARTÍCULA	NÚMERO DE PARTICULAS DISTINTAS	VIDA PROMEDIO (SEGUNDOS)	FORMA TÍPICA DE DECADENCIA
LA MISMA PARTICULA	1	INFINITA	—
LA MISMA PARTICULA	1	INFINITA	—
$\bar{e}$	2	INFINITA	—
$e^+ \text{ (POSITRÓN)}$	2	INFINITA	—
$\bar{\nu}_e$	2	INFINITA	—
$\mu^+$	2	$2.212 \times 10^{-4}$	$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_e$
$\pi^+$ $\pi^0$ $\pi^-$ LAS MISMAS PARTICULAS	3	$2.55 \times 10^{-8}$ $2.55 \times 10^{-4}$ $1.9 \times 10^{-16}$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_e$ $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_e$ $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$
$K^+$ $K^0$ $K^-$	4	$1.22 \times 10^{-8}$ $1.00 \times 10^{-19}$ and $6 \times 10^{-8}$	$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
$\bar{p}$ (NEGATIVA) $\bar{n}$ $\bar{\Lambda}^0$	4	INFINITA $10^{13}$	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$
$\bar{\Sigma}^+$ (NEGATIVA) $\bar{\Sigma}^0$ (POSITIVA) $\bar{\Sigma}^-$	6	$2.51 \times 10^{-10}$ $8.1 \times 10^{-11}$ $1.6 \times 10^{-10}$ Alrededor de $10^{-10}$	$\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^0$ $\Sigma^0 \rightarrow n + \pi^-$ $\Sigma^- \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$
$\bar{\Xi}^0$ (POSITIVA) $\bar{\Xi}^-$	4	$1.3 \times 10^{-10}$ Alrededor de $10^{-10}$	$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$ $\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
	33		

La ley de conservación que sufrió mayor quebranto fue la «conservación de paridad». La paridad es una propiedad estrechamente matemática que no podemos describir en términos concretos; bástenos decir que la misma implica una función matemática relacionada con las ondas características de una partícula y su posición

en el espacio. La paridad tiene dos valores posibles: «impares» y «pares». Tengamos presente esto: la clave de todo radica en que se ha conceptuado la paridad como una propiedad básica que, a semejanza de la energía o el momento, sigue las leyes de conservación, es decir, que en cualquier reacción o cambio se retiene la paridad. Así, pues, cuando las partículas emprenden interacciones para formar nuevas partículas, la paridad debe de mantener el equilibrio en ambos miembros de la ecuación, así se creía, tal como lo hacen los números de masa, o los números atómicos, o el momento angular.

Ilustremos este punto. Si una partícula de paridad impar y otra de paridad par emprenden una interacción para formar dos partículas más, una de estas partículas debe tener paridad impar, y la otra, par. Si dos partículas de paridad impar forman dos nuevas partículas, éstas deben ser, a la vez, impares o pares, y, a la inversa, si una partícula de paridad par se desintegra para formar dos partículas, ambas deben tener paridad par o impar. Si forma tres partículas, las tres tendrán paridad par, o bien una tendrá paridad par, y las otras dos, impar. (El lector verá esto con más claridad si considera que los números pares e impares siguen reglas similares. Por ejemplo, un número par sólo puede ser la suma de dos números pares o de dos impares, pero nunca de un número par y otro impar.) Esto es lo que significa «conservación de paridad».

Las complicaciones empezaron cuando se descubrió que el mesón K se desintegraba, a veces, en dos mesones pi (cuyo resultado era la paridad par, puesto que el mesón pi tiene paridad impar), mientras que otras veces daba origen a tres mesones pi (de lo cual resultaba una paridad impar). Los físicos dedujeron que había dos tipos de mesones K: uno, de paridad par, y otro, de paridad impar, que fueron denominados, respectivamente, «mesón theta» y «mesón tau».

Ahora bien, aparte el resultado de la paridad, ambos mesones eran idénticos: la misma masa, la misma carga, la misma estabilidad, todo lo mismo. Costaba mucho creer que hubiese dos partículas que tuvieran exactamente las mismas propiedades. ¿No serían ambas la misma partícula, y el hecho de considerarlas distintas se debería a que hubiese algo erróneo en la idea de la conservación de la paridad? Precisamente hicieron esta sugerencia en 1956, dos jóvenes físicos chinos que trabajaban en los Estados Unidos: Tsung Dao Lee y Chen Ning Yang, los cuales

adujeron que, si bien la conservación de la paridad se mantenía en las interacciones fuertes, quizá perdiera su vigencia en las débiles, tales como la decadencia de los mesones K.

Al analizar matemáticamente dicha posibilidad, les pareció que si quedaba anulada la conservación de la paridad, las partículas afectadas en interacciones débiles deberían mostrar «identificación manual», lo cual sugirió por primera vez el físico húngaro Eugene Wigner. Permítaseme explicar esto.

Nuestras manos están opuestas. Se puede considerar la una como imagen virtual de la otra; en un espejo, la derecha parece la izquierda. Si todas las manos fueran absolutamente simétricas, la imagen virtual no diferiría de la real y no habría que hacer la distinción de mano «derecha» y mano «izquierda». Pues bien, apliquemos esto a un grupo de partículas que emitan electrones. Si los electrones se dispersan uniformemente en todas direcciones, la partícula de referencia no mostrará «identificación manual». Pero si casi todos ellos tienden a seguir una dirección determinada, digamos hacia arriba y no hacia abajo, la partícula será asimétrica, mostrará «identificación manual». Si viéramos las emisiones en un espejo, la dirección predominante aparecería invertida.



*Imágenes asimétrica y simétrica de las manos tomando como referencia un espejo.*

Por tanto, fue preciso observar una serie de partículas que emitieran electrones en una interacción débil (por ejemplo, unas partículas que se debilitan por la emisión beta), para comprobar si los electrones escapaban en una determinada dirección. Para realizar este experimento, Lee y Yang solicitaron la ayuda de una doctora en Física experimental, de la Universidad de Columbia: Chien-Shiung Wu.

La doctora hizo los preparativos para establecer las condiciones requeridas. Todos los átomos emisores de electrones deberían estar alineados en la misma dirección, si se quería detectar un sentido uniforme de emisión. Se hizo así por medio de un campo magnético, y se mantuvo el material a una temperatura cercana al cero absoluto.

Al cabo de cuarenta y ocho horas, el experimento dio su respuesta. Sin duda alguna, los electrones habían sido emitidos de forma asimétrica. La conservación de la paridad no se cumplía en las interacciones débiles. El «mesón theta» y el «mesón

tau» eran una misma partícula y se desintegran a veces con la paridad par y, en ocasiones, con la impar. Nuevos experimentadores confirmaron el fracaso de la paridad en este sentido. Los citados físicos, Lee y Yang, recibieron el premio Nobel de Física en 1957.

Si la simetría falla en las interacciones débiles, quizá lo haga también en otras circunstancias. Al fin y al cabo, el Universo, como un todo, puede ser diestro o zurdo. Como alternativa; puede haber dos universos: uno zurdo, y otro, diestro; uno, compuesto de materia, y otro, de antimateria.

Los físicos miran hoy con nuevo escepticismo las leyes de conservación en general. A semejanza de la paridad, cualquiera de ellas podría ser aplicable en ciertas condiciones y no en otras.

Una vez comprobado este fallo, se combinó la paridad con la «conjugación de carga», otra propiedad matemática asignada a las partículas subatómicas, que definía su estado como partículas o antipartículas, pues se creyó que podían conservarse juntas. Se agregó también otra simetría, la cual implicaba lo siguiente: La ley que rige los acontecimientos subatómicos es siempre la misma, tanto si el tiempo marcha hacia delante como hacia atrás. El conjunto se podría denominar «conservación CPT». Sin embargo, en 1964 se descubrió que las reacciones nucleares violan esa conservación CPT. Ello afecta a la «inversión del tiempo». Esto significa que puede uno distinguir entre el tiempo que marcha hacia delante (según la escala subatómica) y el que marcha hacia atrás, lo cual es imposible, a juicio de ciertos físicos. Para soslayar tal dilema, se abogó por la probable existencia de una quinta fuerza, más débil incluso que la gravitación. Sin embargo, esa quinta fuerza debería producir ciertos efectos perceptibles. En 1965 se buscaron dichos efectos y no se encontraron. Los físicos se quedaron con su dilema del tiempo. Pero no hay razón para desesperar. Tales problemas parecen conducir siempre, cuando llega el momento, a un conocimiento nuevo y cada vez más profundo del Universo.

### **En el Interior del Núcleo**

Ahora que tanto se ha aprendido sobre la constitución general y la naturaleza del núcleo, existe una gran curiosidad por saber cuál es su estructura y, particularmente, su sutil estructura interna. Ante todo, ¿qué forma tiene? Porque al

ser un cuerpo tan pequeño, tan repleto de neutrones y protones, los físicos suponen, lógicamente, que debe ser esférica. A juzgar por los finos detalles observados en el espectro del átomo, muchos núcleos tienen una distribución esferoidal de la carga. Y los que no la tienen se comportan como si poseyeran dos pares de polos magnéticos; se dice que tales núcleos tienen «momentos cuadripolares». Pero su desviación de la forma esférica no es muy considerable. El caso más extremo lo representa el núcleo de los lantánidos, en el que la distribución de cargas tiene cierto parecido con un esferoide alargado por los polos (en otras palabras, como un balón de rugby). Pero aún en este caso, el eje mayor es un 20 % más largo que el menor.

Respecto a la estructura interna del núcleo, el modelo más simple lo representa como un núcleo compacto de partículas, muy parecido a una gota líquida, donde las partículas (moléculas) están arracimadas con muy poco espacio entre sí. La densidad es virtualmente uniforme y los límites periféricos son muy manifiestos.

Allá por 1936, Niels Bohr esquematizó detalladamente por primera vez este «modelo de gota líquida», lo cual permite entrever una posible explicación de la absorción y emisión de partículas por ciertos núcleos. Cuando una partícula penetra en el núcleo, cabe suponer que distribuye su energía cinética entre todas las partículas apiñadas, de tal modo que ninguna partícula recibe enseguida la suficiente energía para desprenderse. Transcurrido, como máximo, una cuatrillonésima de segundo, cuando ya ha habido tiempo para que se produzcan miles de millones de colisiones accidentales, alguna partícula acumulará la energía suficiente para volar fuera del núcleo.

Dicho modelo podría explicar también la emisión de partículas alfa por los núcleos pesados, es decir, los elementos inestables con números atómicos superiores a 83. En estos grandes núcleos, las fuerzas nucleares de corto alcance tal vez no puedan ejercer su acción sobre todo el núcleo; de aquí que se produzca la repulsión entre partículas positivas, y, como resultado, ciertas porciones del núcleo en forma de partículas alfa con dos protones y dos neutrones (combinación muy estable), se desprenderán espontáneamente de la superficie nuclear. Cuando el núcleo se reduce a un tamaño tal que, la fuerza nuclear predomina sobre la repulsión, ese núcleo adquirirá estabilidad.

Este modelo de «gota líquida» sugiere otra forma de inestabilidad nuclear. Cuando una gota grande de líquido suspendida en otro líquido se deja arrastrar por corrientes del fluido circundante, tiende a desintegrarse en esferas más pequeñas y, a menudo, semiesferas de dimensiones más o menos similares. Creemos que la fisión del uranio sigue un proceso casi análogo. Cuando un neutrón golpea al núcleo fisionable, éste se bambolea, por decirlo así, y tal vez se alargue, para adoptar la forma de un halterio (como haría una gota de líquido). En tal caso, las fuerzas nucleares de atracción no alcanzarán desde un extremo del halterio al otro, y entonces la fuerza repelente separará las dos porciones. Bohr dio esta explicación cuando se descubrió la fisión nuclear.

Además del uranio 235, otros núcleos podrían ser sometidos a la fisión (ya se han hecho pruebas positivas) si recibiesen las suficientes aportaciones de energía. En realidad, si un núcleo es lo bastante grande como para dejar que actúen las fuerzas repelentes, debería ceder a la fisión, aún cuando no hubiese entrada de energía. (Esto es como decir que el núcleo semejante a la gota está siempre vibrando y bamboleándose, de modo que algunas veces la vibración es lo bastante intensa como para formar el halterio y occasionar la rotura.)

En 1940, dos físicos rusos, G. N. Flerov y K. A. Petriak, descubrieron que el isótopo más pesado del uranio, el U-238, se somete espontáneamente a la fisión sin intervención de partícula alguna. El uranio exterioriza principalmente su inestabilidad emitiendo partículas alfa, pero en 0,5 kg de uranio se producen cuatro fisiones espontáneas por segundo, mientras que ocho millones de núcleos aproximadamente emiten partículas alfa.

La fisión espontánea se produce también en el uranio 235, el protactinio y el torio, y, con más frecuencia, en los elementos transuranianos. Al agrandarse progresivamente el núcleo, aumentan las probabilidades de una fisión espontánea. En los elementos más pesados conocidos, einstenio, fermio y mendelevio, éste es el método de desintegración, muy superior a la emisión de partículas alfa.

Otro modelo popular del núcleo lo asemeja al átomo en su conjunto, coloca los nucleones dentro del núcleo, y los electrones, en tomo a éste, como si ocuparan celdas y subceldas e influyendo unos sobre otros muy ligeramente. Este modelo se llama «de celdas».

¿Cómo puede haber espacio para las células independientes de los nucleones en tan minúsculo y compacto núcleo? No lo sabemos, pero las pruebas indican que allí queda algún «espacio vacío». Por ejemplo, en un átomo mesónico puede girar durante algún tiempo a lo largo de una órbita dentro del núcleo. Y Robert Hofstadter ha descubierto que el núcleo consiste en un «corazón» muy denso, rodeado por una «piel», en la que decrece gradualmente la densidad. El grosor de dicha piel equivale, más o menos, a la mitad del radio nuclear, de modo que representa siete octavas partes del volumen total.

Por analogía con la situación en las celdas electrónicas del átomo, cabría suponer que los núcleos con celdas nucleónicas llenas deberían ser más estables que aquellos cuyas celdas no estuviesen llenas. Según la teoría más elemental, en este caso, los núcleos con 2, 8, 20, 40, 70 o 112 protones o neutrones serían singularmente estables. Sin embargo, esto no coincidió con las observaciones hechas. La física germano americana Maria Goeppert-Mayer observó particularmente el giro de los protones y neutrones, y demostró cómo podría afectar ello a toda la situación. Resultó que los núcleos con 2, 8, 20, 50, 82 ó 126 protones o neutrones deberían ser especialmente estables, y las observaciones así lo confirmaron. Los núcleos con 28 o 40 protones o neutrones tendrían una estabilidad intermedia. Todos los demás serían menos estables o no lo serían en absoluto. Algunos han llamado «números mágicos» a estos «números envueltos en la celda» (ocasionalmente se ha hecho referencia al 28 o 40 con la denominación de «números semimágicos»).

Entre los núcleos de numero mágico figuran el helio 4 (2 protones y 2 neutrones), el oxígeno 16 (8 protones y 8 neutrones) y el calcio 40 (20 protones y 20 neutrones), todos los cuales son excepcionalmente estables y abundan en el Universo más que cualquier otro núcleo de tamaño similar.

En cuanto a los números mágicos superiores, el estaño tiene 10 isótopos estables, cada uno, con 50 protones, y el plomo, 4, cada uno con 82 protones. Hay 5 isótopos estables (cada cual, de un elemento distinto) con 50 neutrones por unidad, y 7 isótopos estables, con 82 neutrones por unidad. En general, las predicciones detalladas de la teoría sobre la celda nuclear dan mejor resultado junto a los números mágicos. Entremedias (como ocurre con los actínidos y los lantánidos), el

ajuste es bastante deficiente. Pero en las regiones intermedias, los núcleos se distancian de lo esferoidal (la teoría de las celdas presupone una forma esférica), para hacerse casi todos sensiblemente elipsoidales. En 1963 se otorgó el premio Nobel de Física a Goeppert-Mayer y otros dos científicos: Wigner y el físico alemán J. Hans Daniel Jensen, quienes contribuyeron también a la concepción y establecimiento de esta teoría.

Generalmente, cuanto más complejos son los núcleos, más rara es su presencia en el Universo, o su estabilidad, o ambas cosas. Los isótopos estables más complejos son el plomo 208 y el bismuto 209, cada uno con el número mágico de 126 neutrones, y el plomo, por añadidura, con otro número mágico: 82 protones. Aparte esto, todos los nucleidos son inestables, y, por lo general, sus vidas medias se acortan a medida que aumenta el numero de protones, neutrones o ambos. Pero este acortamiento no es una condición indefectible. El torio 232 tiene una vida media de 14.000 millones de años y es cualquier cosa menos estable. Incluso el californio 251 tiene una vida media de varios siglos.

Los nucleidos muy complejos, es decir, los mucho más complejos que los ya observados o sintetizados, ¿podrían tener la suficiente estabilidad para permitir la formación en cantidades relativamente grandes? Al fin y al cabo, todavía hay números mágicos más allá del 126, y ello podría dar como resultado ciertos átomos supercomplejos relativamente estables. Algunos cálculos han demostrado que, particularmente cierto elemento con 114 protones y 184 neutrones, podría tener una vida media asombrosamente prolongada; los físicos, que han alcanzado el elemento número 105, están investigando nuevos medios para conseguir el isótopo del elemento 114, que, químicamente, debería asemejarse al plomo.

## Capítulo 7

### LAS ONDAS

#### Luz

Entre todos los felices atributos de la Naturaleza, el que probablemente aprecie más el hombre es la luz. Según el Génesis, las primeras palabras de Dios fueron: «Haya luz», y creó el Sol y la Luna: «Hizo Dios los dos grandes luminares, el mayor para presidir al día, y el menor para presidir a la noche.» Los eruditos de los tiempos antiguo y medieval no llegaron a saber nada sobre la naturaleza de la luz. Sugirieron, especulativamente, que podría consistir en partículas emitidas por el objeto radiante o, tal vez, por el propio ojo. Los únicos hechos que pudieron establecer acerca de la cuestión fueron éstos: la luz sigue una trayectoria recta, se refleja en un espejo con un ángulo igual al formado por el rayo incidente, y el rayo luminoso se quiebra («refracta») cuando pasa del aire al interior de un vaso, un depósito de agua o cualquier otra sustancia transparente.

Los primeros experimentos importantes sobre la naturaleza de la luz los realizó Isaac Newton en 1666. Este investigador hizo entrar un rayo de luz solar en una habitación oscurecida; agujereó la persiana para que el rayo cayera oblicuamente sobre la cara de un prisma cristalino triangular. El rayo se dobló al penetrar en el vidrio, y siguió doblándose en la misma dirección cuando emergió por la segunda cara del prisma. Newton captó el rayo emergente en una pantalla blanca, para comprobar el efecto de la doble refracción. Entonces descubrió que en vez de formar una mancha de luz blanca, el rayo se extendía para constituir una banda de colores: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul y violado, por este orden.

Newton dedujo de ello que la luz blanca corriente era una mezcla de varias luces que excitaban por separado nuestros ojos para producir las diversas sensaciones de colores. La amplia banda de sus componentes se denominó *spectrum* (palabra latina que significa «espectro»).

Newton llegó a la conclusión que la luz se componía de diminutas partículas («corpúsculos»), que viajaban a enormes velocidades. Así se explicaba que la luz se moviera en línea recta y proyectara sombras recortadas. Asimismo, se reflejaba en un espejo porque las partículas rebocaban contra la superficie, y se doblaba al

penetrar en un medio refractante (tal como el agua o el cristal), porque las partículas se movían más aprisa en ese medio que en el aire.

Sin embargo, se plantearon algunas inquietantes cuestiones. ¿Por qué se refractaban las partículas de luz verde más que las de luz amarilla? ¿Cómo se explicaba que dos rayos de luz se cruzaran sin perturbarse mutuamente, es decir, sin que se produjeran colisiones entre sus partículas?

En 1678, el físico holandés Christian Huygens (un científico polifacético que había construido el primer reloj de péndulo y realizado importantes trabajos astronómicos) propuso una teoría opuesta: la que la luz se componía de minúsculas ondas. Y si sus componentes fueran ondas, no sería difícil explicar las diversas refracciones de los diferentes tipos de luz a través de un medio refractante, siempre y cuando se aceptara que la luz se movía más despacio en ese medio refractante que en el aire.

La cantidad de refracción variaría con la longitud de las ondas: cuanto más corta fuese tal longitud, tanto mayor sería la refracción. Ello significaba que la luz violada (la más sensible a este fenómeno) debía de tener una longitud de onda más corta que la luz azul, ésta, más corta que la verde, y así sucesivamente. Lo que permitía al ojo distinguir los colores eran esas diferencias entre longitudes de onda. Y, como es natural, si la luz estaba integrada por ondas, dos rayos podrían cruzarse sin dificultad alguna. (En definitiva, las ondas sonoras y las del agua se cruzaban continuamente sin perder sus respectivas identidades.)

Pero la teoría de Huygens sobre las ondas tampoco fue muy satisfactoria. No explicaba por qué se movían en línea recta los rayos luminosos: ni por qué proyectaban sombras recortadas: ni aclaraba por qué se interponían los obstáculos sólidos en el camino de las ondas luminosas, mientras que dejaban pasar las ondas sonoras y la del agua. Por añadidura, se objetaba que si la luz consistía en ondas, ¿cómo podía viajar por el vacío, ya que cruzaba el espacio desde el Sol y las estrellas? ¿Cuál era esa mecánica ondulatoria?

Aproximadamente durante un siglo contendieron entre sí estas dos teorías. La «teoría corpuscular» de Newton, fue, con mucho, la más popular, en parte, porque la respaldó el famoso nombre de su autor. Pero hacia 1801, un físico y médico inglés, Thomas Young, llevó a cabo un experimento que arrastró la opinión pública

al campo opuesto. Proyectó un fino rayo luminoso sobre una pantalla, haciéndolo pasar antes por dos orificios casi juntos. Si la luz estuviera compuesta por partículas, cuando los dos rayos emergieran de ambos orificios, formarían presuntamente en la pantalla una región más luminosa donde se superpusieran, y, regiones menos brillantes, donde no se diera tal superposición. Pero no fue esto lo que descubrió Young. La pantalla mostró una serie de bandas luminosas, separadas entre sí por bandas oscuras. Pareció incluso que, en esos intervalos de sombra, la luz de ambos rayos contribuía a intensificar la oscuridad.

Sería fácil explicarlo mediante la teoría ondulatoria. La banda luminosa representaba el refuerzo prestado por las ondas de un rayo a las ondas del otro. Dicho de otra forma: Entraban «en fase» dos trenes de ondas, es decir, ambos nodos, al unirse, se fortalecían el uno al otro. Por otra parte, las bandas oscuras representaban puntos en que las ondas estaban «desfasadas» porque el vientre de una neutralizaba el nodo de la otra. En vez de aunar sus fuerzas, las ondas se interferían mutuamente, reduciendo la energía luminosa neta a las proximidades del punto cero.

Considerando la anchura de las bandas y la distancia entre los dos orificios por los que surgen ambos rayos, se pudo calcular la longitud de las ondas luminosas, por ejemplo, de la luz roja o la violeta o los colores intermedios. Las longitudes de onda resultaron ser muy pequeñas. Así, la de la luz roja era de unos 0,000075 cm. (Hoy se expresan las longitudes de las ondas luminosas mediante una unidad muy práctica ideada por Ångström. Esta unidad, denominada, en honor a su autor, angström, abreviatura, Å, es la cienmillonésima parte de 1 cm. Así, pues, la longitud de onda de la luz roja equivale más o menos a 7.500 Å, y la de la luz violeta, a 3.900 Å, mientras que las de los colores visibles en el espectro oscilan entre ambas cifras.)

La cortedad de estas ondas es muy importante. La razón que las ondas luminosas se desplacen en línea recta y proyecten sombras recortadas se debe a que todas son incomparablemente más pequeñas que cualquier objeto; pueden contornear un obstáculo sólo si éste no es mucho mayor que la longitud de onda. Hasta las bacterias, por ejemplo, tienen un volumen muy superior al de una onda luminosa y, por tanto, la luz puede definir claramente sus contornos bajo el microscopio. Sólo

los objetos cuyas dimensiones se asemejan a la longitud de la onda luminosa (por ejemplo, los virus y otras partículas submicroscópicas) son lo suficientemente pequeños como para que puedan ser contorneados por las ondas luminosas.

Un físico francés, Augustin-Jean Fresnel, fue quien demostró por vez primera, en 1818, que si un objeto es lo suficientemente pequeño, la onda luminosa lo contorneará sin dificultad. En tal caso, la luz determina el llamado fenómeno de «difracción». Por ejemplo, las finísimas líneas paralelas de una «reja de difracción» actúan como una serie de minúsculos obstáculos, que se refuerzan entre sí. Puesto que la magnitud de la difracción va asociada a la longitud de onda; se produce el espectro. A la inversa, se puede calcular la longitud de onda midiendo la difracción de cualquier color o porción del espectro, así como la separación de las marcas sobre el cristal.

Fraunhofer exploró dicha reja de difracción con objeto de averiguar sus finalidades prácticas, progreso que suele olvidarse, pues queda eclipsado por su descubrimiento más famoso: las rayas espectrales. El físico americano Henry Augustus Rowland ideó la reja cóncava y desarrolló técnicas para regularlas de acuerdo con 20.000 líneas por pulgada. Ello hizo posible la sustitución del prisma por el espectroscopio. Ante tales hallazgos experimentales, más el desarrollo metódico y matemático del movimiento ondulatorio, debido a Fresnel, pareció que la teoría ondulatoria de la luz había arraigado definitivamente, desplazando y relegando para siempre la teoría corpuscular.

No sólo se aceptó la existencia de ondas luminosas, sino que también se midió su longitud con una precisión cada vez mayor. Hacia 1827, el físico francés Jacques Babinet sugirió que se empleara la longitud de onda luminosa, una cantidad física inalterable- como unidad para medir tales longitudes, en vez de las muy diversas unidades ideadas y empleadas por el hombre. Sin embargo, tal sugerencia no se llevó a la práctica hasta 1880 cuando el físico germano americano Albert Abraham Michelson inventó un instrumento, denominado «interferómetro», que podía medir las longitudes de ondas luminosas con una exactitud sin precedentes. En 1893, Michelson midió la onda de la raya roja en el espectro del cadmio y determinó que su longitud era de 1/1.553.164 m.

Pero la incertidumbre reapareció al descubrirse que los elementos estaban

compuestos por isótopos diferentes, cada uno de los cuales aportaba una raya cuya longitud de onda difería ligeramente de las restantes. En la década de 1930 se midieron las rayas del criptón 86. Como quiera que este isótopo era gaseoso, se podía abordar con bajas temperaturas, para frenar el movimiento atómico y reducir el consecutivo engrosamiento de la raya.

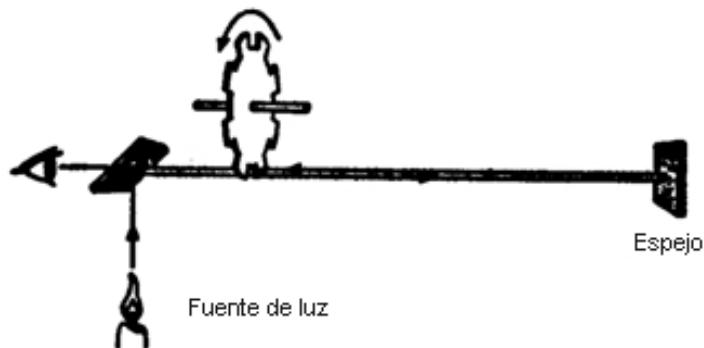
En 1960, el Comité Internacional de Pesos y Medidas adoptó la raya del criptón 86 como unidad fundamental de longitud. Entonces se restableció la longitud del metro como 1.650.763,73 veces la longitud de onda de dicha raya espectral. Ello aumentó mil veces la precisión de las medidas de longitud. Hasta entonces se había medido el antiguo metro patrón con un margen de error equivalente a una millonésima, mientras que en lo sucesivo se pudo medir la longitud de onda con un margen de error equivalente a una mil millonésima.

Evidentemente, la luz se desplaza a enormes velocidades. Si apagamos una luz, todo queda a oscuras instantáneamente. No se puede decir lo mismo del sonido, por ejemplo. Si contemplamos a un hombre que está partiendo leña en un lugar distante, sólo oiremos los golpes momentos después que caiga el hacha. Así, pues, el sonido tarda cierto tiempo en llegar a nuestros oídos. En realidad es fácil medir la velocidad de su desplazamiento: unos 1.206 km/h en el aire y a nivel del mar.

Galileo fue el primero en intentar medir la velocidad de la luz. Se colocó en determinado lugar de una colina, mientras su ayudante se situaba en otro; luego sacó una linterna encendida; tan pronto como su ayudante vio la luz, hizo una señal con otra linterna. Galileo repitió el experimento a distancias cada vez mayores, suponiendo que el tiempo requerido por su ayudante para responder mantendría una uniformidad constante, por lo cual, el intervalo entre la señal de su propia linterna y la de su ayudante representaría el tiempo empleado por la luz para recorrer cada distancia. Aunque la idea era lógica, la luz viajaba demasiado aprisa *como* para que Galileo pudiera percibir las sutiles diferencias con un método tan rudimentario.

En 1676, el astrónomo danés Olaus Roemer logró cronometrar la velocidad de la luz a escala de distancias astronómicas. Estudiando los eclipses de Júpiter en sus cuatro grandes satélites, Roemer observó que el intervalo entre eclipses consecutivos era más largo cuando la Tierra se alejaba de Júpiter, y más corto cuando se movía en

su órbita hacia dicho astro. Al parecer, la diferencia entre las duraciones del eclipse reflejaba la diferencia de distancias entre la Tierra y Júpiter. Y trataba, pues, de medir la distancia partiendo del tiempo empleado por la luz para trasladarse desde Júpiter hasta la Tierra. Calculando aproximadamente el tamaño de la órbita terrestre y observando la máxima discrepancia en las duraciones del eclipse que, según Roemer, representaba el tiempo que necesitaba la luz para atravesar el eje de la órbita terrestre, dicho astrónomo computó la velocidad de la luz. Su resultado, de 225.000 km/seg, parece excelente si se considera que fue el primer intento, y resultó lo bastante asombroso como para provocar la incredulidad de sus coetáneos.

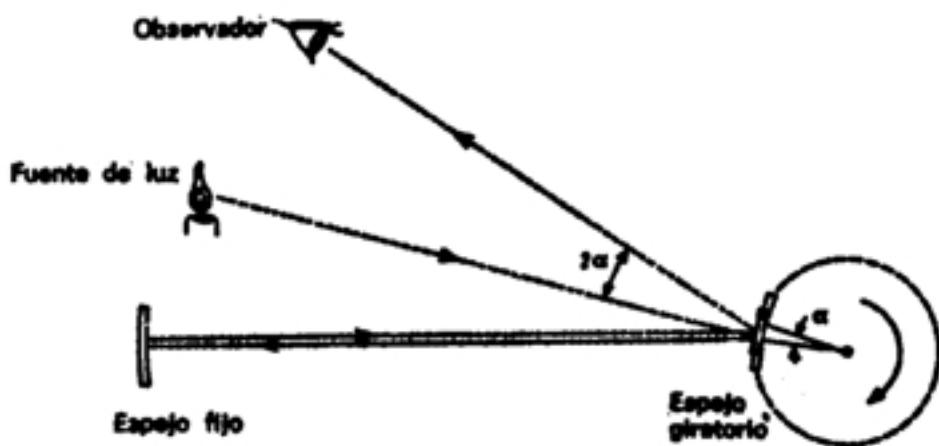


*Dispositivo de Fizeau para medir la velocidad de la luz. La luz reflejada por el espejo diagonal junto a la fuente luminosa pasa por una muesca de la rueda dentada giratoria hasta un espejo distante (a la derecha) donde se refleja para alcanzar el siguiente diente o la siguiente muesca.*

Sin embargo, medio siglo después se confirmaron los cálculos de Roemer en un campo totalmente distinto. Allá por 1728, el astrónomo británico James Bradley descubrió que las estrellas parecían cambiar de posición con los movimientos terrestres; y no por el paralaje, sino porque la traslación terrestre alrededor del Sol era una fracción mensurable, (aunque pequeña) de la velocidad de la luz. La analogía empleada usualmente es la de un hombre que camina con el paraguas abierto bajo un temporal. Aún cuando las gotas caigan verticalmente, el hombre debe inclinar hacia delante el paraguas, porque ha de abrirse paso entre las gotas. Cuanto más acelere su paso, tanto más deberá inclinar el paraguas. De manera semejante la Tierra avanza entre los ligeros rayos que caen desde las estrellas, y el astrónomo debe inclinar un poco su telescopio y hacerlo en varias direcciones, de

acuerdo con los cambios de la trayectoria terrestre. Mediante ese desvío aparente de los astros («aberración de la luz»), Bradley pudo evaluar la velocidad de la luz y calcularla con más precisión que Roemer.

A su debido tiempo, los científicos fueron obteniendo medidas más exactas aún, conforme se fue perfeccionando la idea original de Galileo. En 1849, el físico francés Armand-Hippolyte-Louis Fizeau ideó un artificio mediante el cual se proyectaba la luz sobre un espejo situado a 8 km de distancia, que devolvía el reflejo al observador.



*Método de Foucault. La rotación mayor o menor del espejo, sustituyendo a la rueda dentada de Fizeau- daba la velocidad de la luz.*

El tiempo empleado por la luz en su viaje de ida y vuelta no rebasó apenas la 1/20.000 de segundo, pero Fizeau logró medirlo colocando una rueda dentada giratoria en la trayectoria del rayo luminoso. Cuando dicha rueda giraba a cierta velocidad, regulada, la luz pasaba entre dos dientes y se proyectaba contra el siguiente, al ser devuelta por el espejo; así, Fizeau, colocado tras la rueda, no pudo verla. Entonces se dio más velocidad a la rueda, y el reflejo pasó por la siguiente muesca entre los dientes, sin intercepción alguna. De esta forma, regulando y midiendo la velocidad de la rueda giratoria. Fizeau pudo calcular el tiempo transcurrido y, por consiguiente, la velocidad a que se movía el rayo de luz.

Un año más tarde, Jean Foucault, quien realizaría poco después su experimento con los péndulos (véase capítulo III)- precisó más estas medidas empleando un espejo

giratorio en vez de una rueda dentada. Entonces se midió el tiempo transcurrido desviando ligeramente el ángulo de reflexión mediante el veloz espejo giratorio. Foucault obtuvo un valor de 300.883 km/seg para la velocidad de la luz en el aire. Por añadidura, el físico francés utilizó su método para determinar la velocidad de la luz a través de varios líquidos. Averiguó que era notablemente inferior a la alcanzada en el aire. Esto concordaba también con la teoría ondulatoria de Huygens. Michelson fue más preciso aún en sus medidas. Este autor, durante cuarenta años largos, a partir de 1879, fue aplicando el sistema Fizeau-Foucault cada vez con mayor refinamiento, para medir la velocidad de la luz. Cuando se creyó lo suficientemente informado, proyectó la luz a través del vacío, en vez de hacerlo a través del aire, pues éste la frena ligeramente, empleando para ello tuberías de acero cuya longitud era superior a 1,5 km. Según sus medidas, la velocidad de la luz en el vacío era de 299.730 km/seg. Demostraría también que todas las longitudes de ondas luminosas viajan a la misma velocidad en el vacío.

En 1963, medidas más precisas aún asignaron a la luz una velocidad de 299.727,2 km/seg. Una vez conocida con tan gran precisión dicha velocidad, la luz, o al menos ciertas formas de la misma- resultó aplicable para medir distancias.

Imaginemos una efímera vibración luminosa que se mueve hacia delante, tropieza con un obstáculo y se refleja hacia atrás, para volver al punto desde el que se fue emitida poco antes. Lo que se necesitaba era una forma ondulatoria de frecuencia lo suficientemente baja como para atravesar brumas, nieblas y nubes, pero lo bastante alta como para una reflexión eficaz. Ese alcance ideal se encontró en la microonda (onda ultracorta de radiodifusión), con longitudes que oscilan entre los 0,5 y los 100 cm. El tiempo transcurrido entre la emisión de esa vibración y el retorno del eco permitió calcular la distancia a que se hallaba el objeto reflector.

Algunos físicos utilizaron este principio para idear varios artificios, pero quien lo hizo definitivamente aplicable fue el físico escocés Robert Alexander Watson-Watt. En 1935 logró seguir el curso de un aeroplano aprovechando las reflexiones de microondas que éste le enviaba. Este sistema se denominó «radio detection and ranging» (radio localización), donde la palabra *range* significa «determinación de distancias». La frase se abrevió en la sigla «r.a.d.a.r.», o «radar». (Las palabras como ésta, construidas con las iniciales de una frase, se llaman «acrónimos». El

acrónimo se populariza cada vez más en el mundo moderno, especialmente por cuanto se refiere a la Ciencia y la Tecnología.)

El mundo se enteró de la existencia del radar cuando los ingleses empezaron a localizar los aviones nazis durante la batalla de Inglaterra, pese a la noche y la niebla. Así, pues, el radar merece, por lo menos, parte del crédito en esa victoria británica.

Después de la Segunda Guerra Mundial, el radar ha prestado múltiples servicios en la paz. Se ha empleado para localizar los puntos en que se generan las tormentas, y en este aspecto constituye un gran auxiliar del meteorólogo. Por otra parte, ha devuelto misteriosas reflexiones, llamadas «ángeles», que resultaron ser no mensajeros celestiales, sino bandadas de aves, y desde entonces se emplea también para estudiar las migraciones de éstas.

Y, según se describe en el capítulo II, las reflexiones de radar procedentes de Venus y Mercurio brindaron a los astrónomos nuevos conocimientos concernientes a la rotación de esos planetas y, con respecto a Venus, información acerca de la naturaleza de su superficie.

Pese a todas las evidencias que se han ido acumulando sobre la naturaleza ondulatoria de la luz, sigue en pie un interrogante que preocupa a los físicos. ¿Cómo se transmite la luz en el vacío? Otros tipos de ondas, por ejemplo, las sonoras, necesitan un medio material. (Desde esta plataforma de observación que es la Tierra, no podríamos oír jamás una explosión en la Luna o cualquier otro cuerpo celeste, por muy estremecedora que fuese, ya que las ondas sonoras no viajan a través del espacio cósmico.) Sin embargo, la luz atraviesa el vacío con más facilidad que la materia, y nos llega desde galaxias situadas a miles de millones de años luz. El concepto «acción a distancia» inquietó siempre a los científicos clásicos. Por ejemplo, Newton caviló mucho acerca de este problema. ¿Cómo actuará la fuerza de la gravedad en el espacio cósmico? Buscando una explicación plausible a esto, actualizó la idea de un «éter» que llenaba los cielos y se dijo que tal vez ese éter condujera la fuerza de la gravedad.

En su intento de explicar la traslación de ondas luminosas en el espacio, los físicos supusieron también que la luz se transmitía por medio del presunto éter, y entonces empezaron a hablar del «éter lumínico». Pero esta idea tropezó inmediatamente con

serias dificultades. Las ondas luminosas son transversales, es decir, se ondulan formando ángulo recto con la dirección de su trayectoria, como las olas de una superficie líquida; por tanto, contrastan con el movimiento «longitudinal» de las ondas sonoras. Ahora bien, la teoría física afirmaba que sólo un medio *sólido* puede transmitir las ondas transversales. (Las ondas transversales del agua se trasladan sobre la superficie líquida, un caso especial, pero no pueden penetrar en el cuerpo del líquido.) Por consiguiente, el éter debería ser sólido, no gaseoso ni líquido. Y no le bastaría con ser extremadamente rígido, pues para transmitir ondas a la enorme velocidad de la luz necesitaría ser mucho más rígido que el acero. Más aún, ese éter rígido debería saturar la materia ordinaria, no meramente el vacío espacial, sino los gases, el agua, el vidrio y toda sustancia transparente por la que pudiera viajar la luz.

Y, como colofón, ese material sólido, súper rígido, debería ser, al propio tiempo, maleable, para no interponerse en el movimiento ni siquiera del más ínfimo planetoide, ni entorpecer el más leve parpadeo.

Sin embargo, y pese a las dificultades planteadas por el concepto del éter, éste se mostró muy útil. Faraday, quien, aunque no tenía antecedentes matemáticos, poseía una admirable clarividencia- elaboró la noción de «líneas de fuerza», líneas a lo largo de las cuales un campo magnético desarrolla una potencia uniforme- y, al considerarlas como distorsiones elásticas del éter, las empleó para explicar el fenómeno magnético.

En la década de 1860, Clerk Maxwell, gran admirador de Faraday, se propuso elaborar el análisis matemático que respaldara esas líneas de fuerza. Para ello ideó un simple conjunto de cuatro ecuaciones, que describía casi todos los fenómenos referentes al magnetismo y la electricidad. Tales ecuaciones, dadas a conocer en 1864, demostraron no sólo la relación que existía entre los fenómenos de electricidad y magnetismo, sino también su carácter inseparable.

Allá donde existiese un campo eléctrico, debería haber un campo magnético, y viceversa. De hecho había sólo «un campo electromagnético». Por añadidura, y considerando los corolarios de dichas ecuaciones, Maxwell opinó que un campo eléctrico cambiante debería inducir un campo magnético cambiante, el cual, a su vez, induciría otro campo eléctrico cambiante, y así sucesivamente; ambos jugaban

al fin derecho, por así decirlo, y el campo se extendía en todas direcciones. El resultado era una radiación cuyas propiedades se asemejaban a las de las ondas. En suma, Maxwell predijo la existencia de la «radiación electromagnética» de frecuencias iguales a aquella en la que el campo electromagnético se acrecentaba y menguaba.

Maxwell calculó incluso la velocidad a que debería trasladarse esa onda electromagnética. Lo hizo tomando como base la relación de ciertos valores equivalentes en las ecuaciones, describiendo la fuerza tanto entre las cargas eléctricas como entre los polos magnéticos. Esta relación era exactamente igual a la velocidad de la luz, y Maxwell no quiso atribuirlo, en modo alguno, a una mera coincidencia. La luz era una radiación electromagnética, y junto a ella había otras radiaciones cuyas longitudes de onda eran mucho mayores o mucho menores que las de la luz ordinaria. Por otra parte, todas esas radiaciones concernían al éter.

Dicho sea entre paréntesis, las ecuaciones de Maxwell plantearon un problema que aún nos intriga. Parecían poner de relieve una simetría cabal entre los fenómenos de la electricidad y el magnetismo: lo que era cierto para el uno, debería serlo también para el otro. Sin embargo, parecían diferir en un aspecto fundamental. Había partículas que contenían una u otra de las cargas opuestas, positiva o negativa, pero no ambas. Por ejemplo, el electrón contenía sólo una carga eléctrica negativa, mientras que la del positrón era positiva e igualmente única. De forma análoga, ¿no habría también partículas sólo con un polo norte magnético, y otras que tendrían exclusivamente un polo sur magnético? Sin embargo, jamás se ha encontrado esa «unipolaridad magnética». Cada partícula incluida en un campo magnético ha tenido siempre polos magnéticos norte y sur. La teoría parece indicar que la separación de los elementos unipolares requeriría enormes energías, que sólo podrían estar a disposición de los rayos cósmicos. Sin embargo, la investigación hecha hasta ahora sobre los rayos cósmicos no ha revelado aún el menor vestigio en este sentido.

Pero volvamos a ese éter que, en el momento culminante de su poderío, encontró también su Waterloo como resultado de un experimento emprendido para comprobar una cuestión clásica y tan espinosa como la «acción a distancia»: concretamente, el problema del «movimiento absoluto».

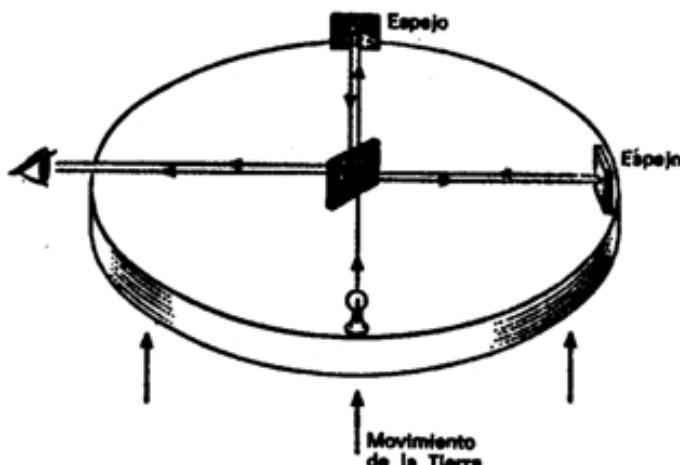
Durante el siglo XIX quedó ya bien claro que el Sol, la Tierra, las estrellas y, prácticamente todos los cuerpos del Universo, estaban en movimiento. ¿Dónde encontrar, pues un punto inamovible de referencia, un punto que estuviera en «reposo absoluto», para poder determinar el «movimiento absoluto», o sea, hallar el fundamento de los axiomas newtonianos? Quedaba una posibilidad. Newton había aducido que la propia trama del espacio (presuntamente, el éter) estaba en reposo, y, por tanto, se podía hablar de «espacio absoluto». Si el éter permanecía inmóvil, tal vez se podría especificar el «movimiento absoluto» de un objeto determinando su movimiento en relación con el éter.

Durante la década de 1880, Albert Michelson ideó un ingenioso esquema para hacer precisamente eso. Si la Tierra se movía a través de un éter inmóvil, razonó este científico, un rayo luminoso proyectado en la dirección de su movimiento, con la consiguiente reflexión, recorrería una distancia menor que otro proyectado en ángulo recto. Para realizar este experimento, Michelson inventó el «interferómetro», artificio dotado con un prisma doble que dejaba pasar hacia delante la mitad de un rayo luminoso y reflejaba la otra mitad en ángulo recto. Entonces, unos espejos reflejaban ambos rayos sobre un ocular en el punto de partida. Si un rayo recorría una distancia algo mayor que el otro, ambos llegaban desfasados y formaban bandas de interferencia. Este instrumento mide con gran precisión las diferencias de longitud: es tan sensible, que puede medir el crecimiento de una planta segundo a segundo y el diámetro de algunas estrellas que parecen, incluso vistas a través del mayor telescopio, puntos luminosos sin dimensión alguna.

Michelson se proponía apuntar el interferómetro en varias direcciones respecto al movimiento terrestre, para detectar el efecto del éter midiendo el desfase de los rayos disociados a su retorno.

En 1887, Michelson inició el experimento con ayuda del químico americano Edward Williams Morley. Colocando el instrumento sobre una losa que flotaba en mercurio para poderle dar cualquier orientación fácil y suavemente, los dos científicos proyectaron el rayo en diversas direcciones tomando como referencia el movimiento de la Tierra. Y no descubrieron diferencia alguna. Las bandas de interferencia se mantuvieron invariables, aunque ellos apuntaron el instrumento en todas direcciones y repitieron muchas veces el experimento. (Experimentos posteriores de

la misma índole, realizados con instrumentos más sensibles, han dado los mismos resultados negativos.)



*Interferómetro de Michelson. El espejo diagonal (centro) divide el rayo luminoso reflejando una mitad y dejando seguir a la otra su trayectoria recta. Si los dos espejos reflectores (a la derecha y al frente) están a distancias diferentes, los rayos luminosos reflejados llegarán desfasados hasta el observador.*

Entonces se tambalearon los fundamentos de la Física. Porque estaba claro que el éter se movía con la Tierra, lo cual no tenía sentido- o no existía tal éter. La Física «clásica», la de Newton- notó que alguien estiraba de la alfombra bajo sus pies. No obstante, la Física newtoniana siguió siendo válida en el mundo corriente: los planetas siguieron moviéndose de acuerdo con sus leyes de gravitación, los objetos sobre la Tierra siguieron obedeciendo sus leyes de inercia y de acción-reacción. Sólo ocurrió que las explicaciones clásicas parecieron incompletas, y los físicos debieron prepararse para escudriñar fenómenos que no acataban las «leyes» clásicas. Subsistirían los fenómenos observados, tanto nuevos como antiguos, pero sería preciso ampliar y especificar las teorías que los respaldaban.

El «experimento Milchelson-Morley» tal vez sea la más importante experiencia frustrada en toda la historia de la Ciencia. En 1907 se otorgó el premio Nobel de Física a Michelson, primer científico norteamericano que recibió tal galardón.

## Relatividad

En 1893, el físico irlandés George Francis FitzGerald emitió una hipótesis para explicar los resultados negativos del experimento Michelson-Morley. Adujo que toda materia se contrae en la dirección del movimiento, y que esa contracción es directamente proporcional al ritmo del movimiento. Según tal interpretación, el interferómetro se quedaba corto en la dirección del «verdadero» movimiento terrestre, y lo hacía precisamente en una cantidad que compensaba con toda exactitud la diferencia de distancias que debería recorrer el rayo luminoso. Por añadidura, todos los aparatos medidores imaginables, incluyendo los órganos sensoriales humanos, experimentarían ese mismo «escorzo». Parecía como si la explicación de FitzGerald insinuara que la Naturaleza conspiraba con objeto de impedir que el hombre midiera el movimiento absoluto, para lo cual introducía un efecto que anulaba cualquier diferencia aprovechable para detectar dicho movimiento.

Este decepcionante fenómeno recibió el nombre de «contracción FitzGerald», y su autor formuló una ecuación para el mismo. Un objeto que se moviera a 11 km/seg (poco más o menos, la velocidad de nuestros más rápidos cohetes modernos) experimentaría sólo una contracción equivalente a 2 partes por cada 1.000 millones en el sentido del vuelo. Pero a velocidades realmente elevadas, tal contracción sería sustancial. A unos 150.000 km/seg (la mitad de la velocidad de la luz), sería de un 15 %; a 262.000 km/seg ( $7/8$  de la velocidad de la luz), del 50 %. Es decir que una regla de 30 cm que pasara ante nuestra vista a 262.000 km/seg, nos parecería que mide sólo 15,24 centímetros..., siempre y cuando conociéramos algún método para medir su longitud en pleno vuelo. Y a la velocidad de la luz, o sea, 300.000 km/seg en números redondos, su longitud, en la dirección del movimiento, sería cero. Puesto que, presuntamente, no puede existir ninguna longitud inferior a cero, se deduce que la velocidad de la luz en el vacío es la mayor que puede imaginarse en el Universo.

El físico holandés Hendrik Antoon Lorentz promovió la idea de FitzGerald. Pensando en los rayos catódicos, que ocupaban su actividad por aquellos días- se hizo el siguiente razonamiento: Si se comprimiera la carga de una partícula para reducir su volumen, aumentaría la masa de dicha partícula. Por consiguiente, una partícula

voladora, escorzada en la dirección de su desplazamiento por la contracción de FitzGerald, debería crecer en términos de masa.

Lorentz presentó una ecuación sobre el acrecentamiento de la masa, que resultó muy similar a la ecuación FitzGerald sobre el acortamiento. A 149.637 km/seg, la masa de un electrón aumentaría en un 15 %; a 262.000 km/seg, en un 100 % (es decir, su masa se duplicaría), y a la velocidad de la luz, su masa sería infinita. Una vez más pareció que no podría haber ninguna velocidad superior a la de la luz, pues, ¿cómo podía ser una masa mayor que infinita?

El efecto FitzGerald sobre longitudes y el efecto Lorentz sobre masas mantuvieron una conexión tan estrecha que aparecieron a menudo agrupadas como las «ecuaciones Lorentz-FitzGerald».

Mientras que la contracción FitzGerald no podía ser objeto de mediciones, el efecto Lorentz sobre masas sí podía serlo..., aunque indirectamente. La relación entre la masa de un electrón y su carga se puede determinar midiendo su deflexión respecto a un campo magnético. Al aumentar la velocidad de un electrón se acrecentaba la masa, pero no había razón alguna para suponer que también lo haría la carga; por consiguiente, su relación masa-carga debería aumentar. En 1900, el físico alemán W. Kauffman descubrió que esa relación aumentaba con la velocidad, de tal forma que señalaba un incremento en la masa del electrón, tal como predijeron las ecuaciones Lorentz-FitzGerald.

Ulteriores y mejores mediciones demostraron la perfección casi total de las ecuaciones de ambos.

Cuando aludamos a la velocidad de la luz como máxima velocidad, debemos recordar que lo importante de este caso es la velocidad de la luz en el vacío (298.052 km/seg). En los medios materiales transparentes la luz se mueve con más lentitud. Su velocidad cuando atraviesa tales medios es igual a la velocidad en el vacío dividida por el índice de refracción del medio. (El «índice de refracción» mide la desviación de un rayo luminoso al penetrar oblicuamente en una materia desde el vacío.)

En el agua, con un índice de refracción 1,3 aproximadamente, la velocidad de la luz es 298.052 dividida por 1,3 o sea, 229.270 km/seg más o menos. En el cristal (índice de refracción 1,5 aproximadamente), la velocidad de la luz es de 198.400

km/seg. Mientras que en el diamante (índice de refracción, 2,4) alcanza sólo 124.800 km/seg.

Es posible que las partículas subatómicas atravesen un medio transparente determinado a mayor velocidad que la luz (si bien no mayor que la luz en el vacío). Cuando las partículas se trasladan así a través de un medio, dejan una estela de luz azulada tal como el avión viajando a velocidades supersónicas deja un rastro sonoro.

La existencia de tal radiación fue descubierta, en 1934, por el físico ruso Paul Alexeievich Cherenkov (se le suele llamar también Cerenkov); por su parte, los físicos rusos Ilia Mijailovich Frank e Igor Yevguenevich Tamm expusieron una aclaración teórica, en 1937. En consecuencia, todos ellos compartieron el premio Nobel de Física en 1958.

Se han ideado detectores de partículas que captan la «radiación Cerenkov»; estos «contadores Cerenkov» son útiles, en especial, para estudiar, sobre todo, las partículas rápidas, tales como las constitutivas de los rayos cósmicos.

Cuando se tambaleaban todavía los cimientos de la Física, se produjo una segunda explosión.

Esta vez, la inocente pregunta que desencadenó el conflicto se relacionó con la radiación emitida por la materia bajo la acción del calor. (Aunque dicha radiación suele aparecer en forma de luz, los físicos denominan el problema «radiación de cuerpos negros». Esto significa que ellos piensan en un cuerpo ideal capaz tanto de absorber como de irradiar perfectamente la luz, es decir, sin reflejarla, como lo haría un cuerpo negro.) El físico austriaco Josef Stefan demostró, en 1879, que la radiación total emitida por un cuerpo dependía sólo de su temperatura (no de su sustancia), y que en circunstancias ideales la radiación era proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta: por ejemplo, si se duplica la temperatura absoluta, su radiación total aumentará dieciséis veces («ley de Stefan»). También se supo que al elevarse la temperatura, la radiación predominante derivaba hacia longitudes de onda más cortas. Por ejemplo, si se calienta un bloque de acero, empieza a irradiar principalmente los rayos infrarrojos invisibles, luego emite una luz roja apagada, a continuación roja brillante, seguidamente anaranjada,

amarillenta, y por último, si se logra evitar de algún modo su vaporización en ese instante, blanca azulada.

En 1893, el físico alemán Wilhelm Wien ideó una teoría sobre la distribución de energía en la radiación de los cuerpos negros, es decir, la cantidad de energía en cada área delimitada por una longitud de onda. Brindó una fórmula que describía concisamente la distribución de energía en la zona violada del espectro, pero no en la roja. (Por su trabajo sobre el calor recibió el premio Nobel de física en 1911.) Por otra parte, los físicos ingleses Lord Rayleigh y James Jeans elaboraron una ecuación que describía la distribución en la zona roja del espectro, pero fallaba totalmente en la zona violada. Recapitulando: las mejores teorías disponibles sólo pudieron explicar una mitad de la radiación o la otra, pero no ambas al mismo tiempo.

El físico alemán Max Karl Ernst Ludwig Planck solventó el problema. Descubrió que para hacer concordar tales ecuaciones con los hechos era preciso introducir una noción inédita. Adujo que la radiación se componía de pequeñas unidades o paquetes, tal como la materia estaba constituida por átomos. Denominó «cuanto» a la unidad de radiación (palabra latina que significa «¿cuánto?»).

Planck alegó que la radiación absorbida sólo podía ser un número entero de cuantos. Por añadidura, manifestó que la cantidad de energía en un cuanto dependía de la longitud de onda de la radiación. Cuanto menor fuera esa longitud, tanto mayor sería la fuerza energética del cuanto; o, para decirlo de otra forma, la energía contenida en el cuanto es inversamente proporcional a la longitud de onda. Desde aquel momento se pudo relacionar directamente el cuanto con la frecuencia de una determinada radiación. Tal como la energía contenida en el cuanto, la frecuencia era inversamente proporcional a la longitud de onda de la radiación. Si ambas, la frecuencia y la energía contenida en el cuanto- eran inversamente proporcionales a la longitud de onda, los dos deberían ser directamente proporcionales entre sí. Planck lo expresó con su hoy famosa ecuación:

$$e = h\nu$$

El símbolo  $e$  representa la energía del cuanto;  $\nu$  (la letra griega nu), la frecuencia, y  $h$ , la «constante de Planck», que da la relación proporcional entre cuanto, energía y frecuencia.

El valor de  $h$  es extremadamente pequeño, lo mismo que el del cuanto. En realidad, las unidades de radiación son tan ínfimas, que la luz nos parece continua, tal como la materia ordinaria se nos antoja continua. Pero, hacia principios del siglo XX, la radiación corrió la misma suerte que le había correspondido a la materia en los comienzos del siglo XIX: hoy día se las reconoce a ambas como discontinuas. Los cuantos de Planck esclarecieron la conexión entre temperatura y longitudes de onda de radiaciones emitidas. Un cuanto de luz violada era dos veces más enérgico que un cuanto de luz roja y, naturalmente, se requería más energía calorífica para producir cuantos violeta que cuantos rojos. Las ecuaciones sustentadas por el cuanto esclarecieron limpiamente la radiación de un cuerpo negro en ambos extremos del espectro.

A su debido tiempo, la teoría de los cuantos de Planck prestaría aún un mayor servicio: explicarían el comportamiento de los átomos, de los electrones en los átomos y de los nucleones en los núcleos atómicos. Planck fue galardonado con el premio Nobel de Física en 1918.

Al ser publicada en 1900 la teoría de Planck, causó poca impresión entre los físicos. Era demasiado revolucionaria para recibir inmediata aceptación. El propio Planck pareció anonadado por su propia obra. Pero, cinco años después, un joven físico alemán residente en Suiza, llamado Albert Einstein, verificó la existencia de sus cuantos.

Entretanto, el físico alemán Philipp Lenard había descubierto que cuando la luz encontraba ciertos metales, hacía emitir electrones a la superficie metálica como si la fuerza de la luz expulsara a los electrones del átomo. Ese fenómeno se denominó «efecto fotoeléctrico» y, por su descubrimiento, Lenard recibió el premio Nobel de Física en 1905. Cuando los físicos empezaron a experimentar con ello, observaron, estupefactos, que si se aumentaba la intensidad lumínica, no se proporcionaba más energía a los electrones expulsados. Pero el cambio de la longitud de onda luminosa les afectaba: la luz azul, por ejemplo, les hacía volar a mayor velocidad que la luz amarilla. Una luz azul muy tenue expulsaba menos electrones que una brillante luz amarilla, pero aquellos electrones «azulados» se desplazaban a mayor velocidad que cualquier electrón amarillo. Por otra parte, la luz roja, cualquiera que fuera su brillantez, no podía expulsar ningún electrón de ciertos metales.

Nada de esto era explicable con las viejas teorías de la luz. ¿Por qué haría la luz azul unas cosas que no podía hacer la luz roja?

Einstein halló la respuesta en la teoría de los cuantos de Planck. Para absorber suficiente energía con objeto de abandonar la superficie metálica, un electrón necesitaba recibir el impacto de un cuanto cuya magnitud fuera mínima hasta cierto punto. En el caso de un electrón retenido débilmente por su átomo (por ejemplo, el cesio), cualquier cuanto lo conseguiría, incluso uno de luz roja. Allá donde los átomos retuvieran más enérgicamente a los electrones, se requerirían las luces amarilla o azul, e incluso la ultravioleta. En cualquier caso, conforme más energía tuviera el cuanto, tanta más velocidad proporcionaría al electrón que liberase.

Aquí se daba una situación donde la teoría de los cuantos explicaba un fenómeno físico con absoluta simplicidad, mientras que el concepto «precuento» de la luz permanecía inerme. Luego siguieron arrolladoramente otras aplicaciones de la mecánica cuántica. Por su esclarecimiento del efecto fotoeléctrico (no por su teoría de la relatividad), Einstein obtuvo el premio Nobel de Física en 1921.

En su *Teoría especial de la relatividad*, presentada el año 1905 y desarrollada en sus ratos libres mientras trabajaba como perito técnico en la oficina suiza de patentes-Einstein expuso una opinión fundamental inédita del Universo basándose en una ampliación de la teoría sobre los cuantos. Adujo que la luz se trasladaba por el espacio en forma cuántica (el «fotón»), y así hizo resucitar el concepto de la luz integrada por partículas. Pero ésta era una nueva especie de partícula. Reunía las propiedades de ondas y partículas, mostrando indistintamente unas u otras, según los casos.

Ello pudiera parecer una paradoja e incluso una especie de misticismo, como si la verdadera naturaleza de la luz desbordara todo conocimiento imaginable. Sin embargo, no es así. Para ilustrarlo con una analogía, digamos que el hombre puede ofrecer muchos aspectos: marido, padre, amigo o negociante. Todo depende de un ambiente momentáneo, y según sea éste, se comportará como marido, padre, amigo o negociante. Sería improcedente que exhibiera su comportamiento conyugal con una cliente o el comportamiento comercial con su esposa, y, de todos modos, ello no implicaría un caso paradójico ni un desdoblamiento de personalidad.

De la misma forma, la radiación posee propiedades corpusculares y ondulatorias. En ciertas condiciones resaltan las propiedades corpusculares; en otras, las ondulatorias. Este carácter binario nos da una aclaración más satisfactoria que cualquier conjunto de propiedades por separado.

Cuando se descubrió la naturaleza ondulatoria de la luz, se allanó el camino para los sucesivos triunfos de la óptica decimonónica, incluyendo la espectroscopia. Pero este descubrimiento exigió también que los físicos imaginaran la existencia del éter. Luego, la teoría einsteniana partícula-onda mantuvo todas las victorias del siglo XIX (incluidas las ecuaciones de Maxwell), pero estimó innecesario presuponer la existencia del éter. La radiación podía trasladarse por el vacío en virtud de sus atributos corpusculares, y desde aquel instante se pudo enterrar la teoría del éter, teoría con la que acabara ya el experimento Michelson-Morley.

Einstein introdujo una segunda idea trascendental con su *Teoría especial de la relatividad*: la velocidad de la luz no varía jamás, cualquiera que sea el origen del movimiento. Según el concepto newtoniano del Universo, un rayo luminoso procedente de un foco en movimiento hacia el observador, se mueve más aprisa que otro procedente de un foco que se aleja en dirección contraria. A juicio de Einstein, eso era inexacto; y basándose en tal su posición consiguió derivar las ecuaciones Lorentz-FitzGerald. Einstein demostró que el aumento de la masa con la velocidad, aplicado por Lorentz sólo a las partículas cargadas- era aplicable a todo objeto conocido, y, ampliando su razonamiento, dijo que los aumentos de velocidad no sólo acortarían de longitud y acrecentarían la masa, sino que también retrasaría el paso del tiempo: en otras palabras, los relojes se retrasarían con el acortamiento de la vara medidora.

Un aspecto fundamental de la teoría einsteniana fue la negación de la existencia de «espacio absoluto» y «tiempo absoluto». Tal vez parezca descabellado a primera vista: ¿Cómo puede la mente humana escrutar lo que ocurre en el Universo si no tiene una base de partida? Einstein repuso que todo cuanto necesitamos hacer es tomar una «estructura de referencia» para poder relacionar con ella los acontecimientos universales. Cualquier estructura de referencia (la Tierra inmóvil, el Sol inmóvil o, si a mal no viene, nosotros mismos, inmóviles) sería válida; sólo nos restaba elegir aquella que nos pareciera más convincente. Tal vez sea preferible,

pero no más «verídico», calcular los movimientos en una estructura donde el Sol esté inmóvil, que en otra donde la Tierra esté inmóvil.

Así, pues, las medidas de espacio y tiempo son «relativas» respecto a una estructura de referencia elegida arbitrariamente..., y de aquí que se haya llamado a la idea einsteniana «teoría de la relatividad».

Para ilustrar este punto, supongamos que estamos observando desde la Tierra un extraño planeta («Planeta X»), una copia exacta del nuestro por su tamaño y masa que pasa silbando ante nuestra vista a 262.000 km/seg en relación con nosotros. Si pudiéramos medir sus dimensiones cuando pasa lanzado, descubriríamos que muestra un escorzo del 50 % en la dirección de su movimiento. Sería un elipsoide más bien que una esfera, y las mediciones adicionales nos dirían que parece tener dos veces más masa que la Tierra.

Sin embargo, un habitante del Planeta X tendría la impresión que él y su propio mundo estaban inmóviles. Él creería ver pasar la Tierra ante *su vista* a 262.00 km/seg y se diría que tenía forma elipsoidal y dos veces la masa de *su* planeta.

Uno cae en la tentación de preguntar cuál de los dos planetas estaría *realmente* escorzado y tendría doble masa, pero la única respuesta posible es ésta: ello depende de la estructura de referencia. Y si la encontráis decepcionante, considerad que un hombre es pequeño comparado con una ballena, pero grande al lado de un insecto. ¿Solucionaríamos algo preguntando si el hombre es realmente grande, o bien pequeño?

Aunque sus consecuencias sean desusadas, la relatividad explica todos los fenómenos conocidos del Universo, tan bien por lo menos como cualquiera otra teoría precedente. Pero va aún más lejos: explica lúcidamente ciertos fenómenos que la visión newtoniana no enfoca bien, o si acaso lo hace con muy pobres recursos. De resultas, Einstein ha sido preferido a Newton, no como un relevo, sino más bien como un perfeccionamiento. La visión newtoniana del Universo es todavía utilizable a modo de aproximación simplificada cuyo funcionamiento es aceptable para la vida corriente e incluso la Astronomía ordinaria tal como colocar satélites en órbita. Pero cuando se trata de acelerar partículas en un sincrotrón, por ejemplo, comprendemos que es preciso, si se quiere poner en marcha la máquina, hacer entrar en juego el acrecentamiento einsteniano de la masa con la velocidad.

La visión einsteniana del Universo combinó tan profundamente el espacio y el tiempo que cualquiera de los dos conceptos carecía de significado por sí solo.

El Universo es cuatridimensional, y el tiempo figura entre sus cuatro dimensiones (pero sin comportarse como las dimensiones especiales ordinarias de longitud, anchura y altura). Frecuentemente se hace referencia a la fusión cuatridimensional con la relación «espacio-tiempo». El matemático germano ruso Hermann Minkowski, uno de los maestros de Einstein, fue quien utilizó por primera vez esa noción en 1907.

Una vez promovidos los conceptos tiempo y espacio al papel de extraños artificios en la relatividad, otro aspecto de éste, que suscita todavía polémicas entre los físicos, es la noción einsteniana sobre el retraso de los relojes. Un reloj en movimiento, dijo él- marca el tiempo con más lentitud que uno estacionario. A decir verdad, todos los fenómenos que evolucionan con el tiempo lo hacen más lentamente cuando se mueven que cuando están en reposo, lo cual equivale a decir que el propio tiempo se retrasa. A velocidades ordinarias, el efecto es inapreciable, pero a 262.000 km/seg, un reloj parecería (a un observador que lo viera pasar fugazmente ante sí) que tarda dos segundos en marcar un segundo. Y, a la velocidad de la luz, el tiempo se paralizaría.

La dimensión «tiempo» es más perturbadora que las otras dos relacionadas con la longitud y el peso. Si un objeto se reduce a la mitad de su longitud y luego recupera el tamaño normal o si duplica su peso para volver seguidamente al peso normal, no dejará rastro de ese cambio temporal y, por tanto, no puede haber controversia entre los criterios opuestos.

Sin embargo, el tiempo es una cosa acumulativa. Por ejemplo, un reloj sobre el planeta X parece funcionar a media marcha debido a la gran velocidad de translación; si lo mantenemos así durante una hora y luego lo llevamos a un lugar estático, su maquinaria reanudará la marcha ordinaria pero habrá quedado una marca: imedia hora de retraso! Veamos otro ejemplo. Si dos barcos se cruzan y los observadores de cada uno estiman que el otro se traslada a 262.000 km/seg y su reloj funciona a media marcha, cuando las dos naves se crucen otra vez los observadores de cada una pensarán que el reloj de la otra lleva media hora de retraso con respecto al suyo. Pero, ¿es posible que cada reloj lleve media hora de

retraso con respecto al otro? ¡No! ¿Qué pensar entonces? Se ha denominado a este problema «la paradoja del reloj».

Realmente no existe tal paradoja. Si un barco pasase cual un rayo ante el otro y las tripulaciones de ambos jurasen que el reloj del otro iba retrasado, poco importaría saber cuál de los dos relojes era «verdaderamente» el retrasado porque ambos barcos se separarían para siempre. Los dos relojes no concurrirían jamás en el mismo lugar ni a la misma hora para permitir una comprobación y la paradoja del reloj no se plantearía nunca más. Ciertamente, la *Teoría especial de la relatividad* de Einstein es aplicable tan sólo al movimiento uniforme, y por tanto aquí estamos hablando únicamente de una separación definitiva.

Supongamos, empero, que los dos barcos se cruzasen *nuevamente* después del fugaz encuentro y entonces *fuese posible* comparar ambos relojes. Para que sucediese tal cosa debería mediar un nuevo factor: sería preciso que uno de los barcos acelerase su marcha. Supongamos que lo hiciera el barco *B* como sigue: primero reduciendo la velocidad para trazar un inmenso arco y orientarse en dirección a *A*, luego avanzando aceleradamente hasta el encuentro con *A*. Desde luego, *B* podría considerarse en una posición estacionaria, pues, teniendo presente su forma de orientarse, sería *A* el autor de todo el cambio acelerando hacia atrás para encontrarse con *B*. Si esos dos barcos fueran lo único existente en el Universo, la simetría mantendría viva ciertamente la paradoja del reloj.

Ahora bien, *A* y *B* *no* son lo único existente en el Universo, y ello desbarata la simetría. Cuando *B* acelera no toma solamente *A* como referencia, sino también el resto del Universo. Si *B* opta por verse en posición estacionaria no debe considerar que solamente *A* acelera respecto a él, sino también todas las galaxias sin excepción. Resumiendo: es el enfrentamiento de *B* con el Universo. En tales circunstancias el reloj atrasado será el de *B*, no el de *A*.

Esto afecta a las nociones sobre viajes espaciales. Si los astronautas se trasladaran a la velocidad de la luz cuando abandonasen la Tierra, el transcurso de su tiempo sería mucho más lento que el del nuestro.

Los viajeros del espacio podrían alcanzar un destino remoto y regresar al cabo de una semana, según lo entenderían ellos, aunque verdaderamente habrían transcurrido muchos siglos sobre la Tierra. Si el tiempo se retarda realmente con el

movimiento, una persona podrá hacer el viaje de ida y vuelta hasta una estrella distante. Pero, desde luego, deberá despedirse para siempre de su propia generación y del mundo que conoció, pues cuando regrese encontrará un mundo del futuro.

En la *Teoría especial de la relatividad*, Einstein no abordó la gravitación. Trató ese tema en su *Teoría general de la relatividad*, publicada el año 1915. Esta Teoría general presentó un panorama insólito de la gravitación. Allí se la conceptuó como una propiedad del espacio más bien que una fuerza actuando entre los cuerpos. La presencia de materia hace curvarse al espacio, por así decirlo, y los cuerpos siguen la línea de menor resistencia entre las curvas. Aunque la idea de Einstein parecía sobremanera extraña, sirvió para explicar lo que no había logrado esclarecer la ley newtoniana de gravedad.

La ley de la gravedad de Newton se apuntó su mayor triunfo en 1846. El planeta Urano, descubierto el año 1781, tenía una órbita ligeramente errática alrededor del Sol. Medio siglo de observaciones lo certificaban así inequívocamente. Entonces los astrónomos se dijeron que algún planeta todavía incógnito más allá de él debía ejercer una fuerza gravitatoria sobre su masa. El astrónomo británico John Couch Adams y el francés Urbain-Jean-Joseph Leverrier calcularon la posición de este planeta hipotético recurriendo a las teorías newtonianas. En 1846, el astrónomo alemán Johann Gottfried Galle apuntó un telescopio hacia el lugar señalado por Leverrier, y, efectivamente... ¡allí había un nuevo planeta, llamado desde entonces Neptuno!

Tras aquel hallazgo la ley newtoniana de gravedad pareció irrefutable. ¡Nada podría desvirtuarla! Sin embargo quedó sin explicación cierto movimiento planetario. El punto más cercano al Sol («perihelio») del planeta Mercurio cambiaba de un paso al siguiente: no ocupaba nunca dos veces seguidas el mismo lugar en sus revoluciones «anuales» alrededor del Sol. Los astrónomos sólo pudieron atribuir esa irregularidad a las «perturbaciones» causadas en su órbita por la atracción de los planetas vecinos.

Ciertamente, durante los primeros trabajos con la ley de gravitación se había temido hasta cierto punto que las perturbaciones ocasionadas por la tracción de un planeta sobre otro pudieran desequilibrar algún día el delicado mecanismo de

sistema solar. Sin embargo, en las primeras décadas del siglo XIX el astrónomo francés Pierre-Simon Laplace demostró que el Sistema Solar no era tan delicado como todo eso. Las perturbaciones eran sin excepción cílicas, y las irregularidades orbitales no sobrepasaban nunca ciertos márgenes en cualquier dirección. El Sistema Solar parecía ser estable a largo plazo, y los astrónomos estaban cada vez más convencidos que sería posible analizar todas las irregularidades específicas tomando en cuenta dichas perturbaciones.

Sin embargo, esto no fue aplicable a Mercurio. Una vez presupuestadas todas las perturbaciones quedó todavía sin explicar la desviación del perihelio de Mercurio en una cantidad equivalente a 43 segundos de arco cada siglo. Este movimiento, descubierto por Leverrier en 1845, no representó gran cosa: dentro de 4.000 años será igual a la anchura de la Luna. Pero si fue suficiente para causar inquietud entre los astrónomos.

Leverrier opinó que tal desviación podría ser ocasionada por algún planeta pequeño e ignoto más próximo al Sol que Mercurio. Durante varias décadas, los astrónomos buscaron el supuesto planeta (llamado «Vulcano»), y se presentaron numerosos informes anunciando su descubrimiento. Pero todos los informes resultaron ser erróneos. Finalmente se acordó que Vulcano era inexistente.

Entonces la *Teoría general de la relatividad* aportó la respuesta. Einstein demostró que el perihelio de un cuerpo rotatorio debe tener cierto movimiento adicional aparte del predicho por la ley newtoniana. Cuando se aplicó ese nuevo cálculo a Mercurio, la desviación de su perihelio concordó exactamente con la fórmula general. Otros planetas más distantes del Sol que Mercurio mostrarían una desviación de perihelio progresivamente menor. El año 1960 se descubrió, estudiando la órbita de Venus, que el perihelio avanzaba 8 segundos de arco por siglo aproximadamente; esta desviación concuerda casi exactamente con la teoría de Einstein.

Pero aún fueron más impresionantes dos fenómenos insospechados que sólo habían sido previstos por la teoría einsteniana. Primero, Einstein sostuvo que un campo gravitatorio intenso debe refrenar las vibraciones de los átomos. Ese refrenamiento se manifestaría mediante una desviación de las rayas espectrales hacia el rojo («desviación de Einstein»). Escudriñando el firmamento en busca de un campo

gravitatorio suficientemente potente para ejercer tal efecto, los astrónomos pensaron en las densas y blancas estrellas enanas. Analizaron el espectro de las enanas blancas y encontraron esa desviación de las rayas espectrales.

La verificación del segundo pronóstico einsteniano fue todavía más espectacular. Su teoría decía que un campo gravitatorio hace curvarse los rayos luminosos. Einstein calculaba que si un rayo de luz rozase la superficie solar se desviaría en línea recta 1,75 seg de arco. ¿Cómo comprobarlo? Pues bien, si se observaran durante un eclipse solar las estrellas situadas más allá del Sol, enfiladas con su borde, y se compararan sus posiciones con las que ocupaban al fondo cuando el sol no se interponía, se evidenciaría cualquier desviación por la curvatura de la luz. El ensayo se aplazó desde 1915, es decir, cuando Einstein publicaba su tesis sobre relatividad general, hasta el fin de la Primera Guerra Mundial. En 1919, la *British Royal Astronomical Society* organizó una expedición para proceder al ensayo observando un eclipse total visible desde la isla del Príncipe, una pequeña posesión portuguesa frente a la costa de África Occidental. Y, en efecto, las estrellas se desviaron de su posición. Una vez más se acreditó Einstein.

Con arreglo al mismo principio, si una estrella está directamente detrás de otra, la luz de la estrella más distante contorneará a la más cercana, de tal modo que el astro más lejano aparecerá tener mayor tamaño. La estrella más cercana actuará cual una «lente gravitatoria». Infortunadamente, el tamaño aparente de las estrellas es tan diminuto que el eclipse de una estrella distante por otra mucho más cercana (visto desde la Tierra) es sobremanera raro, aunque algunos astrónomos se han preguntado especulativamente si las desconcertantes propiedades de los cuásares no se deberían a los efectos de la lente gravitatoria. En 1988 tendrá lugar un eclipse de esta especie. No cabe duda que los astrónomos se mantendrán alertas.



*Curvatura gravitatoria de las ondas luminosas, postulada por Einstein en su Teoría General de la Relatividad.*

Los tres grandes triunfos de la teoría general einsteniana, fueron todos de naturaleza astronómica. Los científicos buscaron afanosamente algún medio para comprobarlos en el laboratorio donde ellos pudieran hacer variar a voluntad las condiciones requeridas. La clave para semejante demostración de laboratorio surgió en 1958 cuando el físico alemán Rudolf Ludwig Mössbauer demostró que en ciertas condiciones un cristal puede irradiar rayos gamma cuya longitud de onda queda definida específicamente. Y un cristal similar al emisor, puede absorber los rayos gamma de esa longitud de onda. Si los rayos gamma difirieran levemente por su longitud de onda de aquellos emitidos naturalmente por el cristal, el otro cristal no los absorbería. Esto es lo que se llama el «efecto Mössbauer».

Si esa emisión de rayos gamma sigue una dirección de arriba abajo para caer con la gravedad, ganará energía, según prescribe la *Teoría general de la relatividad*- de tal modo que su longitud de onda se acortará. Al caer unos cuantos centenares de centímetros adquirirá suficiente energía para el decrecimiento en la longitud de onda de los rayos gamma, aunque esa disminución debe ser muy reducida, pues la onda necesita conservar suficiente amplitud con el fin de evitar que el cristal absorbente siga absorbiendo el rayo.

Por añadidura si el cristal emisor de rayos gamma se mueve hacia arriba durante este proceso, el efecto de Doppler-Fizeau acrecentará la longitud de onda de los rayos gamma. Entonces se ajustará la velocidad del cristal ascendente para neutralizar el efecto de gravitación sobre el rayo gamma descendente, y de resultas éste será absorbido por el cristal sobre cuya superficie incide.

Tales experimentos realizados en 1960 más el empleo ulterior del efecto Mössbauer, confirmaron la *Teoría general* con suma precisión. Constituyeron la demostración más impresionante conocida hasta ahora de su validez; como consecuencia de ello se otorgó el premio Nobel de Física a Mössbauer en 1961.

Pese a todo, las protestas, reclamando validez para la teoría general de Einstein siguen atenuándose. Las confirmaciones permanecen en una divisoria difusa. Allá por 1961, el físico norteamericano Robert Henry Dicke desarrolló un concepto más complejo denominado por él mismo «teoría escalartensor» que trata de gravitación no como un efecto geométrico, según la teoría de Einstein, sino cual una combinación de dos campos cuyas propiedades difieren entre sí. Ambas teorías

predicen fenómenos tan parecidos que son virtualmente indistinguibles unos de otros. En el verano de 1966 Dicke midió la esfericidad del Sol, y, tras unas mediciones muy alambicadas, aseguró haber detectado un leve abombamiento ecuatorial. Este abultamiento explicaría en un 8 % el avance observado por el perihelio de Mercurio y destruiría el excelente acoplamiento de la teoría general. El hallazgo debilitaría la teoría de Einstein; pero ello no pareció afectar a Dicke.

Por otra parte, aunque ambas teorías predicen que las ondas luminosas (o las radioondas) sufrirían una retardación cuando pasaran junto a un objeto macizo, difieren algo en el grado de retardación predicho. En 1970 las sondas planetarias reflejarían señales de radio justamente cuando pasaran por detrás del Sol (visto desde la Tierra) a una distancia conocida. El tiempo que se tardase en recibir esas radioondas mediría el grado de su retardación al contornear el Sol en ambas direcciones. Según se informó, los resultados se aproximaron bastante más a la predicción de Einstein que a la de Dicke, pero el asunto no quedó resuelto todavía de forma concluyente.

## Calor

Hasta este punto del capítulo he dejado al margen un fenómeno que usualmente acompaña a la luz en nuestras experiencias cotidianas. Casi todos los objetos luminosos, desde una estrella hasta una vela, desprenden calor junto con la luz. Antes de los tiempos modernos no se estudiaba el calor, si se exceptúa el aspecto cualitativo. A una persona le bastaba con decir «hace calor», o «hace frío», o «esto está más caliente que aquello». Para someter la temperatura a una medición cuantitativa fue necesario, ante todo, encontrar algún cambio mensurable que pareciera producirse regularmente con los cambios de temperatura. Se encontró esa variación en el hecho que las sustancias se dilatan con el calor y se contraen con el frío.

Galileo fue quien intentó por primera vez aprovechar tal hecho para observar los cambios de temperatura. En 1603 invirtió un tubo de aire caliente sobre una vasija de agua. Cuando el aire en el tubo se enfrió hasta igualar la temperatura de la habitación dejó subir el agua por el tubo, y de este modo consiguió Galileo su «termómetro» (del griego *thermes* y *metron*, «medida de calor»). Cuando variaba

la temperatura del aposento cambiaba también el nivel de agua en el tubo. Si se caldeaba la habitación, el aire se contraía y el nivel del agua ascendía. La única dificultad fue que aquella vasija de agua donde se había insertado el tubo, estaba abierta al aire libre y la presión de éste era variable. Ello producía ascensos y descensos de la superficie líquida, es decir, variaciones ajenas a la temperatura que alteraban los resultados.

En 1654, el gran duque de Toscana, Fernando II, ideó un termómetro independiente de la presión atmosférica. Este aparato contenía un líquido en una ampolla a la cual se unía un tubo recto. La contracción y dilatación del propio líquido señalaba los cambios de temperatura. Los líquidos cambian de volumen con la temperatura mucho menos que los gases, pero si se emplea la cantidad justa de líquido para llenar una ampolla, de modo que el líquido sólo pueda dilatarse a lo largo de un tubo muy estrecho, los ascensos y descensos dentro de ese tubo pueden ser considerables incluso para ínfimos cambios de volumen.

El físico inglés Robert Boyle hizo algo muy parecido sobre la misma cuestión, y fue el primero en demostrar que el cuerpo humano tiene una temperatura constante bastante superior a la del medio ambiente. Otros probaron que bajo una temperatura fija se producen siempre fenómenos físicos concretos. Cuando aún no había terminado el siglo XVII se comprobó esa verdad en el caso del hielo derretido y el agua hirviente.

Por fin, en 1714, el físico alemán Gabriel Daniel Fahrenheit combinó las investigaciones del gran duque y de Amontons introduciendo mercurio en un tubo y utilizando sus momentos de dilatación y contracción como indicadores de la temperatura. Fahrenheit incorporó al tubo una escala graduada para poder apreciar la temperatura bajo el aspecto cuantitativo.

Se ha argumentado no poco sobre el método empleado por Fahrenheit para establecer su escala particular. Según algunos, asignó el cero a la temperatura más baja que pudo crear en su laboratorio mezclando sal y hielo. Sobre esa base fijó la solidificación del agua a  $32^{\circ}$  y la ebullición a  $212^{\circ}$ . Esto ofreció dos ventajas: primera, el margen de temperatura donde el agua se mantiene en estado líquido era de  $180^{\circ}$ , el cual parece un número natural para su uso en conexión con los «grados». (La medida en grados del semicírculo.) Segunda, la temperatura del

cuerpo se aproximaba a los 100º, aunque para ser exactos es, normalmente, de 98,6º Fahrenheit.

Ordinariamente, la temperatura del cuerpo es tan constante que si sobrepasa en un grado o dos el nivel normal se dice que el cuerpo tiene fiebre y, por tanto, muestra síntomas evidentes de enfermedad. En 1858, el médico alemán Karl August Wunderlich implantó las frecuentes comprobaciones de la temperatura corporal como nuevo procedimiento para seguir el curso de una enfermedad. En la década siguiente, el médico británico Thomas Clifford Allbutt inventó el «termómetro clínico» cuyo estrecho tubo lleno de mercurio tiene un estrangulamiento en la parte inferior. El mercurio se eleva hasta las cifras máximas cuando se coloca el termómetro dentro de la boca, pero no desciende al retirarlo para leer la temperatura. El hilo de mercurio se divide simplemente por el estrangulamiento, dejando fija la porción superior para una lectura constante. En Gran Bretaña y los Estados Unidos se emplea todavía la escala Fahrenheit y están familiarizados con ella en todas las observaciones cotidianas, tales como informes meteorológicos y utilización de termómetros clínicos.

Sin embargo, en 1742 el astrónomo sueco Anders Celsius adoptó una escala diferente. En su forma definitiva, este sistema estableció el punto 0 para la solidificación del agua y el 100 para la ebullición. Con arreglo al margen de división centesimal donde el agua conserva su estado líquido, se denominó a esta escala, «centígrada», del latín *centum* y *gradus*, significando «cien peldaños». Casi todas las personas hablan de «grados centígrados» cuando se refieren a las medidas de esta escala, pero los científicos rebautizaron la escala con el nombre del inventor, siguiendo el precedente Fahrenheit- en una conferencia internacional celebrada el año 1948. Oficialmente, pues, se debe hablar de «escala Celsius» y «grados Celsius». Todavía se conserva el signo «C». Entretanto, la escala «Celsius» ha ganado preponderancia en casi todo el mundo civilizado. Los científicos, en particular, encuentran muy conveniente esta escala.

La temperatura mide la intensidad del calor pero no su cantidad. El calor fluye siempre desde un lugar de altas temperaturas hacia un lugar de bajas temperaturas, hasta que ambas temperaturas se igualan, tal como el agua fluye de un nivel superior a otro inferior hasta que se equilibran los dos niveles. Eso es

válido, cualesquiera que sean las cantidades relativas de calor contenidas en los cuerpos. Aunque una bañera de agua tibia contenga mucho más calor que una cerilla encendida, si metemos la cerilla en el agua, el calor fluye de la cerilla hacia el agua y no al contrario.

Joseph Black, quien hizo un importante estudio sobre los gases (véase capítulo IV), fue el primero en establecer la distinción entre temperatura y calor. En 1760 anunció que varias sustancias daban temperaturas diferentes cuando se les aplicaba la misma cantidad de calor. El elevar en un grado Celsius la temperatura de un gramo de hierro requería tres veces más calor que el calentar en la misma proporción un gramo de plomo. Y el berilio necesitaba tres veces más calor que el hierro.

Por añadidura, Black demostró la posibilidad de introducir calor en una sustancia sin elevar lo más mínimo su temperatura. Cuando se caliente el hielo, éste se derrite lentamente, desde luego, pero no hay aumento de temperatura. A su debido tiempo, el calor liquidará todo el hielo, pero la temperatura del hielo no rebasa jamás los 0º C. Lo mismo ocurre en el caso del agua hirviente a 100º C. Cuando el calor se transmite al agua, ésta escapa en cantidades cada vez mayores en forma de vapor, pero la temperatura del líquido no varía.

El invento de la máquina de vapor (véase capítulo VIII), coincidente más o menos con los experimentos de Black, sirvió para que los científicos sintieran más interés hacia el calor y la temperatura. Muchos empezaron a cavilar especulativamente sobre la naturaleza del calor, tal como lo hicieran antes sobre la naturaleza de la luz.

En ambos casos, calor y luz- hubieron dos teorías. Una mantuvo que el calor era una sustancia material que podía verterse o transmitirse de una sustancia a otra. Se la denominó «calórico» del latín *caloris*, «calor». Según este criterio, cuando la madera arde, su calórico pasa a la llama, y de ésta a la olla sobre la llama, y de ahí al agua dentro de la olla. Cuando el agua se llena de calórico, se convierte en vapor. Hacia fines del siglo XVIII dos famosas observaciones dieron nacimiento a la teoría que el calor es una forma de vibración. Una fue publicada por el físico y aventurero Benjamin Thompson, un *tory* que abandonó el país durante la Revolución, se ganó el título de conde de Rumford, y luego vagabundeó por toda Europa. En el año

1798, cuando se hallaba un momento inspeccionando la limpieza de unos cañones en Baviera, percibió que se producían grandes cantidades de calor. Calculó que allí se generaba suficiente calor para hacer hervir dieciocho libras de agua en menos de tres horas. ¿De dónde procedía todo ese calórico? Thompson decidió que debía ser una vibración provocada e intensificada por la fricción mecánica de la baqueta contra el ánima.

Al año siguiente, el químico Humphry Davy realizó un experimento más significativo todavía. Manteniendo dos trozos de hielo bajo el punto de congelación los frotó uno con otro, no a mano, sino mediante un artificio mecánico de modo que ningún calórico pudiera transmitirse al hielo. La mera fricción bastó para derretir parte del hielo. Él llegó también a la conclusión que el calor debía ser una vibración y no una materia. Realmente, aquel experimento debiera haber sido determinativo, pero la teoría del calórico, aunque errónea a todas luces, subsistió hasta mediados del siglo XIX.

No obstante, y aún cuando se desfiguró la naturaleza del calor, los científicos puntuizaron algunos hechos importantes sobre él, tal como los investigadores de la luz habían revelado interesantes facetas sobre la reflexión y la refracción de los rayos luminosos antes de desentrañar su naturaleza. Jean-Baptiste-Joseph Fourier y Nicholas-Léonard Sadi Carnot estudiaron en Francia el flujo del calor y dieron importantes pasos adelante. De hecho se considera generalmente a Carnot como el padre de la «termodinámica» (del griego *therme* y *dynamiké*, «movimiento del calor»). Él, proporcionó un firme fundamento teórico al funcionamiento de las máquinas de vapor.

Carnot realizó su tarea en la década de 1830. Hacia 1840, los físicos se interesaron por dos cuestiones acuciantes: ¿Cómo aprovechar el calor transformado en vapor para hacerle realizar el trabajo mecánico de mover un pistón? ¿Habría algún límite para la cantidad de trabajo que pudiera obtenerse de una cantidad determinada de calor? ¿Y qué pasaba con el proceso inverso? ¿Cómo convertir el trabajo en calor? Joule pasó treinta y cinco años transformando diversas clases de trabajo en calor, haciendo con sumo cuidado lo que Rumford había hecho antes muy a la ligera. Midió la cantidad de calor producida por una corriente eléctrica. Calentó agua y mercurio agitándolos con ruedas de paletas o haciendo entrar el agua a presión en estrechos

tubos. Calentó el aire comprimiéndolo, y así sucesivamente. En cada caso calculó cuánto trabajo mecánico se había realizado con el sistema y cuánto calor se había obtenido como resultado. Entonces descubrió que una cantidad de terminada de trabajo, cualquiera que fuese su clase, producía siempre una cantidad determinada de calor, lo cual se denominaba «equivalente mecánico del calor».

Puesto que se podía convertir el calor en trabajo, justo era considerarlo como una forma de «energía» (del griego *enérgueia*, «que contiene trabajo»). Electricidad, magnetismo, luz y movimiento eran aplicables al trabajo y por tanto también formas de energía. Y el propio trabajo, al ser transformable en calor, era asimismo una forma de energía.

Todo ello hizo resaltar lo que se había sospechado más o menos desde los tiempos de Newton: a saber, que la energía se «conservaba», y que no era posible crearla ni destruirla. Así, pues, un cuerpo móvil tiene «energía cinética» («energía del movimiento») término introducido por Lord Kelvin en 1856. Puesto que la gravedad frena el movimiento ascendente de un cuerpo, la energía cinética de éste desaparece lentamente. Sin embargo, mientras el cuerpo pierde energía cinética, gana energía de posición, pues, en virtud de su elevada situación sobre la superficie terrestre, tiene posibilidades de caer y recuperar la energía cinética. En 1853, el físico escocés William John Macquorn Rankine denominó «energía potencial» a esa energía de posición. Al parecer, la energía cinética de un cuerpo más su energía potencial (su «energía mecánica») permanecían casi invariables durante el curso de su movimiento, y entonces se llamó a ese fenómeno «conservación de la energía mecánica». Sin embargo, la energía mecánica no se conservaba *perfectamente*. Siempre había pérdidas con la fricción, la resistencia al aire, etcétera.

Los experimentos de Joule demostraron, ante todo, que el mantenimiento exacto de esa conservación sólo era posible cuando se tomaba en cuenta el calor, pues, cuando la energía mecánica se traspasaba a la fricción o la resistencia contra el aire, reaparecía en forma de calor. Teniendo presente el calor, uno puede mostrar, sin hacer salvedades, que nunca se crea nueva energía y nunca se destruye la energía existente. La primera persona que dio expresión verbal a ese concepto fue Heinrich von Helmholtz. En 1847, Von Helmholtz anunció la «ley de conservación de energía» en los siguientes términos: es posible cambiar de forma la energía, pero

no se la puede crear ni destruir. Siempre que cierta cantidad de energía parezca desaparecer en un lugar, reaparecerá necesariamente una cantidad equivalente en otro. También se le llama a esto «la primera ley de la termodinámica».

Ahora bien, aunque sea posible convertir en calor cualquier forma de trabajo, no puede darse el proceso inverso. Cuando el calor se transforma en trabajo, una parte de él es inservible y se pierde irremisiblemente. Al hacer funcionar una máquina de vapor, el calor de éste se transforma en trabajo solamente cuando la temperatura del vapor queda reducida a la temperatura del medio ambiente; una vez alcanzado ese punto ya no será posible convertirlo en trabajo, aunque haya todavía mucho calor remanente en el agua fría formada por el vapor. Incluso al nivel de temperatura donde sea posible extraer trabajo, una parte del calor no trabajará, sino que se empleará para calentar la máquina y el aire circundante, para superar la fricción entre pistones y cilindros, etcétera.

En toda conversión de energía, por, ejemplo, energía eléctrica en energía luminosa, energía magnética en energía cinética- se desperdicia parte de la energía. Pero no se pierde; pues ello desvirtuaría la primera ley. Sólo se convierte en calor que se dispersa por el medio ambiente.

La capacidad de cualquier sistema para desarrollar un trabajo se denomina «energía libre». La cantidad de energía que se pierde inevitablemente como energía inaprovechable se refleja en las mediciones de la «entropía», término creado en 1850 por el físico Rudolf Julius Emmanuel Clausius.

Clausius indicó que en cualquier proceso relacionado con el flujo de energía hay siempre alguna pérdida, de tal forma que la entropía del Universo aumenta sin cesar. Este continuo aumento entrópico constituye la «segunda ley de la termodinámica». Algunas veces se ha aludido a ella asociándola con los conceptos «agotamiento del Universo» y «muerte calorífica del Universo». Por fortuna la cantidad de energía aprovechable (facilitada casi enteramente por las estrellas, que, desde luego, «se desgastan» a un ritmo tremendo) es tan vasta que resultará suficiente para todos los propósitos durante muchos miles de millones de años.

Finalmente, se obtuvo una noción clara sobre la naturaleza del calor con la noción sobre la naturaleza atómica de la materia. Se fue perfilando cuando los científicos percibieron que las moléculas integrantes de un gas estaban en continuo

movimiento, chocando entre sí y contra las paredes de su recipiente. El primer investigador que intentó explicar las propiedades de los gases desde ese ángulo visual fue el matemático suizo Daniel Bernoulli, en 1738, pero sus ideas se adelantaron a la época. Hacia mediados del siglo XIX, Maxwell y Boltzmann (pág. 97) elaboraron adecuadamente las fórmulas matemáticas y establecieron la «teoría cinética de los gases» («cinética» proviene de una palabra griega que significa «movimiento»). Dicha teoría mostró la equivalencia entre el calor y el movimiento de las moléculas. Así, pues, la teoría calórica del calor recibió un golpe mortal. Se interpretó el calor como un fenómeno de vibrabilidad; es decir, el movimiento de las moléculas en los gases y líquidos o su agitado temblor en los sólidos.

Cuando se calienta un sólido hasta que el agitado temblor se intensifica lo suficiente como para romper los lazos sustentadores entre moléculas vecinas, el sólido se funde y pasa al estado líquido. Cuanto más resistente sea la unión entre las moléculas vecinas de un sólido, tanto más calor se requerirá para hacerlas vibrar violentamente hasta romper dichos lazos. Ello significará que la sustancia tiene un punto muy elevado de fusión.

En el estado líquido, las moléculas pueden moverse libremente dentro de su medio. Cuando se calienta gradualmente el líquido, los movimientos de las moléculas son al fin lo bastante enérgicos para liberar las del cuerpo líquido y entonces éste hierve. Nuevamente el punto de ebullición será más elevado allá donde las fuerzas intermoleculares sean más potentes.

Al convertir un sólido en líquido, toda la energía calorífica se aplica a romper los lazos intermoleculares. De ahí que el calor absorbido por el hielo al derretirse no eleve la temperatura del hielo. Lo mismo cabe decir de un líquido cuando hierve.

Ahora ya podemos ver fácilmente la diferencia entre calor y temperatura. Calor es la energía total contenida en los movimientos moleculares de una determinada materia. Temperatura representa la velocidad promedio del movimiento molecular en esa materia. Así, pues, medio litro de agua a 60º C contiene dos veces más calor que un cuarto de agua a 60º C (están vibrando doble número de moléculas), pero el medio litro y el cuarto tienen idéntica temperatura, pues la velocidad promedio del movimiento molecular es el mismo en ambos casos.

Hay energía en la propia estructura de un compuesto químico, es decir, en las fuerzas aglutinantes que mantienen unidos los átomos o las moléculas a sus vecinos. Si esos lazos se rompen para recomponerse en nuevos lazos implicando menos energía, la energía sobrante se manifestará como calor, o luz, o ambas cosas. Algunas veces se libera la energía tan rápidamente que se produce una explosión.

Se ha hecho posible calcular la energía química contenida en una sustancia y mostrar cuál será la cantidad de calor liberada en una reacción determinada. Por ejemplo, la combustión del carbón entraña la ruptura de los lazos entre los átomos de carbono y entre los átomos de las moléculas de oxígeno, con los cuales se vuelve a combinar el carbono. Ahora bien, la energía de los lazos en el nuevo compuesto (dióxido de carbono) es inferior a la de los lazos en las sustancias originales que lo formaron. Esta diferencia mensurable se libera bajo la forma de calor y luz.

En la década de los años 1870, el físico norteamericano Josiah Willard Gibbs desarrolló con tal detalle la teoría de la «termodinámica química» que esta rama científica pasó súbitamente de la inexistencia virtual a la más completa madurez.

La enjundiosa tesis donde Gibbs expuso sus razonamientos superó con mucho a otras de cerebros norteamericanos, y, no obstante, fue publicada tras muchas vacilaciones en las *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences*. Incluso algún tiempo después sus minuciosos argumentos matemáticos y la naturaleza introvertida del propio Gibbs se combinaron para mantener oculto el tema bajo otros muchos documentos hasta que el físico y químico alemán Wilhelm Ostwald descubrió la tesis en 1883, la tradujo al alemán y proclamó ante el mundo la grandeza de Gibbs.

Como ejemplo de la importancia de ese trabajo baste decir que las ecuaciones Gibbs expusieron las reglas simples, pero rigurosas, bajo cuyo gobierno se establece el equilibrio entre sustancias diferentes que intervienen a la vez en más de una fase (por ejemplo, forma sólida y en solución, en dos líquidos inmiscibles y un vapor, etc.). Esta «regla de fases» es un soplo vital para la metalurgia y otras muchas ramas de la Química.

## Relación Masa-Energía

Con el descubrimiento de la radiactividad en 1896 (véase capítulo V) se planteó una nueva cuestión sobre energía. Las sustancias radiactivas uranio y torio desprendían partículas dotadas de sorprendente energía. Por añadidura, Marie Curie descubrió que el radio emitía incesantemente calor en cantidades sustanciales: una onza de radio proporcionaba 4.000 calorías por hora, y esa emisión se prolongaba hora tras hora, semana tras semana, década tras década. Ni la reacción química más energética conocida hasta entonces podía producir una millonésima parte de la energía liberada por el radio. Y aún había algo más sorprendente: a diferencia de las reacciones químicas, esa producción de energía no estaba asociada con la temperatura. ¡Proseguía sin variación a la muy baja temperatura del hidrógeno líquido como si ésta fuera una temperatura ordinaria!

Evidentemente había aparecido una especie insólita de energía sin relación alguna con la energía química. Por fortuna los físicos no tardaron mucho en conocer la respuesta. Una vez más la dio Einstein con su *Teoría especial de la relatividad*.

El tratamiento matemático einsteniano de la energía evidenció que se podía considerar la masa como una forma de energía, y por cierto muy concentrada, pues una ínfima cantidad de masa se convertía en inmensas cantidades de energía.

La ecuación de Einstein, relacionando masa y energía, figura hoy entre las más famosas del mundo. Dice así:

$$e = mc^2$$

Aquí,  $e$  representa la energía (en ergios);  $m$ , la masa (en gramos), y  $c$ , la velocidad de la luz (expresada en centímetros por segundo).

Puesto que la luz se traslada a treinta mil millones de centímetros por segundo, el valor de  $c^2$  es 900 mil millones de millones. Ello significa que la conversión de 1 g de masa en energía producirá 900.000 billones de ergios. El ergio es una pequeña unidad de energía inexpresable en términos corrientes, pero podemos imaginar su significado si sabemos que la energía contenida en 1 g de masa basta para mantener encendida una bombilla eléctrica de 1.000 W durante 2.850 años. O, expresándolo de otra forma, la conversión completa de 1 g de masa en energía dará un rendimiento equivalente al de 2.000 toneladas de gasolina.

La ecuación de Einstein destruyó una de las sagradas leyes científicas de conservación. En efecto, la «ley de conservación de masas», establecida por Lavoisier, decretaba que no se podía crear ni destruir la materia. A decir verdad, toda reacción química liberadora de energía transforma una pequeña cantidad de masa en energía: si pudiéramos pesar con absoluta precisión sus productos, la suma total de éstos no sería igual a la materia original. Pero la masa perdida en las reacciones químicas ordinarias es tan ínfima, que los químicos del siglo XIX no habrían podido detectarla con sus limitados procedimientos técnicos. Sin embargo, ahora los físicos afrontaron un fenómeno totalmente distinto: la reacción nuclear de la radiactividad, y no la reacción química del carbón combustible. Las reacciones nucleares liberaron tanta energía, que la pérdida de masa fue lo suficientemente grande como para hacer mediciones.

Abogando por el intercambio de masa y energía, Einstein fundió las leyes de conservación de energía y de masa en una sola ley: La conservación de masa-energía. La primera ley de termodinámica no sólo se mantuvo incólume, sino que fue también más inexpugnable que nunca.

Francis W. Aston confirmó experimentalmente la conversión de masa en energía mediante su espectrógrafo de masas. Éste podía medir con gran precisión la masa de núcleos atómicos tomando como base la magnitud de su deflexión por un campo magnético. Lo que realmente hizo Aston fue demostrar que los diversos núcleos no eran múltiplos exactos de las masas de neutrones y protones incorporados a su estructura.

Consideremos por un momento las masas de esos neutrones y protones. Durante un siglo se han medido generalmente las masas de átomos y partículas subatómicas dando por supuesto, como base, que el peso atómico del oxígeno es exactamente de 16,00000 (véase capítulo V). Sin embargo, en 1929, William Giauque demostró que el oxígeno estaba constituido por 3 isótopos: el oxígeno 16, el oxígeno 17 y el oxígeno 18, y que su peso atómico era el peso promedio de los números básicos de esos tres isótopos.

A buen seguro, el oxígeno 16 era el más abundante de los tres, con el 99,759 % en todos los átomos de oxígeno. Ello significaba que si el oxígeno tenía un peso atómico general de 16,00000, el isótopo oxígeno 16 debería tener un número

másico dé *casi* 16. (Las masas de las cantidades menores de oxígeno 17 y oxígeno 18 completaban el valor total, hasta 16.) Una generación después del descubrimiento, los químicos siguieron comportándose como si no existiera, ateniéndose a la antigua base, es decir, lo que se ha dado en llamar «pesos atómicos químicos».

Sin embargo, la reacción de los físicos fue distinta. Prefirieron asignar exactamente el valor 16,00000 a la masa del isótopo oxígeno 16 y determinar las restantes masas sobre tal base. Ésta permitiría especificar los «pesos atómicos físicos». Tomando, pues, como base el oxígeno 16 igual al patrón 16, el peso atómico del propio oxígeno, con sus indicios de isótopos más pesados, fue 16,0044. En general, los pesos atómicos físicos de todos los elementos serían un 0,027 % más elevados que los de sus sinónimos, los pesos atómicos químicos.

En 1961, los físicos y los químicos llegaron a un compromiso. Se acordó determinar los pesos atómicos sobre la base del isótopo carbono 12, al que se daría una masa de 12,00000. Así, los números atómicos se basaron en un número másico característico y adquirieron la mayor solidez fundamental posible. Por añadidura, dicha base mantuvo los pesos atómicos casi exactamente como eran antes con el antiguo sistema. Por ejemplo, sobre la base del carbono 12 igual al patrón 12, el peso atómico del oxígeno es 15,9994.

Bien. Comencemos entonces por el átomo del carbono 12, cuya masa es igual a 12,0000. Su núcleo contiene 6 protones y 6 neutrones. Por las medidas espectrográficas de masas resulta evidente que, sobre la base del carbono 12 igual al patrón 12, la masa del protón es 1,007825, y la de un neutrón, 1,008665. Así, pues, 6 protones deberán tener una masa de 6,046950 y 6 neutrones, 6,051990. Los 12 nucleones juntos tendrán una masa de 12,104940. Pero la masa del carbono 12 es 12,00000. ¿Dónde ha ido a parar esa fracción de 0,104940?

La masa desaparecida es el «defecto de masa», el cual, dividido por el número másico, nos da el defecto de masa por nucleón o la «fracción empaquetadora». Realmente la masa no ha desaparecido, claro está. Se ha convertido en energía según la ecuación Einstein y, por tanto, el defecto de masa es también la «energía aglutinadora» del núcleo. Para desintegrar el núcleo en protones y neutrones individuales se requiere una cantidad entrante de energía igual a la energía

aglutinadora, puesto que se deberá formar una cantidad de masa equivalente a esa energía.

Aston determinó la «fracción empaquetadora» de muchos núcleos, y descubrió que ésta aumentaba desde el hidrógeno hasta los elementos próximos al hierro y luego disminuía con lentitud en el resto de la tabla periódica. Dicho de otra forma: la energía aglutinadora por nucleón era más elevada en el centro de la tabla periódica. Ello significaba que la conversión de un elemento situado en un extremo u otro de la tabla en otro próximo al centro, debería liberar energía.

Tomemos por ejemplo el uranio 238. Este núcleo se desintegra mediante una serie de eslabones en plomo 206. Durante tal proceso emiten 8 partículas alfa. (También cede partículas beta, pero éstas son tan ligeras, que se las puede descartar.) Ahora bien, la masa del plomo a es 205,9745, y las 8 partículas alfa dan una masa total de 32,0208. Estos productos juntos totalizan 237,9953 de masa. Pero la del uranio 238, de donde proceden, es 238,0506. La diferencia o pérdida de masa es 0,0553. Esta pérdida de masa tiene la magnitud suficiente como para justificar la energía liberada cuando se desintegra el uranio.

Al desintegrarse el uranio en átomos todavía más pequeños, como le ocurre con la fisión, libera una cantidad mucho mayor de energía. Y cuando el hidrógeno se convierte en helio, tal como se encuentra en las estrellas, hay una pérdida fraccional aún mayor de masa y, consecuentemente, un desarrollo más rico de energía.

Por entonces, los físicos empezaron a considerar la equivalencia masa-energía como una contabilidad muy fiable. Citemos un ejemplo. Cuando se descubrió el positrón en 1934, su aniquilamiento recíproco con un electrón produjo un par de rayos gamma cuya energía fue precisamente, igual a la masa de las dos partículas. Por añadidura, se pudo crear masa con las apropiadas cantidades de energía. Un rayo gamma de adecuada energía, desaparecería en ciertas condiciones, para originar una «pareja electrón-positrón» creada con energía pura. Mayores cantidades de energía proporcionadas por partículas cósmicas o partículas expulsadas de sincrotones protón (véase capítulo VI), promoverían la creación de más partículas masivas, tales como mesones y antiprotones.

A nadie puede sorprender que cuando el saldo contable no cuadre, como ha ocurrido con la emisión de partículas beta poseedoras de una energía inferior a la esperada, los físicos inventen el neutrino para nivelar las cuentas de energía en vez de atropellar la ecuación Einstein (véase capítulo VI).

Y si alguien requiriera una prueba adicional sobre la conversión de masa en energía, bastaría con referirse a la bomba atómica, la cual ha remachado ese último clavo.

### Partículas y Ondas

En la década de los años veinte de nuestro siglo, el dualismo reinó sin disputa sobre la Física. Planck había demostrado que la radiación tenía carácter de partícula y onda a partes iguales. Einstein había demostrado que masa y energía eran dos caras de la misma moneda y que espacio y tiempo eran inseparables. Los físicos empezaban a buscar otros dualismos.

En 1923, el físico francés Louis-Victor de Broglie consiguió demostrar que así como una radiación tenía características de partículas, las partículas de materia tal como los electrones presentaban características de ondas. Las ondas asociadas a esas partículas, predijo De Broglie- tendrían una longitud inversamente proporcional al momento de la partícula. Las longitudes de onda asociadas a electrones de velocidad moderada deben hallarse, según calculó Broglie, en la región de los rayos X.

Hasta esa sorprendente predicción pasó a la Historia en 1927. Clinton Joseph Davisson y Lester Halbert Germer, de los «Bell Telephone Laboratories», bombardearon níquel metálico con electrones. Debido a un accidente de laboratorio que había hecho necesario el calentamiento del níquel durante largo tiempo, el metal había adoptado la forma de grandes cristales, una estructura ideal para los ensayos de difracción porque el espacio entre átomos en un cristal es comparable a las cortísimas longitudes de onda de los electrones. Y, efectivamente, los electrones, al pasar a través de esos cristales, no se comportaron *como* partículas, sino como ondas. La película colocada detrás del níquel mostró esquemas de interferencia, bandas alternativas opacas y claras, tal como habrían aparecido si hubieran sido rayos X y no electrones los que atravesaron el níquel.

Los esquemas de interferencias eran precisamente los que usara Young más de un siglo antes para probar la naturaleza ondulatoria de la luz. Ahora servían para probar la naturaleza ondulatoria de los electrones. Midiendo las bandas de interferencia se pudo calcular la longitud de onda asociada con los electrones, y esta longitud resultó ser de 1,65 unidades Ångström (casi exactamente lo que había previsto De Broglie).

Durante aquel mismo año, el físico británico George Paget Thomson, trabajando independientemente y empleando métodos diferentes, demostró asimismo que los electrones tienen propiedades ondulatorias.

De Broglie recibió el premio Nobel de Física en 1929; Davisson y Thomson compartieron ese mismo galardón en 1937.

El descubrimiento, totalmente inesperado, de ese nuevo dualismo, recibió casi inmediata aplicación en las observaciones microscópicas. Según he mencionado ya, los microscopios ópticos ordinarios pierden toda utilidad cuando se llega a cierto punto, porque hay un límite dimensional más allá del cual las ondas luminosas no pueden definir claramente los objetos. Cuanto más pequeños sean los objetos, más indistintos serán sus perfiles, pues las ondas luminosas empezarán a contornearlos, algo señalado, en primer lugar, por el físico alemán Ernst Karl Abbe en 1878-. (Por idéntica razón, la onda larga radioeléctrica nos transmite un cuadro borroso incluso de grandes objetos en el cielo.) Desde luego, el remedio consiste en buscar longitudes de onda más cortas para investigar objetos ínfimos. Los microscopios de luz corriente pueden distinguir dos franjas de 1/5.000 de milímetro, pero los microscopios de luz ultravioleta pueden distinguir franjas separadas de 1/10.000 de mm. Los rayos X serían más eficaces todavía, pero no hay lentes para rayos X. Sin embargo, se podría solventar este problema usando ondas asociadas con electrones que tienen más o menos la misma longitud de onda que los rayos X, pero se dejan manejar mucho mejor, pues, por lo pronto, un campo magnético puede curvar los «rayos electrónicos» porque las ondas se asocian con una partícula cargada.

Así como el ojo humano ve la imagen amplificada de un objeto si se manejan apropiadamente con lentes los rayos luminosos, una fotografía puede registrar la imagen amplificada de un objeto si se manejan apropiadamente con campos magnéticos las ondas electrónicas. Y como quiera que las longitudes de ondas

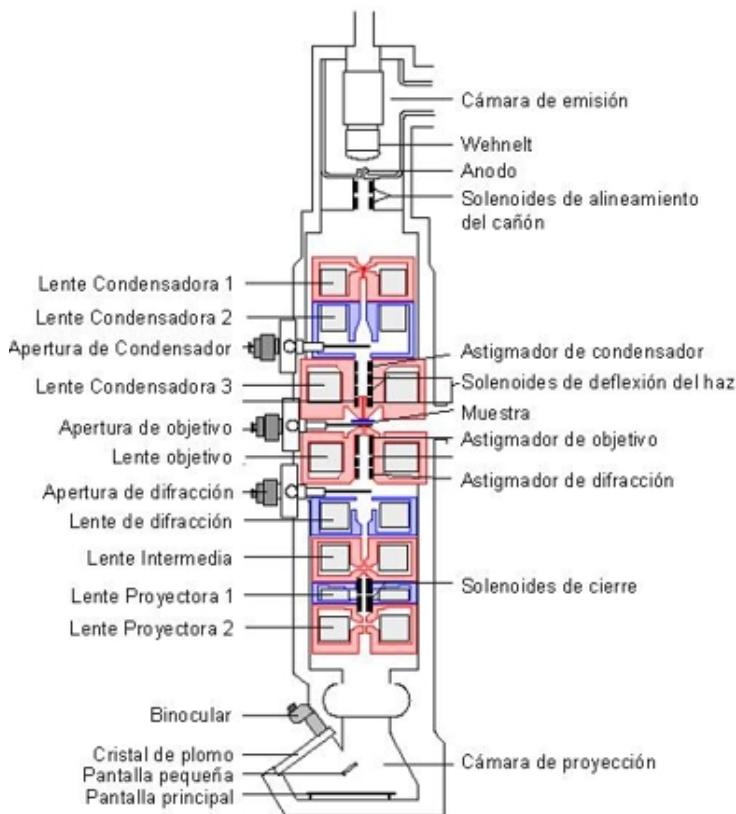
asociadas a los electrones son mucho más pequeñas que las de la luz ordinaria, es posible obtener con el «microscopio electrónico» una enorme amplificación, y, desde luego, muy superior a la del microscopio ordinario.

En 1932, Ernst Ruska y Max Knoll, de Alemania, construyeron un microscopio electrónico rudimentario, pero el primero realmente utilizable se montó, en 1937, en la Universidad de Toronto, y sus diseñadores fueron James Hillier y Albert F. Prebus. Aquel instrumento pudo ampliar 7.000 veces un objeto, mientras que los mejores microscopios ópticos tienen su máximo poder amplificador en la cota 2.000. Allá por 1939, los electrones microscópicos fueron ya asequibles comercialmente; más tarde, Hillier y otros diseñaron microscopios electrónicos con suficiente potencia para amplificar 350.000 veces un objeto.

Un «microscopio protónico», si se consiguiera construir tal cosa- proporcionaría amplificaciones mucho mayores que un microscopio electrónico, porque las ondas asociadas al protón son más cortas. En cierto, modo, el sincrotrón protónico es una especie de microscopio protónico pues escudriña el interior del núcleo con sus protones acelerados. Cuanto mayor es la velocidad de protón, tanto mayores su momento y tanto más corta la onda asociada a él. Los protones con una energía de 1 MeV pueden «ver» el núcleo, mientras que a 20 MeV «escrutan» ya el interior del núcleo. He aquí otra razón por la cual los físicos se empeñan en acumular el mayor número posible de electronvolts en sus aceleradores atómicos al objeto de «ver» con más claridad lo «ultradiminuto».

Nadie se habría sorprendido demasiado si ese dualismo partícula-onda funcionara a la inversa, de tal forma que los fenómenos conceptuados ordinariamente como de naturaleza ondulatoria tuvieran asimismo características corpusculares. Planck y Einstein habían mostrado ya que la radiación se componía de cuantos, los cuales, a su manera, son también partículas. En 1923, Compton, el físico que probaría la naturaleza corpuscular de los rayos cósmicos (véase capítulo VI), demostró que esos cuantos poseían algunas cualidades corpusculares comunes. Descubrió que los rayos X, al dispersarse en la materia, perdían y adquirían mayor longitud de onda. Eso era justamente lo que cabía esperar, de una radiación «corpuscular» que rebotara contra una materia corpuscular; la materia corpuscular recibe un impulso

hacia delante y gana energía, y el rayo X, al desviarse, la pierde. El «efecto Compton» contribuyó al establecimiento del dualismo onda-partícula.



*Diagrama del microscopio electrónico. El condensador magnético dirige los electrones en rayos paralelos. El objetivo magnético funciona como una lente convexa, produciendo una imagen amplificada que aumenta aún más el proyector magnético. La imagen se proyecta sobre una pantalla fluorescente de observación o placa fotográfica.*

Las ondas corpusculares dejaron entrever también importantes consecuencias para la teoría. Por lo pronto esclarecieron algunos enigmas sobre la estructura átomo.

En 1913, Niels Bohr había descrito el átomo de hidrógeno cual un núcleo central rodeado por un electrón que podía girar en torno suyo siguiendo cualquiera de diversas órbitas. Estas órbitas ocupaban posiciones fijas; cuando un electrón de hidrógeno pasaba de una órbita externa a otra, interna, perdía energía, que luego era emitida en forma de un cuanto de longitud de onda fija. Si el electrón se movía de una órbita interna a otra externa, absorbía un cuanto de energía, pero sólo uno de longitud de onda y tamaño específicos, es decir, lo suficiente para hacerle

moverse en la medida adecuada. Esa era la razón que el hidrógeno pudiera absorber o emitir sólo radiaciones de determinadas longitudes de onda, produciendo rayas características en el espectro. El esquema de Bohr, cuya complejidad se acentuó paulatinamente durante la siguiente década, evidenció suma utilidad para explicar muchos hechos sobre el espectro de varios elementos. Esta teoría le valió a Bohr el premio Nobel de Física en 1922. Los físicos alemanes James Franck y Gustav Hertz (este último, sobrino de Heinrich Hertz), cuyos estudios sobre las colisiones entre átomos y electrones dieron unos fundamentos experimentales a las teorías de Bohr- compartieron el premio Nobel de Física en 1925.

Bohr no supo explicar por qué las órbitas ocupaban posiciones fijas. Se limitó a elegir las órbitas que dieran resultados correctos respecto a la absorción y emisión de las longitudes de ondas luminosas sometidas a observación.

En 1926, el físico alemán Erwin Schrödinger decidió echar otra ojeada al átomo inspirándose en la teoría de De Broglie sobre la naturaleza ondulatoria de las partículas. Considerando el electrón como una onda, se dijo que éste no giraba alrededor del núcleo como lo hace un planeta alrededor del Sol, sino constituyendo una onda, que se curvaba alrededor del núcleo de tal forma que estaba a un tiempo, por así decirlo, en todas las partes de su órbita. Resultó que, tomando como base la longitud de onda predicha por De Broglie para un electrón, un número entero de ondas electrónicas se ajustaba exactamente a las órbitas delineadas por Bohr. Entre estas órbitas, las ondas no se ajustaron en un número entero, sino que se incorporaron «desfasadas», y tales órbitas carecieron de estabilidad. Schrödinger ideó una descripción matemática del átomo, denominada «mecánica ondulatoria» o «mecánica cuántica», un método bastante más satisfactorio que el sistema de Bohr, para contemplar el átomo. Schrödinger compartió el premio Nobel de Física en 1933 con Dirac, quien concibiera la teoría de las antipartículas (véase capítulo VI) y contribuyera al desarrollo de ese nuevo panorama del átomo. El físico alemán Max Born, que coadyuvó al desarrollo matemático de la mecánica cuántica, compartió el premio Nobel de Física en 1954 (con Bothe).

Por aquellas fechas, el electrón se había convertido en una «partícula» bastante difusa. Y esa ambigüedad habría de empeorar muy pronto. Werner Heisenberg, de

Alemania, planteó una profunda cuestión, que casi proyectó las partículas y la propia Física al reino de lo incognoscible.

Heisenberg había presentado su propio modelo de átomo renunciando a todo intento de describir el átomo como un compuesto de partículas y ondas. Pensó que estaba condenado al fracaso cualquier intento de establecer analogías entre la estructura atómica y la estructura del mundo. Prefirió describir los niveles de energía u órbitas de electrones en términos numéricos puros, sin la menor traza de esquemas. Como quiera que usó un artificio matemático denominado «matriz» para manipular sus números, el sistema se denominó «mecánica de matriz».

Heisenberg recibió el premio Nobel de Física en 1932 por sus aportaciones a la mecánica cuántica, pero su sistema «matriz» fue menos popular entre los físicos que la mecánica ondulatoria de Schrödinger, pues esta última pareció tan útil como las abstracciones de Heisenberg, y siempre es difícil, incluso para un físico, desistir de representar gráficamente las propias ideas.

Hacia 1944, los físicos parecieron dispuestos a seguir el procedimiento más correcto, pues el matemático húngaro-estadounidense John von Neumann expuso una línea argumental que pareció evidenciar la equivalencia matemática entre la mecánica matriz y la mecánica ondulatoria. Todo cuanto demostraba la una, lo podía demostrar igualmente la otra. ¿Por qué no elegir, pues, la versión menos abstracta? (No obstante, en 1964 Dirac se preguntó si existía realmente tal equivalencia. Él cree que no, y se inclina por Heisenberg contra Schrödinger: las matrices con prioridad sobre las ondas.)

Una vez presentada la mecánica matriz (para dar otro salto atrás en el tiempo), Heisenber pasó a considerar un segundo problema: cómo describir la posición de la partícula. ¿Cuál es el procedimiento indicado para determinar dónde está una partícula? La respuesta obvia es ésta: observarla. Pues bien, imaginemos un microscopio que pueda hacer visible un electrón. Si lo queremos ver debemos proyectar una luz o alguna especie de radiación apropiada sobre él. Pero un electrón es tan pequeño, que bastaría un solo fotón de luz para hacerle cambiar de posición apenas lo tocara, y en el preciso instante de medir su posición, alteraríamos ésta.

Este es un fenómeno bastante frecuente en la vida ordinaria. Cuando medimos la presión de un neumático con un manómetro, dejamos escapar algo de aire y, por

tanto, cambiamos la presión ligeramente en el mismo acto de medirla. Asimismo, cuando metemos un termómetro en la bañera para medir la temperatura del agua, el termómetro cambia levemente esa temperatura al absorber calor. Un contador de corriente eléctrica roba un poco de corriente para mover la manecilla sobre la esfera. Y así ocurre siempre en cada medida que tomemos.

Sin embargo, el cambio del sujeto es tan ínfimo en todas nuestras mediciones ordinarias, que podemos despreciarlo. Ahora bien, la situación varía mucho cuando intentamos calibrar el electrón. Aquí nuestro artificio medidor es por lo menos tan grande como el objeto que medimos; y no existe ningún agente medidor más pequeño que el electrón. En consecuencia, nuestra medición debe surtir, sin duda, un efecto nada desdeñable, un efecto más bien decisivo en el objeto medido. Podríamos detener el electrón y determinar así su posición en un momento dado. Pero si lo hicieramos, no sabríamos cuál es su movimiento ni su velocidad. Por otra parte, podríamos gobernar su velocidad, pero entonces no podríamos fijar su posición en un momento dado.

Heisenberg demostró que no nos será posible idear un método para localizar la posición de la partícula subatómica mientras no estemos dispuestos a aceptar la incertidumbre en relación con su movimiento exacto. Y, a la inversa, no hay medio de precisar el movimiento exacto de una partícula, mientras no se acepte la incertidumbre absoluta respecto a su posición exacta. Es un imposible calcular ambos datos con exactitud al mismo tiempo.

Siendo así, no podrá haber una ausencia completa de energía ni en el cero absoluto siquiera. Si la energía alcanzara el punto cero y las partículas quedaran totalmente inmóviles, sólo sería necesario determinar su posición, puesto que la velocidad equivaldría a cero. Por tanto, sería de esperar, que subsistiera alguna «energía residual del punto cero», incluso en el cero absoluto, para mantener las partículas en movimiento y también, por así decirlo, nuestra incertidumbre. Esa energía «punto cero» es lo que no se puede eliminar, lo que basta para mantener líquido el helio incluso en el cero absoluto (véase capítulo V).

En 1930, Einstein demostró que el principio de incertidumbre, donde se afirma la imposibilidad de reducir el error en la posición sin incrementar el error en el momento- implicaba también la imposibilidad de reducir el error en la medición de

energía sin acrecentar la incertidumbre del tiempo durante el cual se toma la medida. Él creyó poder utilizar esta tesis como trampolín para refutar el principio de incertidumbre, pero Bohr procedió a demostrar que la refutación tentativa de Einstein era errónea.

A decir verdad, la versión de la incertidumbre, según Einstein, resultó ser muy útil, pues significó que en un proceso subatómico se podía violar durante breves lapsos la ley sobre conservación de energía siempre y cuando se hiciese volver todo al estado de conservación cuando concluyesen esos períodos: cuanto mayor sea la desviación de la conservación, tanto más breves serán los intervalos de tiempo tolerables. Yukawa aprovechó esta noción para elaborar su teoría de los piones (véase capítulo VI). Incluso posibilitó la elucidación de ciertos fenómenos subatómicos presuponiendo que las partículas nacían de la nada como un reto a la energía de conservación, pero se extinguían antes del tiempo asignado a su detección, por lo cual eran sólo «partículas virtuales». Hacia fines de la década 1940-1950, tres hombres elaboraron la teoría sobre esas partículas virtuales: fueron los físicos norteamericanos Julian Schwinger y Richard Phillips Feynman y el físico japonés Sinitiro Tomonaga. Para recompensar ese trabajo, se les concedió a los tres el premio Nobel de Física en 1965.

El «principio de incertidumbre» afectó profundamente al pensamiento de los físicos y filósofos, ejerció una influencia directa sobre la cuestión filosófica de «causalidad» (es decir, la relación de causa y efecto). Pero sus implicaciones para la Ciencia no son las que se suponen por lo común. Se lee a menudo que el principio de incertidumbre anula toda certeza acerca de la naturaleza y muestra que, al fin y al cabo, la Ciencia no sabe ni sabrá nunca hacia dónde se dirige, que el conocimiento científico está a merced de los caprichos imprevisibles de un Universo donde el efecto no sigue necesariamente a la causa. Tanto si esta interpretación es válida desde el ángulo visual filosófico como si no, el principio de incertidumbre no ha conmovido la actitud del científico ante la investigación. Si, por ejemplo, no se puede predecir con certeza el comportamiento de las moléculas individuales en un gas, también es cierto que las moléculas suelen acatar ciertas leyes, y su conducta es previsible sobre una base estadística, tal como las compañías aseguradoras

calculan con índices de mortalidad fiables, aunque sea imposible predecir cuándo morirá un individuo determinado.

Ciertamente, en muchas observaciones científicas, la incertidumbre es tan insignificante comparada con la escala correspondiente de medidas, que se la puede descartar para todos los propósitos prácticos. Uno puede determinar simultáneamente la posición y el movimiento de una estrella, o un planeta, o una bola de billar, e incluso un grano de arena con exactitud absolutamente satisfactoria.

Respecto a la incertidumbre entre las propias partículas subatómicas, cabe decir que no representa un obstáculo, sino una verdadera ayuda para los físicos. Se la ha empleado para esclarecer hechos sobre la radiactividad, sobre la absorción de partículas subatómicas por los núcleos, así como otros muchos acontecimientos subatómicos, con mucha más racionabilidad de lo que hubiera sido posible sin el principio de incertidumbre.

El principio de incertidumbre significa que el Universo es más complejo de lo que se suponía, pero no irracional.

## Capítulo 8

### LA MÁQUINA

#### **Fuego y Vapor**

La primera ley de la Termodinámica dice que no se puede crear energía de la nada. Pero ninguna ley impide convertir cierta forma de energía en otra. La civilización humana se ha erigido sobre los sucesivos hallazgos de nuevas fuentes energéticas y su encauzamiento por caminos cada vez más eficaces y perfeccionados. De hecho, los mayores descubrimientos en la historia de la Humanidad entrañaron métodos para convertir en calor y luz la energía química de un combustible como la madera, por ejemplo.

Hace quizá medio millón de años, nuestros antepasados «descubrieron» el fuego. Sin duda habían ya visto mucho antes las zarzas incendiadas por el rayo y los bosques en llamas... y procurarían ponerse a salvo. Es decir, el descubrimiento de sus virtudes no llegó hasta que la curiosidad se sobrepuso al temor. Algún hombre primitivo debió de sentirse atraído por los restos de tales incendios, unas ascuas ardiendo débilmente, y se distraería con ellas echándole ramas secas y viendo cómo danzaban las llamas. Y, al llegar la noche, apreciaría la luz y el calor del fuego, así como su eficaz acción contra las fieras. Algún día debió de aprender a hacer fuego frotando dos palos, al objeto de utilizar éste con mayor facilidad y seguridad para caldear su campamento o caverna, o asar las piezas cobradas, haciendo así más gustosa y masticable la carne.

El fuego proporcionó al hombre unas reservas prácticamente inagotables de energía, y por ello es considerado como el mayor descubrimiento de la Humanidad... el que elevó al hombre sobre su primitivo nivel de animal. Sin embargo, y aunque parezca extraño, hubieron de transcurrir muchos milenios, en realidad hasta la Revolución Industrial- para que el hombre discerniera una pequeña parte de sus inmensas posibilidades. Lo empleó para calentar e iluminar su hogar, para cocinar sus alimentos, trabajar los metales, hacer cacharros de barro o vidrio... pero, más o menos, a eso se redujo todo.

Entre tanto fueron descubiertas otras fuentes de energía. Algunas de las más importantes se desarrollaron durante las llamadas «Edades tenebrosas». En la Edad

Media, el hombre empezó a quemar en sus hornos metalúrgicos esa roca negra llamada carbón, a dominar el viento con molinos, emplear molinos de agua para triturar el grano, aprovechar la energía magnética con la brújula y utilizar explosivos con finalidades bélicas.

Allá por el año 670 d. de J.C., un alquimista sirio, Calínico, inventó, según se cree, el «fuego griego», una primitiva bomba incendiaria de azufre y nafta, a la que se atribuye la salvación de Constantinopla cuando los musulmanes le pusieron sitio por primera vez. La pólvora llegó a Europa en el siglo XIII. Roger Bacon la describió hacia el año 1280, pero ya se la conocía en Asia desde muchos siglos atrás, y tal vez se introdujera en Europa con las invasiones mogólicas iniciadas el año 1240. Sea como fuere, la artillería cual arma de fuego llegó a Europa en el siglo XIV y se supone que los cañones hicieron su primera aparición en la batalla de Crécy, el año 1346.

El más importante de los inventos medievales es el atribuido al alemán Johann Gutenberg. Hacia 1450, Gutenberg creó el primer tipo móvil, y, con él, hizo de la imprenta una poderosa fuerza de comunicación y propaganda. También fabricó la tinta de imprenta, en la que el negro de humo estaba disuelto en aceite de linaza y no, como hasta entonces, en agua. Esto, junto con la sustitución del pergamino por el papel (invento, según la tradición- de un eunuco chino. Ts'ai Lun, el año 50 d. de J.C., que llegó a la Europa moderna por conducto árabe en el siglo XIII), posibilitó la producción a gran escala y distribución de libros y otro material escrito. Ninguna otra invención anterior a los tiempos modernos se adoptó tan rápidamente. Una generación después del descubrimiento se habían impreso ya 40.000 libros.

Los conocimientos documentales del género humano no estuvieron ya ocultos en las colecciones reales de manuscritos, sino que fueron accesibles en las bibliotecas para todos quienes supieran leer. Los folletos crearon y dieron expresión a la opinión pública. (La imprenta tuvo una gran participación en el éxito de la revuelta de Martín Lutero contra el Papado, que, de otra forma, hubiera sido simplemente un litigio privado.) Y también ha sido la imprenta, como todos sabemos, uno de los instrumentos que han hecho de la Ciencia lo que hoy es. Esta herramienta indispensable entrañaba una vasta divulgación de ideas. Hasta entonces, la Ciencia había sido un asunto de comunicaciones personales entre unos cuantos aficionados;

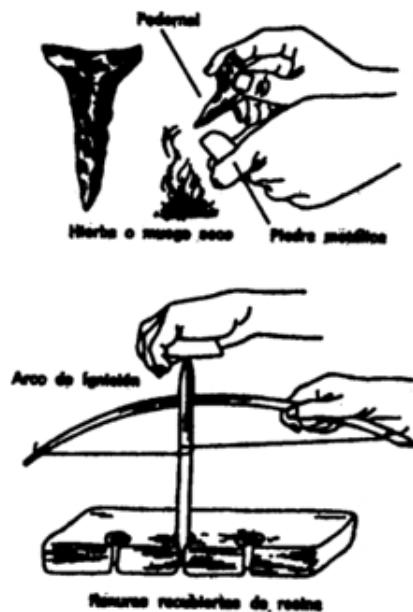
pero, desde aquellas fechas, un campo principalísimo de actividad que alistó cada vez más trabajadores, suscitó el ensayo crítico e inmediato de las teorías y abrió sin cesar nuevas fronteras.

La subordinación de la energía al hombre alcanzó su momento trascendental hacia fines del siglo XVII, aunque ya se habían manifestado algunos indicios tímidos en los tiempos antiguos. El inventor griego Herón de Alejandría, construyó, durante los primeros siglos de la Era cristiana (no se puede siquiera, situar su vida en un siglo concreto), cierto numero de artificios movidos por la fuerza del vapor. Empleó la expansión del vapor para abrir puertas de templos, hacer girar esferas, etc. El mundo antiguo cuya decadencia se acentuaba ya por entonces, no pudo asimilar esos adelantos prematuros.

Quince siglos después, se ofreció la segunda oportunidad a una sociedad nueva en vías de vigorosa expansión. Fue producto de una necesidad cada vez más apremiante: bombear agua de las minas, cuya profundidad crecía sin cesar. La antigua bomba aspirante de mano (véase capítulo IV) empleó el vacío para elevar el agua; y, a medida que progresaba el siglo XVII, los hombres comprendieron mejor el inmenso poder del vacío (o, más bien, la fuerza que ejerce la presión del aire en el vacío).

Por ejemplo, en 1650, el físico alemán (alcalde de Magdeburgo) Otto von Guericke, inventó una bomba de aire accionada por la fuerza muscular. Montó dos hemisferios metálicos unidos por un conducto y empezó a extraer el aire de su interior con una bomba aplicada a la boquilla de un hemisferio. Cuando la presión del aire interior descendía, la presión atmosférica, falta de equilibrio, unía los hemisferios con fuerza siempre creciente. Por último, dos troncos de caballos tirando en direcciones opuestas no pudieron separar los hemisferios, pero cuando se daba otra vez entrada al aire, éstos se separaban por sí solos.

Se efectuó ese experimento ante personajes muy importantes, incluyendo en cierta ocasión al propio emperador alemán. Causó gran sensación. Entonces, a varios inventores se les ocurrió una idea: ¿Por qué no usar el vapor en lugar de la fuerza muscular para crear el vacío?



*Métodos primitivos para hacer fuego*

Suponiendo que se llenara un cilindro (o algún recipiente similar) con agua, y se la calentara hasta hacerla hervir, el vapor ejercería presión sobre el agua. Si se enfriara el recipiente, por ejemplo, haciendo caer agua fría en la superficie externa, el vapor dentro del recipiente se condensaría en unas cuantas gotas y formaría un vacío virtual. Entonces se podría elevar el agua cuya extracción se pretendía (por ejemplo, el caso de la mina inundada), haciéndola pasar por una válvula a dicho recipiente vacío.

El ingeniero militar inglés Thomas Savery fue quien materializó por primera vez esa idea para aplicarla a un artificio funcional. Su «ingenio de vapor» (la palabra «ingenio» se aplicó originalmente a todo artificio mecánico) sirvió para extraer agua de minas y pozos o mover una rueda hidráulica, llamándolo él, por tal razón, *El amigo del minero*. Pero resultaba peligroso (porque la alta presión del vapor solía hacer reventar calderas o tuberías) y poco eficaz (porque se perdía el calor del vapor cada vez que se enfriaba el recipiente). Siete años después, en 1698, Savery patentó su ingenio, y un herrero inglés llamado Thomas Newcomen construyó una máquina más perfecta que funcionaba a bajas presiones; tenía pistón y cilindro, empleándose la presión del aire para mover hacia abajo el pistón.

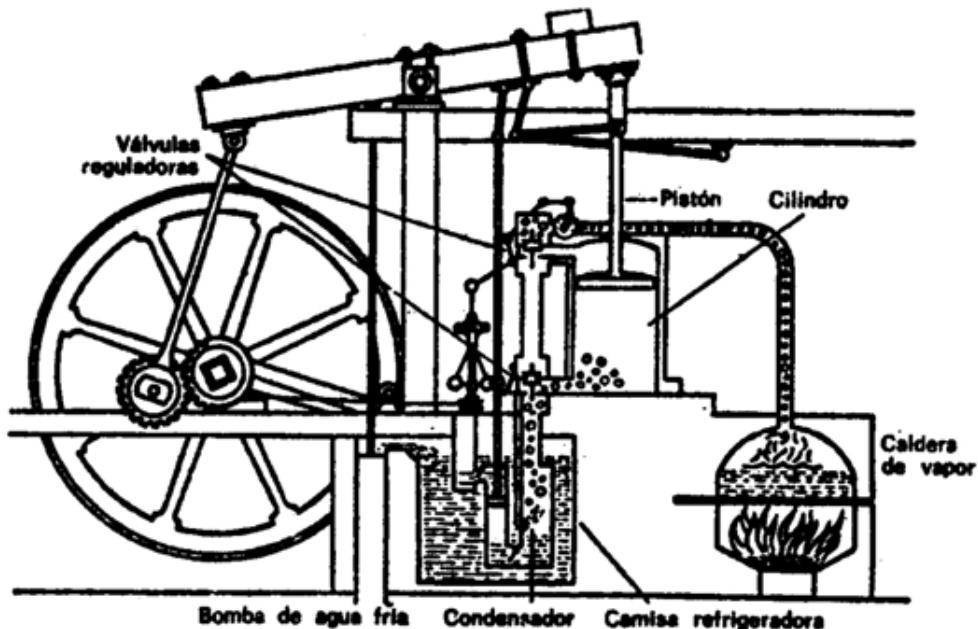
Tampoco fue muy eficiente el ingenio de Newcomen, y el ingenio de vapor siguió siendo un artilugio secundario durante más de sesenta años, hasta que un mecánico de precisión escocés, llamado James Watt, ideó el medio de darle efectividad. Lo contrató la Universidad de Glasgow para diseñar un nuevo modelo del ingenio Newcomen, cuyo funcionamiento dejaba mucho que desear. Watt comenzó a cavilar sobre la pérdida inútil de combustible. ¿Por qué se creía necesario enfriar cada vez el recipiente de vapor? ¿Por qué no mantener siempre caliente la cámara de vapor y conducir éste hasta otra cámara condensadora mantenida a baja temperatura? Watt introdujo varias mejoras más: se aprovechó la presión de vapor para mover el pistón, se diseñó una serie de conexiones mecánicas para mantener en línea recta el movimiento del pistón, se enlazó este movimiento alternativo con un cigüeñal que hacía girar a una rueda, y así sucesivamente. En 1782, su máquina de vapor, rindiendo con una tonelada de carbón tres veces mas que la de Newcomen, quedó lista para prestar servicio como caballo universal de fuerza.

En épocas ulteriores se acrecentó sin cesar la eficiencia de la máquina Watt, principalmente mediante la aplicación de vapor cada vez más caliente a presiones cada vez más altas. El invento de la Termodinámica por Carnot (véase capítulo VII) se debió principalmente a la percepción que el rendimiento máximo de cualquier máquina térmica era proporcional a la diferencia de temperatura entre el depósito caldeado (vapor en los casos ordinarios) y el frío.

La primera aplicación de la máquina de vapor con fines más espectaculares que el drenaje de minas fue la navegación marítima. En 1787, el inventor estadounidense John Fitch construyó el primer vapor funcional, pero su aventura fue un fracaso financiero, y Fitch murió olvidado sin conocer el merecido crédito. Robert Fulton, un promotor más capacitado que él, botó en 1807 su barco de vapor, el *Clermont*, con tanto alarde y publicidad, que se le consideró el inventor del barco de vapor aunque, realmente, fuera al constructor de esa primera nave tanto como Watt pudiera haberlo sido de la primera máquina de vapor.

Tal vez sería preferible recordar a Fulton por sus tenaces tentativas para construir sumergibles. Sus naves submarinas no fueron prácticas, pero sí precursoras de varios proyectos modernos. Construyó una, llamada *Nautilus*, que, probablemente, inspiró a Julio Verne para imaginar aquel sumergible fantástico del mismo nombre

en la obra *Veinte mil leguas de viaje submarino*, publicada el año 1870. Éste, a su vez, sirvió de inspiración para bautizar al primer submarino nuclear (véase capítulo I).



Máquina de vapor de Watt

A partir de 1830, los barcos de vapor cruzaron ya el Atlántico propulsados por hélices, una mejora considerable en comparación con las ruedas laterales de palas. Y en 1850 los veloces y bellos *Yankee Clippers* empezaron a arriar definitivamente sus velas para ser remplazados por vapores en todas las marinas mercantes y de guerra del mundo.

Mientras tanto, la máquina de vapor empezaba a dominar el transporte terrestre. En 1814, el inventor inglés George Stephenson, quien debió mucho a los trabajos precedentes de un ingeniero inglés, Richard Trevithick- construyó la primera locomotora funcional de vapor. El movimiento alternativo de los pistones movidos a vapor pudo hacer girar las ruedas metálicas sobre los rieles tal como había hecho girar antes las ruedas de palas en el agua. Y, allá por 1830, el fabricante americano Peter Cooper construyó la primera locomotora comercial de vapor en el hemisferio occidental. Por primera vez en la Historia, los viajes terrestres estuvieron al mismo nivel que los marítimos, y el comercio tierra adentro pudo competir con el tráfico

marítimo. En 1840, la vía férrea alcanzó el río Mississippi, y en 1869, la superficie entera de los Estados Unidos quedó cubierta por una red ferroviaria.

Los inventores británicos marcaron también la pauta introduciendo el ingenio en las fábricas para mover su maquinaria. Con esa «revolución industrial» (término ideado en 1837 por el economista francés Jérôme-Adolphe Blanqui), el hombre culminó su transición del empleo de la fuerza muscular al de la fuerza mecánica.

## Electricidad

Si consideramos la naturaleza de las cosas, la máquina de vapor es aplicable sólo a la producción de fuerza en gran escala y continua. No puede proporcionar eficazmente pequeños impulsos de energía, ni obedecer, con carácter intermitente, al hecho de presionar un botón: sería un absurdo una «minúscula» máquina de vapor cuyo fuego se encendiera y apagara a voluntad. Pero la misma generación que presenciará el desarrollo de esa máquina, asistió también al descubrimiento de un medio para convertir la energía en la forma que acabamos de mencionar: una reserva permanente de energía, dispuesta para su entrega inmediata en cualquier lugar y en cantidades pequeñas o grandes, oprimiendo un botón. Como es natural, dicha forma es la electricidad.

El filósofo griego Tales de Mileto (en 600 a. de J.C.) observó que una resina fósil descubierta en las playas del Báltico, a la cual nosotros llamamos ámbar y ellos denominaban *elektron*, tenía la propiedad de atraer plumas, hilos o pelusa cuando se la frotaba con un trozo de piel. El inglés William Gilbert, investigador del magnetismo (véase capítulo III) fue quien sugirió que se denominara «electricidad» a esa fuerza, nombre que recordaba la palabra griega *elektron*. Gilbert descubrió que, además del ámbar, otras materias, tales como el cristal, adquirían propiedades eléctricas con el frotamiento.

En 1733, el químico francés Charles-Francis de Cisternay du Fay descubrió que cuando se magnetizaban, mediante el frotamiento, dos varillas de ámbar o cristal, ambas se repelían. Y, sin embargo, una varilla de vidrio atraía a otra de ámbar igualmente electrificada. Y, si se las hacía entrar en contacto, ambas perdían su carga eléctrica. Entonces descubrió que ello evidenciaba la existencia de dos electricidades distintas: «vitreas» y «resinosas».

El erudito americano Benjamin Franklin, a quien le interesaba profundamente la electricidad, adujo que se trataba de un solo fluido. Cuando se frotaba el vidrio, la electricidad fluía hacia su interior «cargándolo positivamente»; por otra parte, cuando se frotaba el ámbar, la electricidad escapaba de él, dejándolo «cargado negativamente». Y cuando una varilla negativa establecía contacto con otra positiva, el fluido eléctrico pasaba de la positiva a la negativa hasta establecer un equilibrio neutral.

Aquello fue una deducción especulativa notablemente aguda. Si sustituimos el «fluido» de Franklin por la palabra electrón e invertimos la dirección del flujo (en realidad, los electrones fluyen del ámbar al vidrio), esa conjetura es correcta en lo esencial.

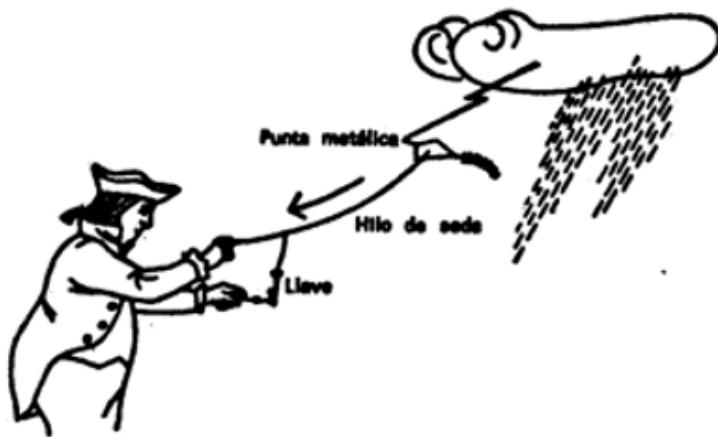
El inventor francés J.-T. Desaguliers propuso, en 1740, que se llamara «conductores» a las sustancias a cuyo través circulaba libremente el fluido eléctrico (por ejemplo, los metales), y «aislantes», a aquéllas a cuyo través no podían moverse libremente (por ejemplo, el vidrio y el ámbar).

Los experimentadores observaron que se podía acumular gradualmente una gran carga eléctrica en un conductor si se le aislaban con vidrio o una capa de aire para evitar la pérdida de electricidad. El artificio más espectacular de esta clase fue la «botella de Leiden». La ideó, en 1745, el profesor alemán E. Georg von Kleist, pero se le dio aplicación por primera vez en la Universidad de Leiden (Holanda), donde la construyó más tarde, independientemente, el profesor holandés Peter van Musschenbroek. La botella de Leiden es una muestra de lo que se llama hoy día «condensador», es decir, dos superficies conductoras separadas por una capa aislante de poco grosor, y en cuyo interior se puede almacenar cierta cantidad de carga eléctrica.

En el caso de la botella de Leiden, la carga se forma en el revestimiento de estaño alrededor del frasco, por conducto de una varilla metálica (latón), que penetra en el frasco atravesando un tapón. Cuando se toca esta botella cargada, se recibe un electroshock. La botella de Leiden puede producir también una chispa. Naturalmente, cuanto mayor sea la carga de un cuerpo, tanto mayor será su tendencia a escapar. La fuerza que conduce a los electrones desde el área de máxima concentración («polo negativo») hacia el área de máxima deficiencia («polo

positivo») se llama «fuerza electromotriz» (f.e.m.) o «potencial eléctrico». Si el potencial eléctrico se eleva lo suficiente, los electrones franquearán incluso el vacío aislador entre los polos negativos y positivos. Entonces cruzan el aire produciendo una chispa brillante acompañada de crepitación. El chisporroteo lo produce la radiación resultante de las colisiones entre innumerables electrones y moléculas del aire; el ruido lo origina la expansión del aire al caldearse rápidamente, seguida por la irrupción de aire más fresco en el momentáneo vacío parcial.

Naturalmente, muchos se preguntaron si el rayo y el trueno no serían un fenómeno similar, aunque de grandes proporciones- al pequeño espectáculo representado por la botella de Leiden. Un erudito británico, William Wall, lo sugirió así en 1708. Esta sugerencia fue un acicate suficiente para suscitar el famoso experimento de Benjamin Franklin en 1752. El cometa que lanzó en medio de una borrasca llevaba un alambre puntiagudo, al cual se unió un hilo de seda para conducir hacia abajo la electricidad de las nubes tormentosas. Cuando Franklin acercó la mano a una llave metálica unida al hilo de seda, ésta soltó chispas. Franklin la cargó otra vez en las nubes, y luego la empleó para cargar la botella de Leiden, consiguiendo así una carga idéntica a la obtenida por otros procedimientos. De esta manera, Franklin demostró que las nubes tormentosas estaban cargadas de electricidad, y que tanto el trueno como el rayo eran los efectos de una botella de Leiden celeste en la cual las nubes actuaban como un polo, y la tierra, como otro.



*Experimento de Franklin*

Lo más afortunado de este experimento, según la opinión del propio Franklin- fue que él sobrevivió a la prueba. Otros que también lo intentaron, resultaron muertos, pues la carga inducida en el alambre puntiagudo del cometa se acumuló hasta el punto de transmitir una descarga de alto voltaje al cuerpo del individuo que sujetaba el cometa.

Franklin completó en seguida esta investigación teórica con una aplicación práctica. Ideó el «pararrayos», que fue simplemente una barra de hierro situada sobre el punto más alto de una edificación y conectada con alambre a tierra; su puntiagudo extremo canalizaba las cargas eléctricas de las nubes, según demostró experimentalmente Franklin, y cuando golpeaba el rayo, la carga se deslizaba hasta el suelo sin causar daño.

Los estragos ocasionados por el rayo disminuyeron drásticamente tan pronto como esas barras se alzaron sobre los edificios de toda Europa y las colonias americanas... No fue un flaco servicio. Sin embargo, hoy siguen llegando a la tierra dos mil millones de rayos por año, matando a veinte personas y causando ochenta heridos cada día (según rezan las estadísticas).

El experimento de Franklin tuvo dos efectos electrizantes (pido perdón por el retruécano). En primer lugar, el mundo se interesó súbitamente por la electricidad. Por otra parte, las colonias americanas empezaron a contar en el aspecto cultural. Por primera vez, un americano evidenció la suficiente capacidad científica como para impresionar a los cultos europeos del enciclopedismo. Veinticinco años después, cuando, en busca de ayuda, Franklin representó a los incipientes Estados Unidos en Versalles, se ganó el respeto de todos, no sólo como enviado de una nueva República, sino también como el sabio que había domado el rayo, haciéndole descender humildemente a la tierra. Aquel cometa volador coadyuvó no poco al triunfo de la Independencia americana.

A partir de los experimentos de Franklin, la investigación eléctrica avanzó a grandes zancadas. En 1785, el físico francés Charles-Augustin de Coulomb realizó mediciones cuantitativas de la atracción y repulsión eléctricas. Demostró que esa atracción (o repulsión) entre cargas determinadas varía en proporción inversa al cuadrado de la distancia. En tal aspecto la atracción eléctrica se asemejaba a la

atracción gravitatoria. Para conmemorar permanentemente este hallazgo, se adoptó la palabra «coulomb» para designar una unidad práctica de cantidad de electricidad. Poco después, el estudio de la electricidad tomó un giro nuevo, sorprendente y muy fructífero. Hasta ahora sólo hemos examinado, naturalmente, la «electricidad estática». Ésta se refiere a una carga eléctrica que se almacena en un objeto y permanece allí. El descubrimiento de la carga eléctrica móvil, de las corrientes eléctricas o la «electricidad dinámica» empezó con el anatomicista italiano Luigi Galvani. En 1791, éste descubrió por casualidad, cuando hacía la disección de una rana, que las ancas se contraían si se las tocaba simultáneamente con dos metales diferentes (de aquí el verbo «galvanizar»).

Los músculos se contraían como si los hubiera estimulado una chispa eléctrica de la botella de Leiden y, por tanto, Galvani conjeturó que esos músculos contenían algo de lo que él llamaba «electricidad animal». Otros, sin embargo, sospecharon que el origen de esa carga eléctrica podría estribar en el encuentro entre dos metales más bien que en el músculo. Hacia 1800, el físico italiano Alessandro Volta estudió las combinaciones de metales desemejantes, no conectados por tejidos musculares, sino por simples soluciones.

Comenzó usando cadenas de metales desemejantes enlazándolas mediante cuencos llenos a medias de agua salada. Para evitar el excesivo derramamiento de líquido, preparó pequeños discos de cobre y cinc, apilándolos alternativamente; también empleó discos de cartón humedecidos con agua salada, de modo que su «pila voltaica» estuvo integrada por placas consecutivas de plata, cartón y cinc. Así, pues, de ese dispositivo se pudo extraer continuamente corriente eléctrica.

Cabe denominar batería cualquier serie de materiales similares repetidos indefinidamente. El instrumento de Volta fue la primera «batería eléctrica». Los científicos requerirían todavía un siglo para comprender por qué entraña transferencia de electrones las reacciones químicas, y aprender a interpretar las corrientes eléctricas en términos de cambios y flujos electrónicos. Entretanto, siguieron haciendo uso de la corriente sin entender sus peculiaridades.

Humphry Davy utilizó una corriente eléctrica para separar los átomos de moléculas muy compactas y, entre 1807 y 1808, logró por vez primera preparar metales como sodio, potasio, magnesio, calcio, estroncio y bario. Faraday (ayudante y protegido

de Davy) procedió a establecer las reglas generales de esa «electrólisis» concebida para la descomposición molecular, y que, medio siglo después, orientaría a Arrhenio en el razonamiento de su hipótesis sobre la disociación iónica (véase capítulo IV). Los numerosos empleos dados a la electricidad dinámica desde que Volta ideara su batería hace ya siglo y medio, relegaron la electricidad estática a la categoría de mera curiosidad histórica. Sin embargo, el conocimiento y la inventiva no pueden ser nunca estáticos. En 1960, el inventor estadounidense Chester Carlson perfeccionó un aparato que hacía copias utilizando el negro de humo en seco, el cual pasa al papel mediante una acción electrostática. Tal sistema de efectuar copias sin soluciones ni sustancias húmedas se llama xerografía (tomado de las voces griegas que significan «escritura seca»), y ha revolucionado los sistemas de copia en las oficinas.

Los nombres de las unidades empleadas para medir los diversos tipos de electricidad han inmortalizado los nombres de los primeros investigadores. Ya he mencionado el coulomb como unidad de cantidad de electricidad. Otra unidad de cantidad es el «faraday» que equivale a 96.500 coulombs. El nombre de Faraday se emplea por segunda vez para designar el «farad», una unidad de capacidad eléctrica. Por otra parte, la unidad de intensidad eléctrica (cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de un circuito en un momento dado) se llama «ampère», para perpetuar el nombre del físico francés Ampère (véase capítulo IV). Un ampère es igual a 1 coulomb/seg. La unidad de fuerza electromotriz (f.e.m., la fuerza que impulsa la corriente) es el «volt», en recuerdo de Volta.

La fuerza electromotriz no consiguió siempre impulsar la misma cantidad de electricidad a lo largo de diferentes circuitos. Solía impulsar grandes cantidades de corriente por los buenos conductores, pequeñas cantidades por los malos conductores, y prácticamente ninguna corriente cuando los materiales no eran conductores. En 1827, el matemático alemán Georg Simon Ohm estudió esa resistencia al flujo eléctrico y demostró que se relacionaba directamente con los ampères de la corriente impulsada, en un circuito por la conocida fuerza electromotriz. Se podría determinar esa resistencia estableciendo la relación entre volts y ampères. Ésta es la «ley de Ohm», y la unidad de resistencia eléctrica es el «ohm», cuyo valor equivale a 1 volt dividido por un ampère.

La conversión de energía química en electricidad, como ocurrió con la batería de Volta y las numerosas variedades de sus descendientes, ha resultado siempre relativamente costosa porque los productos químicos requeridos no son corrientes ni baratos. Por tal razón, y aunque la electricidad se pudo emplear provechosamente en el laboratorio durante los primeros años del siglo XIX, no tuvo aplicación industrial a gran escala.

Se hicieron tentativas esporádicas para transformar en fuentes de electricidad las reacciones químicas producidas por la combustión de elementos corrientes. Ciertos combustibles como el hidrógeno (o, mejor aún, el carbón) resultaban mucho más baratos que metales cual el cobre y el cinc. Hace ya mucho tiempo, en 1839, el científico inglés William Grove concibió una célula eléctrica basada en la combinación de oxígeno e hidrógeno. Fue un ensayo interesante, pero poco práctico. En años más recientes, los físicos se han esforzado en preparar variedades funcionales de tales «células combustibles». La teoría está bien definida; sólo falta abordar los «intríngulis» de la ingeniería práctica. Una posibilidad particularmente interesante es una célula compuesta por agua de mar, que contiene una porción de bacterias y materia orgánica y otra de oxígeno burbujeante. Oxidando la materia orgánica con ayuda de la bacteria, se produce electricidad. Aquí se ofrece la posibilidad de aprovechar algo tan prosaico como los desperdicios y producir energía útil solventándose dos problemas de un solo golpe.

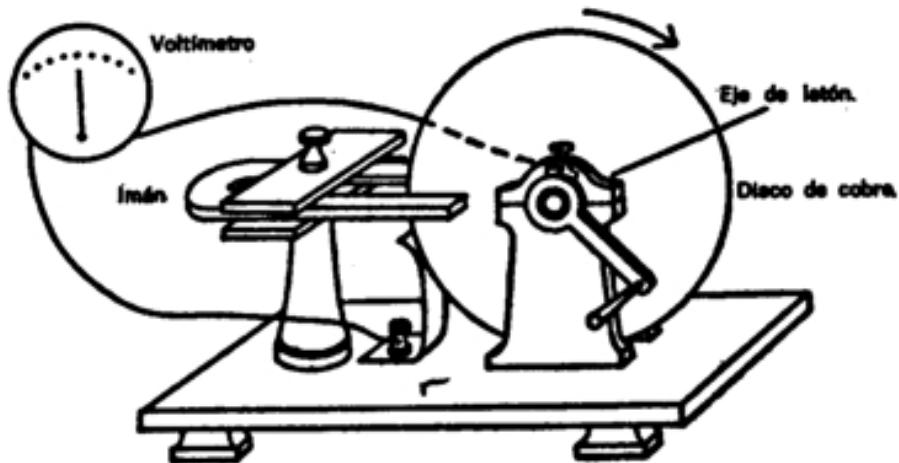
Cuando, en la segunda mitad del siglo XIX, se impuso el empleo a gran escala de la electricidad, no fue por medio de la célula eléctrica. En tiempos tan distantes como la década de los 1830, Faraday había producido electricidad mediante el movimiento mecánico de un conductor entre las líneas de fuerza de una magneto (véase capítulo IV).

En semejante «generador eléctrico» o «dínamo» (del griego *dynamis*, «fuerza») se podía transformar la energía cinética del movimiento en electricidad. Para mover la maquinaria, en 1844 se empleaban grandes versiones rudimentarias de ese generador.

Lo que se necesitaba era una magneto más potente todavía para que el movimiento por las intensificadas líneas de fuerza produjera mayor flujo eléctrico. Y se mantuvo esa potente magneto mediante el uso de corrientes eléctricas. En 1823, el

experimentador electrotécnico William Sturgeon arrolló dieciocho veces un alambre de cobre puro alrededor de una barra férrea en forma de U y produjo la primera «electromagneto». Cuando circulaba la corriente, el campo magnético resultante se concentraba en la barra de hierro, y entonces ésta podía levantar un peso veinte veces superior al suyo. Si se interrumpía la corriente, dejaba de ser magneto y no levantaba nada.

En 1829, el físico americano Joseph Henry perfeccionó considerablemente ese artefacto usando alambre aislante. Con este material aislador resultaba posible arrollarlo en apretadas espiras sin temor de cortocircuitos. Cada espira acrecentaba la intensidad del campo magnético y el poder de la electromagneto. Hacia 1831, Henry construyó una electromagneto, no demasiado grande, pero capaz de levantar una tonelada de hierro.



*La «dinamo» de Faraday. El disco giratorio de cobre corta las líneas de fuerza de la magneto induciendo la corriente en el voltímetro.*

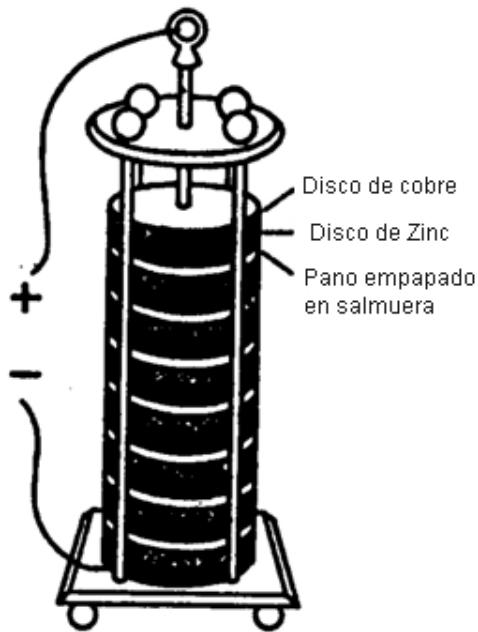
Evidentemente, aquella electromagneto fue la respuesta justa a la búsqueda de mejores generadores eléctricos. En 1845, el físico inglés Charles Wheatstone empleó una electromagneto con el mismo propósito. La teoría respaldada por las líneas de fuerza resultó más comprensible durante la década de 1860-1870, gracias a la interpretación matemática del trabajo de Faraday por Maxwell y, en 1872, el ingeniero electrotécnico alemán Friedrich van Hefner-Alteneck diseñó el primer generador realmente eficaz. Por fin se pudo producir electricidad barata a raudales, y no sólo quemando combustibles, sino también con los saltos de agua.

Los trabajos conducentes al empleo inicial de la electricidad en el campo tecnológico implicaron grandes merecimientos, cuya mayor parte debería corresponder a Joseph Henry. El invento del telégrafo fue la primera aplicación práctica de la electricidad, y su creador fue Henry, este ideó un sistema de relés que permitió transmitir la corriente eléctrica por muchos kilómetros de alambre. La potencia de una corriente decrece a ritmo bastante rápido cuando esa corriente recorre largos trechos de alambre resistente; lo que hizo Henry con sus relés fue aprovechar la señal de extinción para activar una pequeña electromagneto, cuya acción se comunicaba a un conmutador que desencadenaba nuevos impulsos en centrales eléctricas separadas entre sí con intervalos apropiados, Así, pues, se podía enviar a puntos muy distantes un mensaje consistente en impulsos eléctricos codificados. Verdaderamente, Henry concibió un telégrafo funcional.

Pero como Henry era un hombre idealista y creía que se debían compartir los conocimientos con todo el mundo, no quiso patentar su descubrimiento y, por tanto, no se llevó el crédito del invento. Ese crédito correspondió al artista (y excéntrico fanático religioso) Samuel Finley Breese Morse. Con ayuda de Henry, ofrecida sin reservas (pero reconocida a regañadientes por el beneficiario), Morse construyó el primer telégrafo práctico en 1844. La principal aportación de Morse al telégrafo fue el sistema de puntos y rayas conocido como «código Morse».

La creación más importante de Henry en el campo de la electricidad fue el motor eléctrico. Demostró que se podía utilizar la corriente eléctrica para hacer girar una rueda, del mismo modo que el giro de una rueda podía generar corriente. Y una rueda (o motor) movida por la electricidad podía servir para activar la maquinaria. El motor era fácilmente transportable; resultaba posible hacerlo funcionar en un momento dado (Sin necesidad de esperar a que se almacenase el vapor), y su tamaño podía ser tan reducido como se deseara.

El único problema consistía en transportar la electricidad desde la central generadora hasta el lugar donde estaba emplazado el motor. Fue preciso idear algún medio para evitar la pérdida de energía eléctrica (en forma de calor disipado) durante el recorrido por los alambres.



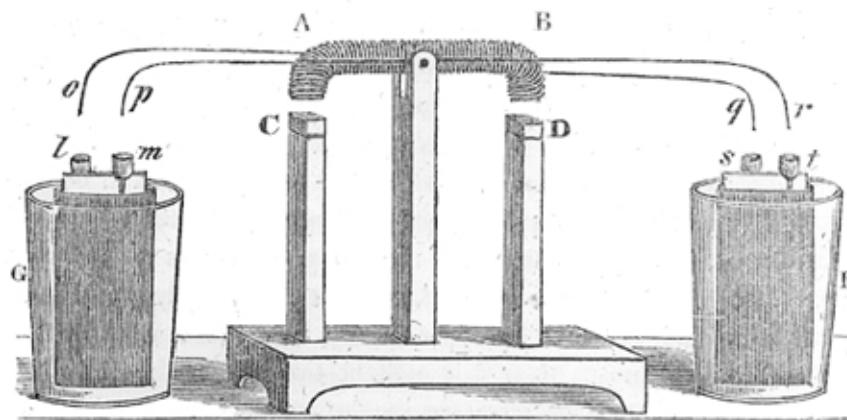
*Batería de Volta. Los dos metales diferentes en contacto originan un flujo de electrones que se trasladan de una celda a la siguiente por conducto de un paño empapado en salmuera. La conocida «batería seca» de nuestros días, integrada por carbón y cinc, fue una idea de Bunsen (famoso por el espectroscopio) en 1841.*

Una respuesta aceptable fue el «transformador». Quienes experimentaban con corrientes descubrieron que la electricidad sufría muchas menos pérdidas cuando fluía a un ritmo lento. Así, pues, se elevó el rendimiento del generador a un alto voltaje mediante un transformador que, al multiplicar el voltaje, digamos por tres, redujo la corriente (el ritmo del flujo) a una tercera parte. En la estación receptora se podría elevar otra vez la corriente para su aplicación a los motores.

El transformador trabaja aprovechando la corriente «primaria» para inducir una corriente de alto voltaje en una bobina secundaria. Esta inducción requiere que se produzcan variaciones en el campo magnético a través de la bobina secundaria. Puesto que una corriente continua no puede hacerlo, la corriente que se emplea es de tipo continuo variable; alcanza una tensión máxima, para descender luego hasta cero y cobrar nueva intensidad en dirección contraria, o, dicho de otra forma, «una corriente alterna».

La corriente alterna (c.a.) no se sobrepuso a la corriente continua (c.c.) sin una dura pugna. Thomas Alva Edison, el nombre más glorioso de la electricidad en las últimas décadas del siglo XIX, abogó por la c.c. y estableció la primera central

generadora de c.c. en Nueva York, el año 1882, para producir la luz eléctrica que había inventado. Se opuso a la c.a. alegando que era más peligrosa (recurrió, entre otros ejemplos, a su empleo en la silla eléctrica).



*Motor de Henry. La magneto vertical D atrae a la magneto B, rodeada de alambre, empujando las largas sondas metálicas O y R hacia los dedales de latón S y T que actúan como terminales para la celda húmeda F. La corriente fluye por el interior de la magneto horizontal, produciendo un campo electromagnético que une a A y C. Entonces se repite todo el proceso en el lado opuesto. Así, pues, la barra horizontal oscila arriba y abajo. A-B: magneto horizontal conectado a un alambre de cobre C-D: Magnetos verticales I, m, s, t: dedales de latón rellenos con mercurio y soldados al zinc y al cobre F, G: Cubiletes con ácido diluido*

Le presentó batalla Nikola Tesla, un ingeniero croata que había salido malparado cuando colaboraba con Edison. Tesla ideó un sistema fructífero de c.a. en 1888. Y allá por 1893, George Westinghouse, asimismo un convencido de la c.a., ganó una victoria crucial sobre Edison obteniendo para su compañía eléctrica el contrato para construir la central eléctrica del Niágara, utilizando c.a. En décadas subsiguientes, Steinmetz asentó la teoría de las corrientes alternas sobre firmes fundamentos matemáticos. Hoy día, la c.a. es poco menos que universal en los sistemas de distribución de energía eléctrica. (En 1966, ingenieros de la «General Electric» crearon un transformador de c.c., antes considerado como imposible- pero que supone temperaturas de helio líquido y una escasa eficiencia. Teóricamente es fascinante, pero su uso comercial es aún improbable.)

## Mecanismos Eléctricos

La máquina de vapor es un «mecanismo motriz primario». Toma energía ya existente en la Naturaleza (la energía química de la madera, el petróleo o el carbón), para transformarla en trabajo. El motor eléctrico no lo es; convierte la electricidad en trabajo, pero la electricidad debe formarse por sí misma aprovechando la energía del combustible o el salto de agua. No obstante, se la puede emplear con idéntico fin. En la exposición de Berlín celebrada el año 1879, una locomotora eléctrica (que utilizaba un tercer raíl como alimentador de corriente) movió fácilmente un tren de vagones. Los ferrocarriles electrificados son corrientes hoy día, en especial para el transporte rápido dentro de zonas urbanas, pues la limpieza y suavidad del sistema compensa sobradamente el gasto adicional.

Sin embargo, la electricidad se revela en toda su magnitud al desempeñar tareas imposibles de realizar por el vapor. Consideremos por ejemplo, el teléfono, patentado en 1876 por el inventor de origen escocés Alexander Graham Bell. En el micrófono del teléfono, las ondas sonoras emitidas por el locutor chocan contra un sutil diafragma de acero y lo hacen vibrar con arreglo al esquema de las ondas. Las vibraciones del diafragma establecen, a su vez, un esquema análogo en la corriente eléctrica por medio de gránulos de carbón. Cuando el diafragma presiona sobre dichos gránulos, conduce más corriente; y menos, cuando se aparta el diafragma. Así, pues, la corriente eléctrica aumenta o disminuye de acuerdo con las ondas sonoras. En el teléfono receptor, las fluctuaciones de la corriente actúan sobre una electromagneto que hace vibrar el diafragma, con la consiguiente reproducción de las ondas sonoras.

Allá por 1877, uno año después de inventarse el teléfono, Edison patentó su «fonógrafo». En las primeras grabaciones se marcó el surco sobre papel de estaño, que servía como envoltura de un cilindro rotatorio. En 1885, el inventor americano Charles Summer Tainter lo sustituyó por cilindros de cera; más tarde, en 1887, Emile Berliner impuso los discos revestidos de cera. En 1925 se empezó a hacer grabaciones por medio de electricidad, empleando un «micrófono» que transformaba el sonido en corriente eléctrica mimética por medio de un cristal piezoelectrónico que sustituyó el diafragma metálico; ese cristal favoreció la reproducción del sonido y mejoró su calidad. En la década de 1930 a 1940 se creó la válvula electrónica para amplificar el sonido. Luego, tras la Segunda Guerra

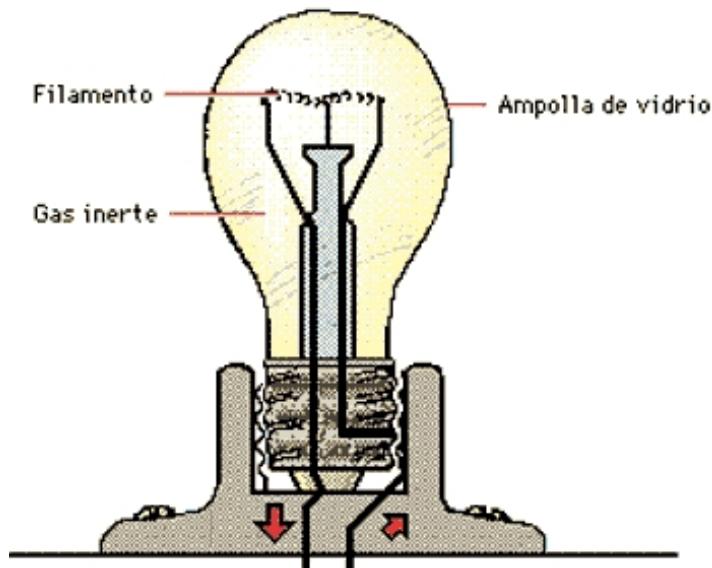
Mundial, llegó la Era de los microsurcos, la «alta fidelidad» y el sonido «estereofónico», cuyo resultado, por cuanto se refiere a la audición, eliminó todas las barreras mecánicas entre la orquesta o el cantante y el oyente.

La «grabación magnetofónica» del sonido fue un invento llevado a cabo en 1898 por el ingeniero electrotécnico danés Valdemar Poulsen, pero hubo que introducir en el invento varias mejoras técnicas para que éste tuviera aplicación práctica. Una electromagneto, que responde a una corriente eléctrica portadora del esquema sonoro, magnetiza una fina capa de polvo metálico sobre una cinta o alambre que circula a través de ella; luego se invierte el sentido de la marcha mediante una electromagneto, que recoge la huella magnética para traducirla de nuevo en la corriente que reproducirá el sonido.

Entre todos los milagros de la electricidad, el más popular es, sin duda, la transformación de la noche en día. El género humano se ha defendido con hogueras, antorchas y velas contra el diario e inquietante oscurecimiento del Sol; durante milenios, la luz artificial fue mediocre y oscilante. Luego, en el siglo XIX, aparecieron la grasa de ballena, el queroseno y el gas, cuya aportación significó cierto progreso en el alumbrado. Por fin, la electricidad proporcionó un sistema mucho más satisfactorio de iluminación..., más seguro, más práctico y tan brillante o matizado como se deseara.

El problema consistió en calentar un filamento con la electricidad hasta hacerle irradiar un resplandor incandescente. Parecía muy sencillo, pero muchos intentaron obtener una lámpara duradera y fracasaron. Naturalmente, el filamento debería brillar en un espacio desprovisto de oxígeno, pues si no era así, la oxidación lo destruiría al instante. Los primeros intentos para eliminar el oxígeno se redujeron al procedimiento directo de extraer el aire. En 1875, Crookes ideó cierto método (relacionado con sus experimentos sobre rayos catódicos; véase capítulo V) para producir un vacío suficiente a tal fin, con las necesarias rapidez y economía. No obstante, los filamentos utilizados resultaron poco satisfactorios. Se rompieron con excesiva facilidad. En 1878, Thomas Edison, animado por su reciente y triunfal invento del fonógrafo, se manifestó dispuesto a abordar el problema. Tenía sólo treinta y un años por entonces, pero era tanta su reputación como inventor, que su

anuncio causó verdadero revuelo en las Bolsas de Nueva York y Londres, haciendo tambalearse las acciones de las compañías de gas.



Tras centenares de experimentos y muchos fracasos. Edison encontró, al fin, un material útil como filamento: una hebra de algodón chamuscada. El 21 de octubre de 1879 encendió su lámpara. Ésta ardió sin interrupción durante cuarenta horas. En vísperas de Año Nuevo, Edison presentó sus lámparas en triunfal exhibición pública, iluminando la calle principal de Menlo Park (Nueva Jersey), donde había instalado su laboratorio. Sin pérdida de tiempo, patentó su lámpara y empezó a producirla en cantidad.

Sin embargo, Edison no fue el único inventor de la lámpara incandescente. Otro inventor, por lo menos, pudo reclamar el mismo derecho: fue el inglés Joseph Swan, quien mostró una lámpara con filamento de carbón ante una junta de la «Newcastle-on-Tyne Chemical Society», el 18 de diciembre de 1878, si bien no logró comercializar su invento hasta 1881.

Entonces Edison abordó un problema fundamental: abastecer los hogares con cantidades constantes y suficientes de electricidad para sus lámparas, tarea que requirió mucho más ingenio que la propia invención de la lámpara. Más tarde, esta lámpara se benefició de dos mejoras. En 1910, William David Coolidge, de la «General Electric Company» eligió el tungsteno, de escasa capacidad calorífica, para

fabricar los filamentos y, en 1913, Irving Langmuir introdujo el nitrógeno de atmósfera inerte en la lámpara para evitar toda evaporación, así como la rotura del filamento, tan frecuente en el vacío.

El argón (cuyo uso se generalizó en 1920) sirve a ese propósito mejor que el nitrógeno, pues su atmósfera es completamente inerte. El criptón, otro gas inerte, es más eficiente todavía porque permite que el filamento de la lámpara resista muy elevadas temperaturas y dé más intensidad de luz al arder, sin que se acorte por ello su duración.

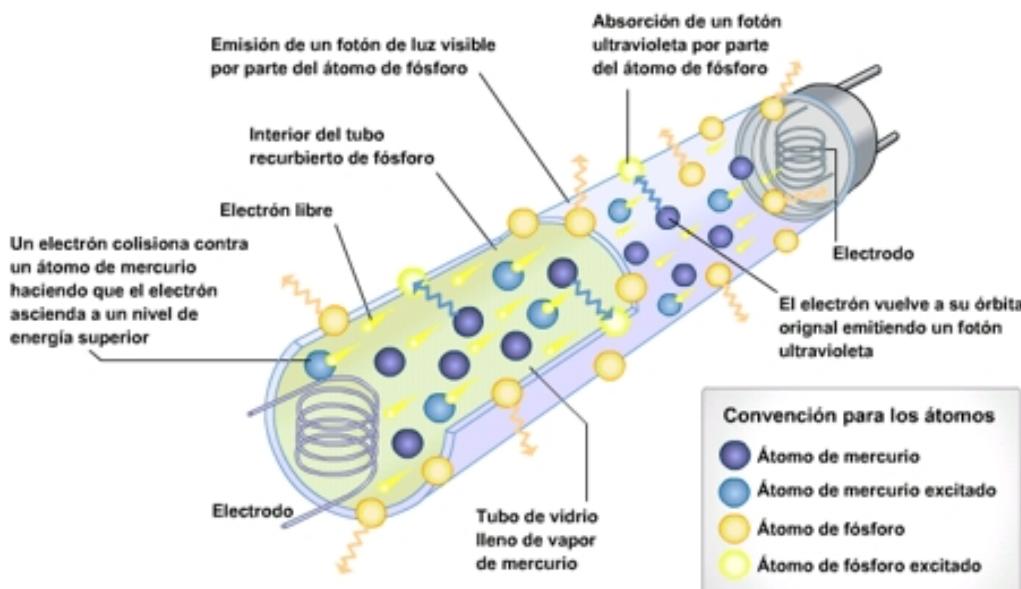
Como es natural, desde entonces se han diseñado otros tipos de lámpara eléctrica. Tales son las llamadas «ampollas de neón» (divulgadas por el químico francés Georges Claude en 1910), tubos en los que una descarga eléctrica excita los átomos del gas neón para que emitan una brillante luz rojiza. La «lámpara de cuarzo» contiene vapor de mercurio que, cuando lo excita una descarga, emite una radiación de luz ultravioleta; esta lámpara no sirve solamente para broncear la piel humana, sino también para matar bacterias o generar fluorescencia. Y la última, desde el punto de vista cronológico, es la luz fluorescente, presentada el año 1939 en su forma contemporánea, con motivo de la Feria Mundial de Nueva York. Aquí la luz ultravioleta del vapor de mercurio excita la fluorescencia en un revestimiento de «fósforo» por la superficie interna del tubo. Puesto que esta luz fría libera poca energía calorífica, consume aún menos fuerza eléctrica.

Un tubo fluorescente de 40 W suministra tanta luz, aunque no tanto calor ni mucho menos- como una lámpara incandescente de 150 W. Por tanto, se ha manifestado una tendencia general hacia la luz fluorescente desde la Segunda Guerra Mundial. Cuando apareció el primer tubo fluorescente, se prefirieron las sales de berilio como materia fluorescente. Ello originó varios casos serios de envenenamiento («beriliosis»), por la aspiración de aire contaminado con esas sales o la introducción de esa sustancia en el organismo humano por los cortes de la piel producidos ocasionalmente cuando se rompían los tubos. Desde 1949 se emplearon otros fósforos menos peligrosos.

La última y más prometedora innovación es un método que convierte la electricidad directamente en luz sin la formación previa de luz ultravioleta. En 1936, el físico francés Georges Destriau descubrió que una intensa corriente alterna podía

comunicar incandescencia a una sustancia fosforescente tal como el sulfato de cinc. Actualmente, los ingenieros electrotécnicos están aplicando el fósforo al plástico o cristal y utilizan el fenómeno llamado «electroluminiscencia» para formar placas incandescentes. De este modo, una pared o un techo luminiscente podría alumbrar toda una habitación con su resplandor suave y coloreado según el gusto de cada cual.

Probablemente, ninguna invención relacionada con la luz ha proporcionado al género humano tanto placer como la fotografía. Ésta se inició con la observación que al pasar la luz a través de un pequeño orificio a una cámara oscura, formaba una imagen difusa e invertida del escenario exterior. Un alquimista italiano, Giambattista della Porta, construyó en 1550 un artefacto similar, denominado, como se ha dicho, «cámara oscura».



*Lámpara fluorescente. Una descarga de electrones desde el filamento excita el vapor mercurial en el tubo, produciendo una radiación ultravioleta. Los rayos ultravioleta hacen destellar el fósforo.*

En una cámara oscura penetra una cantidad mínima de luz. No obstante, si se remplaza el orificio por una lente, se concentrará una cantidad considerable de luz y, por tanto, la imagen será mucho más brillante. Una vez hecho esto, es necesario buscar alguna reacción química que responda a la luz. Varios hombres se lanzaron a esa búsqueda, destacando, entre ellos, los franceses Joseph-Nicéphore Nièpce y

Louis-Jacques Mande Daguerre, así como el inglés William Henry Fox Talbot. Hacia mediados del siglo XIX se pudieron obtener imágenes permanentes pintadas con productos químicos.

Ante todo se enfoca la imagen sobre una placa de vidrio embadurnada con una emulsión de sales argénticas. La luz produce un cambio químico en el compuesto, cambio que es proporcional a la intensidad de la luz en un momento dado. Durante este proceso, el revelador químico convierte en plata metálica las partes transformadas por la luz, de nuevo en una cantidad proporcional a la intensidad de la luz. Entonces se disuelve el compuesto argéntico no afectado, dejando un «negativo», donde aparece la imagen como un escantillón en el que se combinan varias intensidades de negro. La luz proyectada a través de los negativos invierte las manchas claras y oscuras, formando la imagen positiva. En la década de 1850, la fotografía evidenció casi inmediatamente su valor para la documentación humana cuando los británicos fotografiaron escenas de la guerra de Crimea y cuando, en la década siguiente, el americano Matthew Brady tomó fotografías clásicas de la guerra civil americana con un material tan primitivo, que ahora lo consideraríamos inútil para tal fin.

A lo largo del siglo XIX se simplificó y aceleró gradualmente ese proceso. El inventor americano George Eastman ideó las placas secas (en lugar de la emulsión húmeda original), y luego adoptó la película plástica como base para la emulsión. Se fabricaron emulsiones más sensibles con el fin de acelerar el disparo fotográfico para que el sujeto no necesitara «posar».

Desde la Segunda Guerra Mundial se ha simplificado aún más el procedimiento mediante la «cámara Land», inventada por Edwin Herbert Land, de la «Polaroid Corporation». Aquí se emplean dos películas donde se revelan automáticamente el negativo y el positivo por medio de productos químicos incorporados a la propia película.

A principios del siglo XX, el físico francés de origen luxemburgoés Gabriel Lippmann desarrolló un proceso de fotografía en color que le valió el premio Nobel de Física en 1908. Pero aquello fue una falsa alarma; la fotografía en color no se perfeccionó a nivel industrial hasta 1936. Este segundo y afortunado intento se basó en la observación hecha por Maxwell y Von Helmholtz en 1855, y según la cual es posible

componer cualquier color del espectro combinando el rojo, el verde y el azul pálido. Con arreglo a este principio, el color fílmico está compuesto por tres capas de emulsiones: una, sensible al rojo; otra, al verde; y una tercera, a los componentes azulados de la imagen. Así se forman tres imágenes separadas, pero superpuestas, y cada una reproduce la intensidad lumínica en su zona del espectro, cual una representación en negro y blanco. Entonces se revela la película en tres fases consecutivas, utilizando tintas rojas, azules y verdes, para depositar sobre el negativo los colores apropiados. Cada matiz de la fotografía es una combinación específica de rojo, verde y azul; el cerebro debe interpretar esas combinaciones para reconstituir toda la gama de colores.

En 1959, Land expuso una nueva teoría sobre la visión del color. Según él, el cerebro no requiere una combinación de tres colores para dar la impresión de colorido total. Todo cuanto necesita es dos longitudes de onda diferentes (o grupos de longitudes de ondas), una algo más larga que la otra. Por ejemplo, un grupo de longitudes de ondas puede ser un espectro entero o luz blanca. Como su longitud de onda (promedio) está en la zona amarillo-verde, puede servir de «onda corta». Ahora bien, una imagen reproducida mediante la combinación de luces blanca y roja (esta última actuaría como onda larga), aparece a todo color. Land ha hecho también fotografías a todo color con luces verde y roja filtrada, así como otras combinaciones binarias apropiadas.

El invento del cinematógrafo se debió a una primera observación del físico inglés Peter Mark Roget, en 1824. Este científico observó que el ojo humano retiene una imagen persistente durante una fracción apreciable de segundo. Tras la introducción de la fotografía, muchos experimentadores, particularmente en Francia, aprovecharon esa propiedad para crear la ilusión de movimiento exhibiendo en rápida sucesión una serie de estampas. Todo el mundo está familiarizado con el entretenimiento consistente en un mazo de cromos que, cuando se le trashoja con rapidez, da la impresión que una figura se mueve y realiza acrobacias. Si se proyecta sobre una pantalla, con intervalos de algunos dieciseisavos de segundo, una serie de fotografías, siendo cada una de ellas algo distintas de la anterior, la persistencia de esas imágenes sucesivas en el ojo dará lugar a enlaces sucesivos, hasta causar la impresión de movimiento continuo.

Edison fue quien produjo la primera «película cinematográfica». Fotografió una serie de escenas en una cinta y luego pasó la película por un proyector que mostró, sucesivamente, cada una con la correspondiente explosión luminosa. En 1894 se exhibió, para entretenimiento público, la primera película cinematográfica, y, en 1914, los teatros proyectaron la cinta de largometraje *The Birth of a Nation* (*El nacimiento de una nación*).

A las películas mudas se incorporó, en 1927, la banda sonora, en la cual, el sistema ondulatorio de la música y la voz del actor se transforman en una corriente eléctrica variable mediante un micrófono, y entonces esta corriente enciende una lámpara, cuya luz se fotografía también junto con la acción cinematográfica. Cuando la película acompañada de esa banda luminosa añadida en un borde se proyecta en la pantalla, las variaciones luminosas de la lámpara en el esquema de ondas sonoras se transforma de nuevo en corriente eléctrica por medio de un «tubo fotoeléctrico», y la corriente se convierte, a su vez, en sonido.

Dos años después de la primera «película sonora», *El cantor de jazz*, los filmes mudos pasaron a la historia, tal como le ocurrió casi al *vaudeville*. Hacia fines de los años 1930, se agregó el color a las «cintas habladas». Por añadidura, la década de 1950 asistió al desarrollo del sistema de visión periférica, e incluso al de efectos tridimensionales (3D), muy poco afortunado y duradero, consistente en la proyección de dos imágenes sobre la pantalla. En este último caso, el espectador debe usar gafas polarizadas para ver una imagen distinta con cada ojo, lo cual produce un efecto estereoscópico.

### Máquinas de Combustión Interna

Aunque el petróleo dio paso a la electricidad en el campo de la iluminación artificial, resultó indispensable para otro adelanto técnico que revolucionó la vida moderna tan profundamente como cuando aparecieron los aparatos electrodomésticos. Esta innovación fue la máquina de combustión interna, llamada así porque en su interior hay un cilindro en el que se quema el combustible de tal forma, que los gases mueven directamente el pistón. Por lo general, las máquinas de vapor son de «combustión externa», pues el combustible arde en sus partes exteriores y el vapor así formado pasa entonces al cilindro por diversos conductos.

Este artificio compacto, movido por las pequeñas explosiones provocadas dentro del cilindro, permitió aplicar la fuerza motriz a vehículos menores, para los cuales no resultaba funcional la voluminosa máquina de vapor. No obstante, ya en 1786 aparecieron «carruajes sin caballos», movidos por vapor, cuando William Murdoch, un socio de James Watt, decidió construir uno de semejantes artefactos. Un siglo después, el inventor americano Francis Edgar Stanley diseñó la famosa *Stanley Steamer*, que hizo la competencia a los primeros carruajes provistos con motores de combustión interna. Sin embargo, el futuro pertenecía a estos últimos.

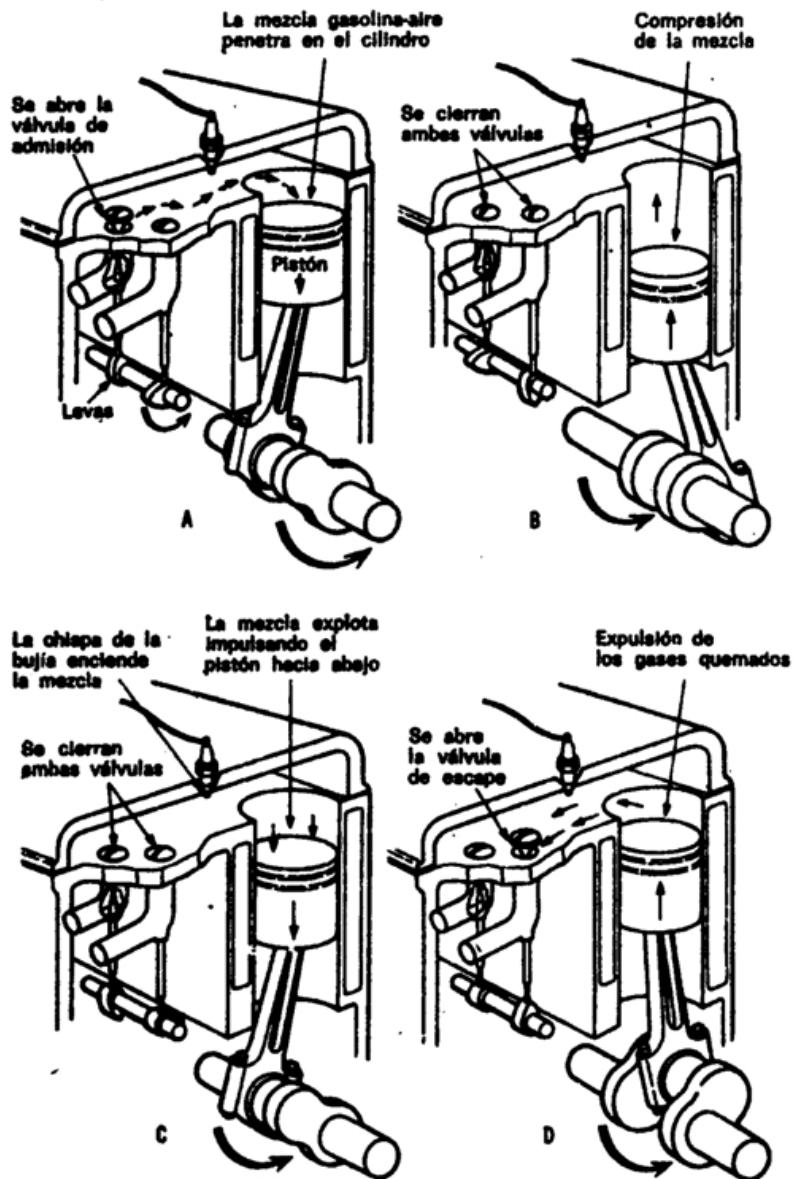
Realmente, se construyeron algunas máquinas de combustión interna a principios del siglo XIX, antes que se generalizara el uso del petróleo. Éstas quemaron vapores de trementina o hidrógeno como combustible. Pero ese artefacto no dejó de ser una curiosidad hasta que empezó a utilizarse la gasolina, el líquido productor de vapor y, a la vez, combustible cuya explotación resulta rentable y abundante.

En 1860, el inventor francés Étienne Lenoir construyó el primer motor práctico de combustión interna y, en 1876, el técnico alemán Nikolaus August Otto diseñó un motor de «cuatro tiempos». Primero, un pistón ajustado perfectamente al cilindro recibe un impulso ascendente, de modo que el cilindro vacío absorbe una mezcla de gasolina y aire. Luego, ese pistón recibe un nuevo impulso y comprime el vapor. En el punto de máxima compresión, dicho vapor se enciende y explota. La explosión dispara el pistón, y este movimiento acelerado es lo que hace funcionar el motor. Mueve un árbol que empuja otra vez al pistón para hacerle expulsar los residuos quemados, o «escape»; éste es el cuarto y último movimiento del ciclo. Entonces el árbol mueve el pistón para repetir el ciclo.

Un ingeniero escocés llamado Dugald Clerk agregó casi inmediatamente una mejora. Incorporó un segundo cilindro de forma que trabajara un pistón mientras el otro estaba en estado de recuperación: ello dio más equilibrio a la producción de fuerza. Al añadir después otros cilindros (ocho es el número más generalizado hoy día), aumentó la armonía y potencia de ese «mecanismo compensador».

La ignición del compuesto gasolina-aire en el momento preciso planteó un problema. Se emplearon toda clase de ingeniosos artificios, pero en 1923 se le dio una solución general con la electricidad. El suministro proviene de una «batería acumuladora». Ésta es una batería que, como cualquier otra, provee la electricidad

producida por una reacción química. Pero se la puede mantener cargada enviándole una corriente eléctrica en dirección opuesta a la de descarga; esa corriente invierte la reacción química, de modo que los productos químicos originen más electricidad. Un pequeño generador movido por el motor suministra esa corriente inversa.



*Motor de «cuatro tiempos» construido por Nikolaus Otto en 1876*

El tipo más común de batería tiene placas alternas de plomo y óxido de plomo, con capas de ácido sulfúrico concentrado. Lo inventó el físico francés Gaston Planté en 1859, y fue modernizado en 1881 por el ingeniero electrotécnico americano Charles

Francis Brush. Desde entonces se han inventado otras baterías más resistentes y compactas, como, por ejemplo, una batería de níquel y hierro, ideada por Edison hacia 1905, pero ninguna puede competir en economía con la batería de plomo.

Para elevar el voltaje de la corriente eléctrica facilitada por la batería se emplean transformadores denominados «carretes de inducción», y ese voltaje acrecentado proporciona la chispa de ignición que salta en los electrodos de las populares bujías. Una vez empieza a funcionar el motor de combustión interna, la inercia lo mantiene en movimiento entre las fases de potencia. Mas, para hacerle arrancar es preciso recurrir a la energía externa. Primeramente se hizo con fuerza muscular (por ejemplo, la manivela del automóvil), y hoy día se ponen en marcha los motores fuera borda y las máquinas segadoras tirando de un cable. El «arranque automático» en los automóviles modernos se hace gracias a la batería, que provee la energía necesaria para los primeros movimientos del motor.

En 1885, los ingenieros alemanes Gottlieb Daimler y Karl Benz construyeron, independientemente, el primer automóvil funcional. Pero lo que en realidad vulgarizó el automóvil como medio de transporte fue la «producción en serie».

El primer promotor de esa técnica fue Eli Whitney, quien merece más crédito por ello que por su famoso invento de la máquina desmotadora del algodón. En 1789, el Gobierno Federal contrató a Whitney para la fabricación de cañones destinados al Ejército. Hasta entonces se habían fabricado esas piezas individualmente, es decir, proveyendo a cada una con sus propios y particulares elementos. Whitney ideó un medio para universalizar esos elementos, de modo que cada uno fuera aplicable a cualquier cañón. Esta innovación tan simple, fabricación en serie de piezas intercambiables para cualquier tipo de artículo- fue quizá tan influyente como otros factores importantes en la producción industrial masiva de nuestros días. Cuando apareció la maquinaria moderna, fue posible lanzar al mercado piezas de repuesto en cantidades prácticamente ilimitadas.

El ingeniero estadounidense Henry Ford fue quien por primera vez explotó a fondo este concepto. En 1892 había construido su primer automóvil (un modelo de dos cilindros) y luego, desde 1899, había trabajado como ingeniero jefe de la «Detroit Automobile Company». Esta empresa quería producir vehículos a gusto de cada cliente, pero Ford tenía otras ideas. Así, pues, dimitió en el año 1902 para

emprender por su propia cuenta la producción masiva de automóviles. Siete años después lanzó el modelo *Ford-T* y, en 1913, empezó a fabricar tomando como pauta el plan Whitney... despachando así coche tras coche, cada uno exactamente igual al anterior y todos ellos construidos con las mismas piezas.

Ford descubrió que podría acelerar la producción empleando obreros que hicieran siempre el mismo trabajo especializado con ininterrumpida regularidad, como si fueran máquinas. Entretanto, el americano Samuel Colt (Quien había inventado ya el revólver de «seis tiros»), en 1847, daba los primeros pasos en esa dirección y el fabricante de automóviles Ransom E. Olds había aplicado el mismo sistema a la fabricación del vehículo automóvil en 1900. Sin embargo, Olds perdió el apoyo financiero, y entonces las finanzas favorecieron a Ford, quien llevó adelante su movimiento hasta una feliz fructificación. Ford implantó la «cadena de montaje», en la que los operarios agregaban las piezas de su especialización a cada modelo, conforme pasaba ante ellos sobre una correa sin fin, hasta que el automóvil terminado salía rodando por el extremo final de la línea. Este nuevo sistema ofreció dos ventajas económicas: salarios elevados para el obrero, y automóviles asequibles a precios sorprendentemente bajos.

En 1913, Ford fabricaba ya mil modelos *T* cada día. Antes que se «rompiera» la cadena en 1927, se habían lanzado quince millones de unidades y el precio había descendido a 290 dólares. Entonces nació la pasión por el cambio anual de coche, y Ford se adhirió al inevitable desfile de variedades e innovaciones superficiales, que decuplicaron el precio de los automóviles y privaron a los norteamericanos de las ventajas de la producción masiva.

En 1892, el ingeniero mecánico alemán Rudolf Diesel introdujo una modificación en el motor de combustión interna, que entrañó simplificaciones mecánicas y economía de combustible. Sometió a muy alta presión la mezcla de combustible-aire, de modo que el calor generado por la compresión fue suficiente para inflamarla. El «motor Diesel» permitió emplear productos destilados del petróleo difícilmente volatilizables. Como la compresión era aquí muy elevada, fue preciso construir un motor mucho más sólido y pesado que el de gasolina. Cuando, en 1920, se desarrolló un sistema adecuado de inyección de fuel-oil, éste fue adoptado sin

discusión para los camiones, tractores, autobuses, barcos y locomotoras, convirtiéndose en el rey del transporte pesado.

El progresivo refinamiento de la gasolina ha incrementado la eficiencia del motor de combustión interna. La gasolina es una mezcla compleja de moléculas integradas por átomos de carbono e hidrógeno («hidrocarburos») algunos de los cuales arden más aprisa que otros. Ahora bien, la combustión demasiado rápida no es deseable, pues entonces la mezcla gasolina-aire explota con excesiva premura, determinando el «picado del motor». La combustión más lenta induce una expansión uniforme del vapor, que propulsa el pistón con suavidad y eficacia.

Para medir el poder antidetonante de una determinada gasolina se emplea la «escala octano», es decir, se la compara con la detonación producida por un hidrocarburo llamado «isooctano», que es extremadamente antidetonante. La refinación de gasolina requiere, entre sus funciones primarias, la producción de un hidrocarburo mixto con un elevado índice de octanos.

Conforme pasa el tiempo, los motores de automóviles se construyen cada vez con mayor «compresión», es decir, que la mezcla gasolina-aire se comprime a densidades progresivamente superiores antes de la ignición. Ello permite obtener más potencia de la gasolina, pero también se estimula la detonación prematura, por lo cual hay que preparar continuamente gasolinas de más octanos. Se ha facilitado esa tarea con el empleo de ciertos productos químicos que, agregados en pequeñas cantidades a la gasolina, reducen la detonación. El más eficiente de esos «compuestos antidetonantes» es el «plomo tetraetilo», un compuesto de plomo lanzado al mercado con tal finalidad en 1925. El combustible que lo contiene se llama «etilgasolina». Si el plomo tetraetilo estuviera solo, el óxido de plomo formado durante la combustión destrozaría el motor. De aquí que se agregue también bromuro etílico. El átomo de plomo en el plomo tetraetilo se combina con el átomo de bromuro en el bromuro etílico para formar bromuro de plomo, que se evapora a la temperatura de la gasolina quemada y escapa con los gases residuales. Para comprobar el retraso de ignición tras la compresión (un retraso excesivo es perjudicial) de los combustibles Diesel, se los compara con un hidrocarburo llamado «ceteno», cuya molécula contiene 16 átomos de carbono, frente a los 8 del «isooctano». Por consiguiente, para los combustibles Diesel se considera el

«número del ceteno».

El motor de combustión interna alcanzó su mayor triunfo, como es de suponer, en el aire. Durante la década de los años 1890, el hombre hizo realidad un sueño inmemorial, más antiguo que Dédalo e Ícaro: volar con alas. El vuelo sin motor llegó a ser un deporte apasionante entre los aficionados. En 1853, George Cayley, inventor inglés, construyó el primer planeador tripulado. Sin embargo, su «tripulante» fue un muchacho de poco peso. El primer piloto deportivo importante, el ingeniero alemán Otto Lilienthal, se estrelló con su planeador en 1896. Mientras tanto, se manifestaba cada vez más el deseo de emprender vuelos con aparatos motorizados.

Samuel Pierpont Langley, físico y astrónomo estadounidense, intentó volar dos veces (en 1902 y 1903) con un planeador provisto de motor, y le faltó muy poco para triunfar. Si no se hubiera quedado sin dinero, habría conseguido elevarse en el aire al siguiente intento. La fortuna quiso que tal honor correspondiera a los hermanos Orville y Wilbur Wright, unos fabricantes de bicicletas cuya afición por los vuelos sin motor era extraordinaria.

El 17 de diciembre de 1903, los hermanos Wright despegaron en Kitty Hawk (N.C.), con un planeador impulsado por hélice. Permanecieron en el aire, a 255 m de altura, durante 59 seg. Fue el primer viaje aeronáutico de la historia, y pasó casi inadvertido en el mundo.

Hubo mucho más entusiasmo público cuando los Wright recorrieron por el aire 40 km y, sobre todo, cuando el ingeniero francés Louis Blériot cruzó el canal de la Mancha con un aeroplano en 1909. Las batallas y hazañas aéreas de la Primera Guerra Mundial estimularon aún más la imaginación, y los biplanos de aquella época, con sus dos alas sujetas precariamente por tubos y alambres, fueron unas siluetas familiares para toda una generación de espectadores cinematográficos tras la Primera Gran Guerra. El ingeniero alemán Hugo Junkers diseño, poco después de la guerra, un monoplano cuya solitaria ala, sin puntal alguno, tuvo un éxito absoluto. (En 1939, el ingeniero ruso americano Igor Iván Sikorsky construyó un avión polimotor y diseñó el primer helicóptero, una aeronave con un rotor sobre el

fuselaje que permitía los despegues y aterrizajes verticales e incluso la suspensión en el aire<sup>5</sup>).

No obstante, a principios de los años veinte, el aeroplano siguió siendo un objeto más o menos extraño..., simplemente, otro horripilante invento para guerrear, o un juguete de pilotos temerarios. La aviación no se impuso por su propio valor hasta 1927, cuando Charles Augustus Lindbergh realizó un vuelo sin escalas desde Nueva York hasta París. El mundo celebró con entusiasmo aquella hazaña, y entonces se empezaron a crear realmente aeroplanos más grandes y seguros.

Desde su implantación como medio de transporte, el aeroplano se benefició de dos innovaciones mecánicas fundamentales. Primero, la adopción del motor turborreactor. En este motor, los gases calientes y explosivos del combustible movían una turbina ejerciendo presión sobre sus palas, en lugar de mover pistones. El mecanismo era simple, de mantenimiento económico y poco vulnerable a las averías; para ser un modelo funcional sólo le faltaba la preparación de aleaciones que pudieran resistir las altas temperaturas de los gases. En 1939 estuvieron ya listas estas aleaciones. Desde entonces son cada vez más populares los aviones «turbopropulsados» con motor de turbina para mover las hélices.

Pero, hoy han sido superados, al menos para vuelos largos, por el segundo prototipo fundamental: el avión con motores a reacción. En este caso, la fuerza propulsora es idéntica, en lo esencial, a la que impele un globo cuando se escapa el aire por su boca abierta. Éste es el efecto acción-reacción: el movimiento expansivo del aire que escapa en una dirección produce un movimiento o impulso equivalente en la dirección opuesta, de la misma forma que la salida de un proyectil por el cañón comunica un brusco retroceso al arma. En el motor a reacción, el combustible, al quemarse, desprende gases muy calientes, cuya alta presión propulsa el avión con gran fuerza, mientras ellos salen disparados hacia atrás por la tobera. El cohete tiene el mismo medio de propulsión, salvo la circunstancia que él lleva sus propias reservas de oxígeno para quemar el combustible.

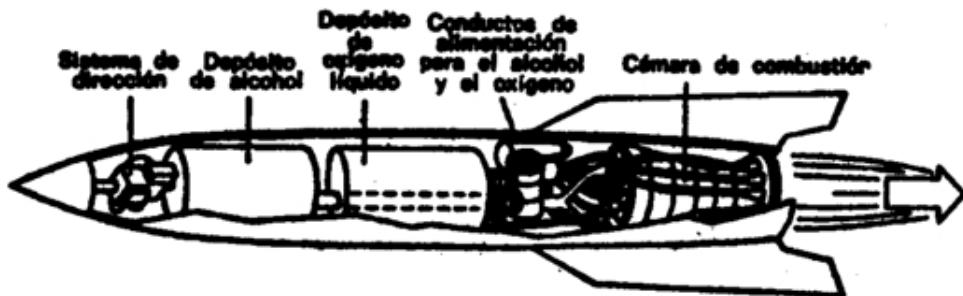
Las patentes para la «propulsión a chorro» fueron registradas por un ingeniero francés, René Lorin, ya en el año 1913, pero entonces el esquema era totalmente

---

<sup>5</sup> El helicóptero tuvo un precursor en el autogiro, ideado por el ingeniero e inventor español Juan de la Cierva y Codorníu. (*N. de los T.*)

inaplicable a las aeronaves. El motor a reacción sólo es económico para velocidades superiores a los 650 km/h. En 1939, el inglés Frank Whittle pilotó un avión turborreactor bastante práctico para el momento, y, en enero de 1944, Gran Bretaña y los Estados Unidos hicieron entrar en combate aviones a reacción contra las «bombas volantes», el arma V-1 alemana, una aeronave de mando automático, no tripulada, con una carga de explosivos a proa.

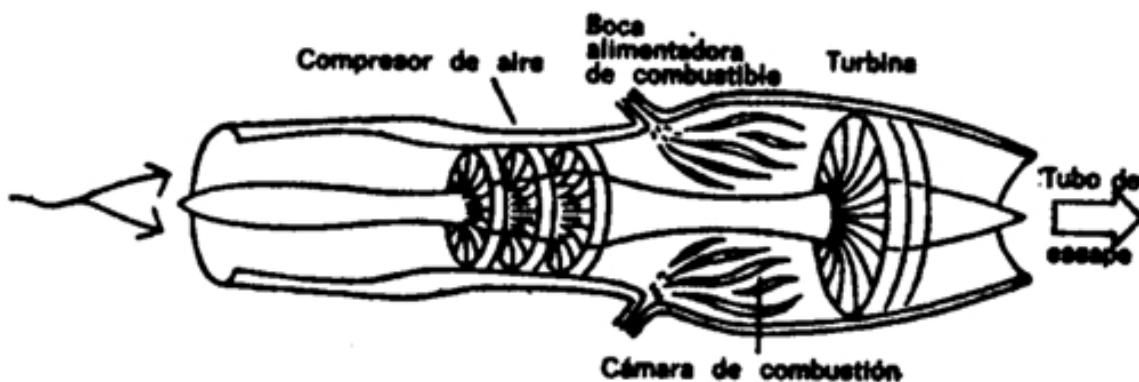
Tras la Segunda Guerra Mundial se perfeccionó el avión turborreactor militar, cuya velocidad se igualó a la del sonido. Las moléculas del aire, con su elasticidad natural y su capacidad para proyectarse solamente hacia delante y hacia atrás, gobiernan la velocidad del sonido.



*Cohete ordinario de combustible líquido.*

Cuando el avión se aproxima a esta velocidad, dichas moléculas no pueden apartarse de su camino, por así decirlo, y entonces se comprimen contra la aeronave, que sufre diversas tensiones y presiones. Se ha llegado a describir la «barrera del sonido» como si fuese un obstáculo físico, algo infranqueable sin su previa destrucción. Sin embargo, los ensayos en túneles aerodinámicos permitieron diseñar cuerpos más fusiformes y, por fin, el 14 de octubre de 1947 un avión-cohete americano, el X-1, pilotado por Charles E. Yeager, «rompió la barrera del sonido»; por primera vez en la Historia, el hombre se trasladó a mayor velocidad que el sonido. Durante la guerra de Corea, a principios de los años cincuenta, se libraron batallas aéreas con aviones turborreactores, los cuales evolucionaban a tales velocidades, que las pérdidas de aparatos fueron, comparativamente, muy reducidas.

La relación entre velocidad de un objeto y velocidad del sonido (1.191 km/h a 0º C) en el medio donde se mueve el objeto, es el «número Mach», llamado así porque el físico austriaco Ernst Mach fue quien investigó teóricamente por primera vez, hacia mediados del siglo XIX, las consecuencias del movimiento a tales velocidades.



*Un turbomotor. Aspira el aire para comprimirlo y mezclarlo con combustible. Esta mezcla se enciende en la cámara de combustión. Al expandirse, los gases mueven la turbina y producen el impulso.*

En la década de los sesenta, el aeroplano rebasó la velocidad Mach 5. Esta prueba se realizó con el avión experimental X-15, cuyos cohetes le permitieron remontarse, durante breves períodos, a alturas suficientes como para que sus pilotos obtuvieran la calificación de «astronautas». Los aviones militares se desplazan a velocidades menores, y los comerciales son aún más lentos.

Una aeronave que viaje a «velocidades supersónicas» (sobre el Mach 1) empuja hacia delante sus propias ondas sonoras, pues se traslada más aprisa que ellas. Si el avión reduce la marcha o cambia de curso, las ondas sonoras comprimidas, siguen trasladándose independientemente y, si están bastante cerca del suelo, lo golpean con un ensordecedor «trallazo sónico». (El restallido de un látigo es una miniatura del trallazo sónico, porque, si se sabe manejarlo, la punta de la tralla puede trasladarse a velocidades supersónicas.)

## Radio

En 1888, Heinrich Hertz realizó sus famosos experimentos para detectar las ondas radioeléctricas que previera veinte años antes James Clerk Maxwell (véase capítulo VII). Lo que hizo en realidad fue generar una corriente alterna de alto voltaje, que surgía primero de una bola metálica y luego de otra; entre ambas había una pequeña separación. Cuando el potencial alcanzaba su punto culminante en una dirección u otra, enviaba una chispa a través del vacío. En estas circunstancias, y según predecía la ecuación de Maxwell- se debía producir una radiación electromagnética. Hertz empleó un receptor, consistente en una simple bobina de alambre con una pequeña abertura en un extremo para detectar esa energía. Cuando la corriente originaba una radiación en el primer dispositivo, dicha radiación producía asimismo una corriente en el segundo. Hertz reparó en el salto de pequeñas chispas en la abertura de su dispositivo detector situado lejos del artefacto emisor, en el extremo opuesto de la habitación. Evidentemente, la energía se transmitía a través del espacio.

Colocando su bobina detectora en diversos puntos del aposento, Hertz consiguió definir la forma de las ondas. En el lugar donde las chispas se caracterizaban por su brillantez, las ondas tenían un vientre acentuado. Cuando no saltaba chispa alguna, eran estacionarias. Así pudo calcular la longitud de onda de la radiación. Comprobó que estas ondas eran mucho más largas que las luminosas.

En la siguiente década, muchos investigadores pensaron que sería factible emplear las «ondas hertzianas» para transmitir mensajes de un lugar a otro, pues tales, ondas podrían contornear los obstáculos gracias a su gran longitud. En 1890, el físico francés Édouard Branley perfeccionó el receptor remplazando la bobina por un tubo de vidrio lleno con limaduras de metal, al que se enlazaba, mediante hilos eléctricos, una batería. Las limaduras no admitían la corriente de batería a menos que se introdujera en ellas una corriente alterna de alto voltaje, tal como las ondas hertzianas. Con este receptor pudo captar las ondas hertzianas a una distancia de 137 m. Más tarde, el físico inglés Oliver Joseph Lodge, quien ganó después cierto prestigio equívoco como paladín del espiritismo, modificó ese artefacto consiguiendo detectar señales a una distancia de 800 m y enviar mensajes en el código Morse.

El inventor italiano Guglielmo Marconi intuyó que se podría mejorar el conjunto conectando a tierra un lado del generador y del receptor, y otro, a un alambre, llamado, más tarde, «antena» (tal vez porque se parecía, supongo yo, a esos apéndices de los insectos). Empleando potentes generadores, Marconi logró enviar señales a una distancia de 14,5 km en 1896, a través del canal de la Mancha en 1898, y a través del Atlántico en 1901. Así nació lo que los británicos llaman aún «telegrafía sin hilos», y nosotros «radiotelegrafía» o, para abreviar, simplemente «radio».

Marconi ideó un sistema para eliminar la «estática» de otras fuentes y sintonizar exclusivamente con la longitud de onda generada por el transmisor. Por sus inventos, Marconi compartió el premio Nobel de Física en 1909 con el físico alemán Karl Ferdinand Braun, quien contribuyó también al desarrollo de la radio.

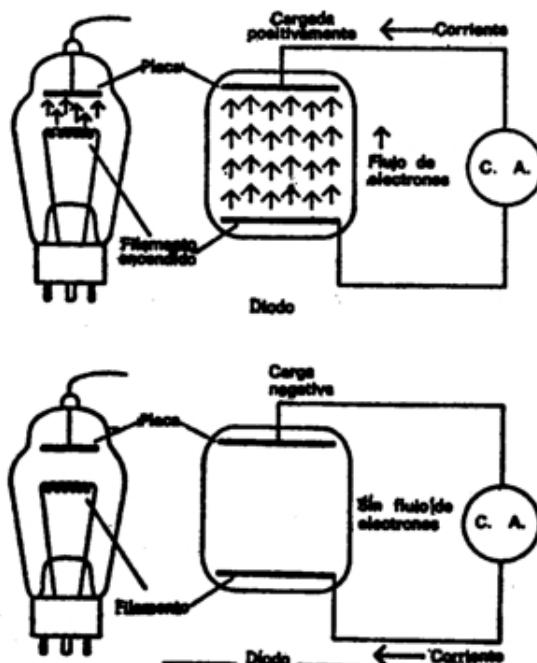
El físico americano Reginald Aubrey Fessenden ideó un generador especial con corrientes alternas de alta frecuencia (dejando a un lado el artefacto productor de chispas), así como un sistema para «modular» la onda radioeléctrica y hacerle reproducir el esquema de las ondas sonoras. Se moduló, pues, la amplitud (o altura) de las ondas; en consecuencia, se le llamó «modulación de amplitud», conocida hoy día por radio AM. En la Nochebuena de 1906, los receptores radiofónicos captaron por primera vez música y palabras.

Los primeros radioyentes entusiastas hubieron de sentarse ante sus receptores con los imprescindibles auriculares. Se requirió, pues, algún medio para fortalecer o «amplificar» las señales, y la respuesta se encontró en otro descubrimiento de Edison, su único descubrimiento en el terreno de la ciencia «pura».

En 1883, durante uno de sus experimentos para perfeccionar la lámpara eléctrica, Edison soldó un alambre en una bombilla eléctrica junto al filamento incandescente. Ante su sorpresa, la electricidad fluyó desde el filamento hasta el alambre, salvando el aire interpuesto entre ambos. Como este fenómeno no tuvo utilidad para sus propósitos, Edison, hombre siempre práctico, lo anotó en su libreta y se olvidó totalmente de él. Pero el «efecto Edison» cobró gran importancia cuando se descubrió el electrón; entonces pudo comprobarse que la corriente que fluía a través de un espacio representaba el flujo de electrones. El físico inglés Owen Williams Richardson demostró, mediante experimentos realizados entre 1900 y

1903, que los electrones «fluían» de los filamentos metálicos calentados en el vacío. Por ello le concedieron en 1928 el premio Nobel de Física.

En 1904, el ingeniero electrotécnico inglés John Ambrose Fleming aplicó, con suma lucidez, el efecto Edison. Rodeó con una pieza cilíndrica metálica (llamada «placa») el filamento dentro de la ampolla.



*Principio del tubo diodo de vacío.*

Ahora bien, esa placa podía actuar en dos formas. Si estuviera cargada positivamente, atraería a los electrones despedidos por el filamento incandescente y crearía así un circuito eléctrico. Pero si su carga fuera negativa, repelería a los electrones e impediría el flujo de la corriente. Supongamos, pues, que se conecta esa placa con una fuente de corriente alterna. Cuando la corriente fluye en una dirección, la placa adquiere carga positiva y deja pasar la corriente hasta el tubo; cuando la corriente alterna cambia de dirección, la placa se carga negativamente, y entonces no fluye ninguna corriente hacia el tubo. Por tanto, la placa deja pasar la corriente en una sola dirección y la transforma de alterna en continua. Al actuar dicho tubo como una válvula respecto a la corriente, los ingleses le dieron el nombre de «válvula». En Estados Unidos sigue denominándose, vagamente,

«tubo». En sentido más universal, los científicos lo llaman «diodo», porque tiene dos electrodos: el filamento y la placa.

El diodo sirve como «rectificador» en un receptor radiofónico, pues cambia la corriente alterna en continua cuando es necesario. Allá por 1907, el inventor americano Lee de Forest dio un paso más. Insertó un tercer electrodo en su tubo, haciendo de él un «triodo». El tercer electrodo es una placa perforada («rejilla») entre el filamento y la placa.

La rejilla atrae electrones y acelera su flujo desde el filamento a la placa (por conducto de los orificios). Un pequeño aumento de la carga positiva en la rejilla, acrecentará considerablemente el flujo de electrones desde el filamento a la placa. Por consiguiente, incluso la pequeña carga agregada a las débiles señales radiofónicas incrementará sobremanera el flujo de corriente, y esta corriente reflejará todas las variaciones impuestas por las ondas radioeléctricas. En otras palabras, el triodo actúa como un «amplificador». Los triodos y otras modificaciones aún más complicadas del tubo han llegado a ser elementos esenciales no sólo para los aparatos radiofónicos, sino para toda clase de material electrónico. Aún era necesario dar otro paso adelante si se quería popularizar realmente el receptor radiofónico. Durante la Primera Guerra Mundial, el ingeniero electrotécnico americano Edwin Howard Armstrong diseñó un dispositivo para reducir la frecuencia de una onda radioeléctrica. Por aquellos días, su finalidad era la localización de aviones enemigos, pero cuando acabó la guerra, se decidió aplicarlo al receptor radiofónico. El «receptor superheterodino» de Armstrong permitió sintonizar exactamente a una determinada frecuencia, mediante el simple giro de un pequeño disco, labor que antes requería una interminable serie de tanteos en una gama de posibles frecuencias. En 1921, una emisora de Pittsburgh inició sus programas radiofónicos regulares. La imitaron, en rápida sucesión, otras emisoras, y, con el control del volumen sonoro, así como la sintonización reducida a un breve tanteo, los receptores radiofónicos adquirieron enorme popularidad. En 1927, las conversaciones telefónicas pudieron atravesar los océanos, con ayuda de la Radio, y fue un hecho el «teléfono inalámbrico».

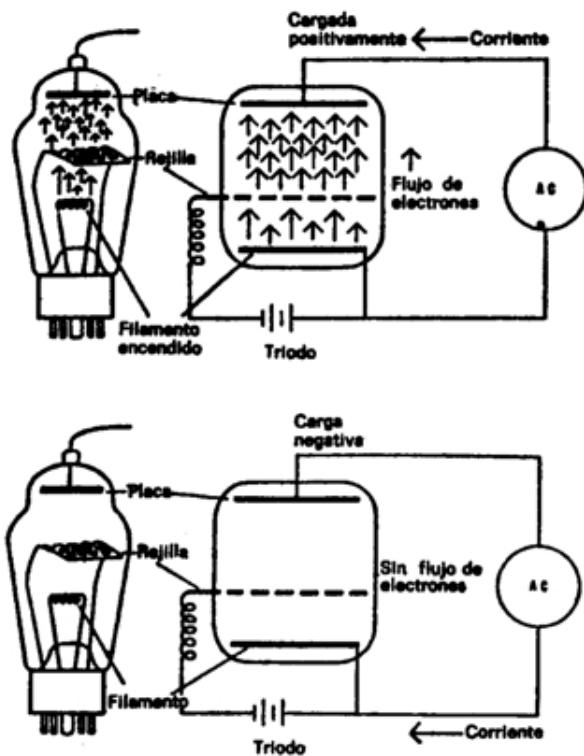
Sólo subsistió el problema de la estática. Los sistemas sintonizadores implantados por Marconi y sus sucesores redujeron el «ruido» de tormentas y otras

perturbaciones eléctricas, pero no lo eliminaron. Armstrong fue quien halló otra vez la respuesta. Sustituyó la modulación de amplitud, sujeta a las interferencias de fuentes sonoras en modulaciones accidentales de amplitud- por la modulación de frecuencia. Es decir, mantuvo a nivel constante la amplitud de la onda radioeléctrica portadora y dio prioridad a la variación de frecuencia. Cuando la onda sonora tenía gran amplitud, se reducía la frecuencia de la onda portadora, y viceversa. La frecuencia modulada (FM) eliminó virtualmente la estática, y los receptores FM fueron solicitados, tras la Segunda Guerra Mundial, para programas de música seria.

La televisión fue una consecuencia inevitable de la radio, tal como las películas sonoras lo fueron de las mudas. El precursor técnico de la televisión fue el transmisor telegráfico de fotografías. Esto equivalía a la reproducción fotográfica mediante una corriente eléctrica: un fino rayo de luz pasaba a través de la imagen en una película fotográfica y llegaba hasta una válvula fotoeléctrica situada detrás. Cuando la película era relativamente opaca, se generaba una corriente débil en la válvula fotoeléctrica; y cuando era más transparente, se formaba una poderosa corriente. El rayo luminoso «barría» con rapidez la imagen de izquierda a derecha y producía una corriente variable, que daba toda la imagen. La corriente se transmitía por alambres, y en el punto de destino reproducía la imagen del filme mediante un proceso inverso. Hacia principios de 1907, Londres transmitió hasta París estas fotos telegráficas.

Televisión es la transmisión de una «cinta cinematográfica» en vez de fotografías, ya sea o no «en directo». La transmisión debe ser muy rápida, lo cual significa que se debe «barrer» la acción con suma celeridad. El esquema «claroscuro» de la imagen se convierte en un esquema de impulsos eléctricos, mediante una cámara en lugar de película, un revestimiento metálico que emite electrones bajo el impacto de la luz.

En 1926, el inventor escocés John Logie Baird exhibió por primera vez un prototipo de receptor de televisión. Pero el primer aparato funcional de televisión fue el «iconoscopio», patentado en 1938 por el inventor norteamericano, de origen ruso, Vladimir Kosma Zworykin. En el iconoscopio, la cara posterior de la cámara está revestida con múltiples gotas de plata y películas de cesio.

*Principio del triodo.*

Cada una emite electrones cuando barre el rayo luminoso y en proporción a la potencia lumínica. Más tarde se remplazó el iconoscopio por el «orticonoscopio», aparato perfeccionado en el que la pantalla de cesio y plata era suficientemente sutil para que los electrones emitidos se proyectaran adelante y golpearan una tenue placa vítrea que emitía, a su vez, más electrones. Esta «amplificación» acrecentaba la sensibilidad de la cámara a la luz, de forma que era innecesaria una iluminación potente.

El televisor es una variedad del tubo de rayos catódicos. Los electrones fluyen de un filamento («cañón electrónico»), para incidir sobre una pantalla revestida con sustancia fluorescente, que irradia luz en proporción a la intensidad del chorro electrónico. Parejas de electrodos le obligan a barrer la pantalla de izquierda a derecha en centenares de líneas horizontales con mínimas separaciones entre sí y, por tanto, «pintan» la imagen sobre la pantalla en una trigésima parte de segundo. El rayo prosigue «pintando» imágenes consecutivas al ritmo de 30/seg. La pantalla

se llena de innumerables puntos (claros u oscuros, según los casos), pero gracias a la persistencia de la visión humana, no vemos solamente un cuadro completo, sino también una secuencia ininterrumpida de movimiento y acción.

En la década de 1920 se hicieron ensayos con la televisión experimental, pero ésta no pudo ser explotada comercialmente hasta 1947. Desde entonces acapara bastante terreno del entretenimiento público. Hacia mediados de la década de 1950 se agregaron dos innovaciones. Mediante el empleo de tres tipos de material fluorescente en la pantalla del televisor, ideados para reaccionar ante los rayos de luz roja, azul y verde, se introdujo la televisión en color. Y el «videógrafo», sistema de grabación simultánea de sonidos e imágenes, con cierto parecido a la banda sonora de la cinta cinematográfica, posibilitó la reproducción de programas o acontecimientos con más fidelidad que la proyección cinematográfica.

El tubo de rayos catódicos, verdadero corazón de todos los artificios electrónicos, llegó a ser un factor limitativo. Por regla general, los componentes de un mecanismo se perfeccionan progresivamente con el tiempo, lo cual significa que, por un lado, se acrecientan su poder y flexibilidad, mientras por el otro se reducen su tamaño y masa. (Eso se ha llamado a veces «miniaturización».) Pero el tubo de rayos catódicos tuvo dificultades en su camino hacia la miniaturización. Y entonces, de una forma totalmente casual, surgió una insospechada solución.

En la década de 1940, varios científicos de los «Bell Telephone Laboratories» se interesaron por las sustancias llamadas «semiconductores». Estas sustancias, tales como el silicio y el germanio, conducen la electricidad de una manera moderada. Así, pues, el problema consistió en averiguar las causas de tal comportamiento. Los investigadores de «Bell Telephone Laboratories» descubrieron que esa peculiar conductividad obedecía a ciertas impurezas residuales mezcladas con el elemento. Consideremos, por ejemplo, un cristal de germanio puro. Cada átomo tiene 4 electrones en su capa exterior y, según la disposición regular de los átomos en el cristal, cada uno de los 4 electrones se empareja con un electrón del átomo contiguo, así que todos los electrones forman pares unidos por lazos estables. Como esa distribución es similar a la del diamante, todas las sustancias como el germanio, silicio, etc., se denominan «diamantinas».

Si ahora agregamos un poco de arsénico a esa presunta disposición diamantina, el cuadro se complica no poco. El arsénico tiene 5 electrones en su capa exterior. Cuando el átomo de arsénico sustituya al de germanio en el cristal, podrá emparejar 4 de sus 5 electrones con los átomos vecinos, pero el 5º «quedará suelto». Ahora bien, si aplicamos un voltaje eléctrico a ese cristal, el electrón suelto deambulará en dirección al electrodo positivo. No se moverá con tanta soltura como lo harían los electrones en un metal conductor, pero el cristal conducirá la electricidad mejor que los cuerpos aislantes, como el azufre o el vidrio.

Lo dicho no es muy sorprendente, pero ahora nos encontramos con un caso bastante más extraño. Añadamos al germanio un poco de boro en lugar de arsénico. El átomo de boro tiene sólo 3 electrones en su órbita exterior, que pueden emparejarse con otros tantos del átomo vecino de germanio. Pero, ¿qué sucede con el cuarto electrón de este último átomo? ¡Este electrón se empareja con la «nada»! Y no está fuera de lugar el empleo de la palabra «nada», porque en ese lugar donde el electrón debería encontrar un asociado en el cristal de germanio puro, parece realmente un vacío. Si se aplica corriente eléctrica al cristal contaminado por el boro, el siguiente electrón vecino, atraído por el electrodo positivo, se moverá hacia ese vacío. Y al obrar así, deja un vacío donde estaba, y el electrón vecino más alejado del electrodo positivo se apresura a ocuparlo. Por tanto, este vacío se traslada hacia el electrodo negativo, moviéndose exactamente como un electrón, aunque en dirección contraria. Resumiendo: se ha hecho conductor de corriente eléctrica.

Para trabajar eficazmente, el cristal debe ser casi puro, o sea, tener la cantidad justa de impurezas específicas (por ejemplo, arsénico o boro).

El semiconductor germanio-arsénico con un electrón volante es, según se dice, del «tipo n» (*n* por «negativo»). El semiconductor germanio-boro con un vacío volante que actúa como si estuviera cargando positivamente, es del «tipo p» (*p* por «positivo»).

A diferencia de los conductores ordinarios, la resistencia eléctrica de los semiconductores desciende cuando se eleva la temperatura. Ocurre esto porque las temperaturas elevadas debilitan la retención de electrones por los átomos y, consecuentemente, aquéllos tienen más libertad de movimiento. (En un conductor

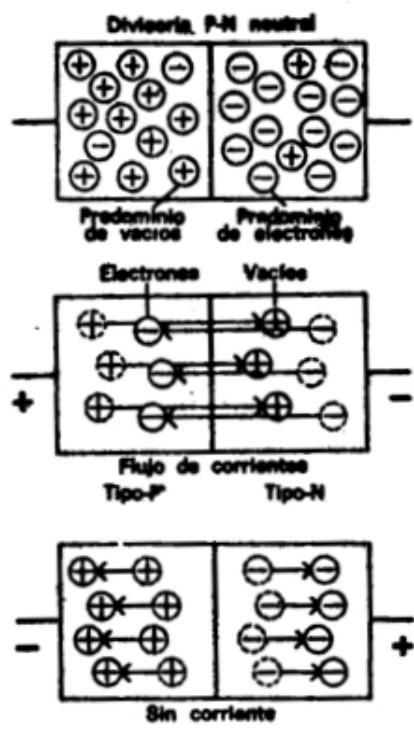
metálico, los electrones tienen ya suficiente libertad a temperaturas ordinarias. La elevación de temperatura induce más movimientos erráticos y obstaculiza su flujo en respuesta al campo eléctrico.) Al determinarse la resistencia de un semiconductor, se pueden medir temperaturas que son demasiado elevadas para su adecuada medición con otros métodos. Ese semiconductor medidor de temperaturas ha recibido el nombre de *termistor*.

Pero los semiconductores en combinación pueden hacer mucho más. Supongamos ahora que hacemos un cristal de germanio con los tipos *p* y *n* a partes iguales. Si conectamos la mitad «tipo *n*» con un electrodo negativo y la «tipo *p*» con un electrodo positivo, los electrones del lado «tipo *n*» atravesarán el cristal hacia el electrodo positivo, y los vacíos del lado «tipo *p*» se moverán en dirección opuesta hacia el electrodo negativo. Por tanto, una corriente fluye a través del cristal. Invirtamos ahora la situación, es decir, conectemos la mitad «tipo *n*» con el electrodo positivo y la mitad «tipo *p*» con el electrodo negativo. Esta vez los electrones del lado *n* se moverán hacia el electrodo positivo, es decir, se alejarán del lado *p*, e igualmente los vacíos del lado *p* se apartarán del lado *n*. En consecuencia, las regiones limítrofes en la divisoria entre los lados *n* y *p* pierden sus electrones y vacíos libres. Ello entraña una ruptura del circuito y, por tanto, no circula la corriente.

En suma, tenemos ya una estructura que puede actuar como rectificador. Si transmitimos una corriente alterna a ese cristal binario, el cristal dejará pasar la corriente sólo en una dirección. Por tanto, la corriente alterna se convertirá en corriente continua. El cristal servirá de diodo, tal como el tubo catódico (o «válvula»).

Con ese dispositivo, la Electrónica dio media vuelta para utilizar el primer tipo de rectificador empleado en la radio, a saber, la «galena». Pero esta nueva clase de cristal fue mucho más efectiva y variada. Sus ventajas sobre el tubo catódico fueron impresionantes. Por lo pronto resultó más ligera y resistente, mucho menos maciza, invulnerable a las descargas y no se calentaba, todo lo cual la hizo más durable que el tubo. Se denominó al nuevo elemento, por sugerencia de John Robinson Pierce, de los laboratorios «Bell»- «transistor», porque transfería una señal a través de un *resistor*.

En 1948 William Shockley, Walter H. Brattain y John Bardeen, de los laboratorios «Bell» construyeron un transistor que podía actuar como amplificador. Era un cristal de germanio con una sutil sección tipo *p* emparedada entre dos terminales tipo *n*. En realidad, un triodo equivalente a una rejilla entre el filamento y la placa. Reteniendo la carga positiva en el centro del tipo *p*, se pudo enviar los vacíos a través de la divisoria para controlar el flujo de electrones. Por añadidura, una pequeña variación en la corriente del tipo *p* originó una considerable variación en la corriente del sistema semiconductor.



*Principio del transistor.*

Así, el triodo semiconductor pudo servir como amplificador, tal como lo hubiera hecho el triodo de un tubo catódico. Shockley y sus colaboradores Brattain y Bardeen recibieron el premio Nobel de Física en 1956.

Por muy excelente que pareciera teóricamente el funcionamiento de los transistores, su empleo en la práctica requirió ciertos adelantos concomitantes de la tecnología. (Ésta es una realidad inalterable en la ciencia aplicada.) La eficiencia de un transistor estribó no poco en el empleo de materiales extremadamente puros, de

tal forma que se pudiera revisar con todo detenimiento la naturaleza y concentración de impurezas adicionales.

Afortunadamente, William G. Pfann aportó, en 1952, la técnica de refinadura por zonas. Se coloca una barra, por ejemplo de germanio- en el vórtice de un elemento calefactor circular, que reblandece y empieza a fundir una sección de la barra. Luego se hace penetrar más la barra en el vórtice, y la zona fundida se mueve a lo largo de él. Las impurezas de la barra tienden a concentrarse en la zona fundida y, por tanto, se las arrastra literalmente así hasta el extremo de la barra. Tras unos cuantos pasos semejantes, el cuerpo principal de la barra de germanio muestra una pureza insuperable.

En 1953 se fabricaron minúsculos transistores para su empleo como audífonos, unas piezas tan pequeñas que se podían ajustar en el oído. En suma, el transistor, cuyo incesante desarrollo le permitió manipular altas frecuencias, resistir el calor y reducirse a un tamaño diminuto- asumió muchas funciones del tubo de rayos catódicos. Tal vez el ejemplo más notable sea su empleo en las computadoras electrónicas, cuyo tamaño se ha reducido considerablemente mientras su efectividad aumenta. Durante ese proceso se han analizado nuevas sustancias de propiedades muy útiles como semiconductores. Por ejemplo, el fosfuro de indio y el arseniuro de galio han sido destinados al uso en transistores ideados para funcionar con altas temperaturas.

Ahora bien, los transistores no representan el último grito en «miniaturización». Allá por 1953 se diseñó un simple mecanismo de dos alambres que funcionaban a las temperaturas del helio líquido. Este aparato puede actuar como conmutador generando o interrumpiendo la superconductividad de un alambre mediante cambios en el campo magnético del otro. Tales conmutadores han recibido el nombre de «criotrones».

Por añadidura, hay otros minúsculos artefactos en los que dos sutiles capas metálicas (aluminio y plomo) están separadas por otra capa muy fina de material aislante. A temperaturas de la gama superconductora fluye la corriente, y, si el voltaje es lo bastante alto, aprovecha el aislante como si fuera un túnel. Mediante voltaje, temperatura e intensidad del campo magnético, se puede graduar la

corriente con gran precisión. Estos «emparedados túnel» ofrecen otro camino hacia la «miniaturización».

Para poner de relieve las múltiples interconexiones científicas basta mencionar los nuevos modelos de cohetes, que exigen formidables estructuras, pero también una miniaturización intensiva, pues los vehículos espaciales que se colocan en órbita suelen ser pequeños y deben ir abarrotados hasta los topes de diminutos instrumentos.

### Máser y Láser

Tal vez la novedad más fascinante entre todos los inventos recientes comience con las investigaciones referentes a la molécula del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Sus 3 átomos de hidrógeno están dispuestos como si ocuparan los tres vértices de un triángulo equilátero, mientras que el único átomo de nitrógeno se halla sobre el centro del triángulo, a cierta distancia.

La molécula de amoníaco tiene capacidad para vibrar. Es decir, el átomo de nitrógeno puede atravesar el plano triangular para ocupar una posición equivalente en el lado opuesto, regresar luego al primer lado y proseguir indefinidamente ese movimiento. En verdad se puede hacer vibrar la molécula del amoníaco con una frecuencia natural de 24 mil millones de veces por segundo.

Este período vibratorio es extremadamente constante, mucho más que el período de cualquier artificio cuyas vibraciones obedezcan a la acción humana; mucho más constante, incluso, que el movimiento de los cuerpos astronómicos. Mediante preparativos adecuados esas moléculas vibradoras pueden regular las corrientes eléctricas, que, a su vez, regularán los aparatos cronometradores con una precisión sin precedentes, algo demostrado en 1949 por el físico norteamericano Harold Lyons. Hacia mediados de la década de los cincuenta, esos «relojes atómicos» superaron largamente a todos los cronómetros ordinarios. En 1964 se consiguió medir el tiempo con un error de 1 seg por cada 100.000 años, empleando un máser que utilizaba átomos de hidrógeno.

En el curso de esas vibraciones, la molécula de amoníaco libera un rayo de radiación electromagnética cuya frecuencia es de 24 mil millones de ciclos por segundo. Su longitud de onda es 1,25 cm. Así, pues, está en la región de las microondas. Para

observar este hecho desde otro ángulo, basta imaginar que la molécula de amoníaco puede ocupar uno de dos niveles energéticos cuya diferencia de energía es igual a la de un fotón que represente una radiación de 1,25 cm. Si la molécula de amoníaco desciende del nivel energético más alto al más bajo, emitirá un fotón de dicho tamaño. Si una molécula en el nivel energético más bajo absorbe un fotón semejante, se elevará inmediatamente al nivel energético más alto.

Pero, ¿qué ocurrirá cuando una molécula esté ya en el nivel energético más alto y quede expuesta a tales fotones? Ya en 1917, Einstein señaló que si un fotón del tamaño antedicho golpea a una molécula situada en el nivel superior, esta molécula se deslizará al nivel inferior y emitirá un fotón de idénticas dimensiones, que se moverá exactamente en la dirección del fotón entrante. Habrá, pues, dos fotones iguales donde sólo existía antes uno. Esto fue confirmado experimentalmente en 1924.

Por tanto, el amoníaco expuesto a la radiación de microondas podría experimentar dos posibles cambios: se aspiraría a las moléculas desde el nivel inferior al superior, o se las empujaría desde el superior al inferior. En condiciones ordinarias predominaría el primer proceso, pues sólo un porcentaje mínimo de moléculas ocuparía en un instante dado el nivel energético superior.

Sin embargo, supongamos que se diera con algún método para colocar todas o casi todas las moléculas en el nivel energético superior. Entonces predominaría el movimiento de arriba abajo, y, ciertamente, ello originaría un interesante acontecimiento. La radiación entrante de microondas proporcionaría un fotón, que empujaría a la molécula hacia abajo. Luego se liberaría un segundo fotón, y los dos se apresurarían a golpear otras tantas moléculas, con la consiguiente liberación de un segundo par. Los cuatro provocarían la aparición de cuatro más, y así sucesivamente. El fotón inicial desencadenaría un alud de fotones, todos del mismo tamaño y moviéndose exactamente en la misma dirección.

En 1953, el físico norteamericano Charles Hard Townes ideó un método para aislar las moléculas de amoníaco en el nivel energético superior y someterlas allí al estímulo de fotones microonda del tamaño apropiado. Entonces entraban unos cuantos fotones y se desataba una inundación de fotones. Así se pudo ampliar considerablemente la radiación entrante.

Se describió aquel proceso como «*microwave amplification by stimulated emission of radiation*», y con las iniciales de estas palabras se formó el nombre del instrumento: «máser».

Pronto se crearon los máser sólidos, cuerpos en los que se podía conseguir que los electrones ocuparan uno de dos niveles energéticos. Los primeros máasers, tanto gaseosos como sólidos, fueron intermitentes. Es decir, fue preciso atraerlos primero al nivel energético superior y luego estimularlos. Tras la rápida emisión radiactiva resultaba imposible obtener otra mientras no se repitiera el proceso de atracción.

Para salvar esta dificultad, el físico estadounidense de origen holandés, Nicolas Bloembergen, decidió emplear un sistema de tres niveles. Si el material elegido como núcleo del máser puede tener electrones en cualquiera de los tres niveles energéticos, uno inferior, uno intermedio y uno superior, entonces la atracción y la emisión pueden ser simultáneas. Se aspiran los electrones para hacerlos subir desde el nivel energético más bajo hasta el superior. Una vez allí, los estímulos adecuados les harán descender: primero, al nivel medio; luego, al inferior. Se requieren fotones de diferente tamaño para absorberlos y estimular la emisión; no habrá interferencias recíprocas entre ambos procesos. Así se tiene un máser continuo.

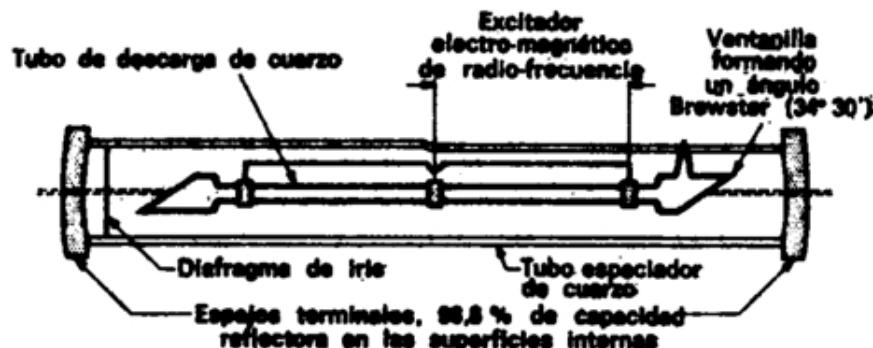
Como amplificador de microondas, el máser resulta ser un detector muy sensible en radioastronomía, donde los rayos microonda extremadamente débiles recibidos del espacio sidéreo se intensifican mucho por su conducto- y con gran fidelidad a las características originales de la radiación. (Reproducir sin pérdida de características originales, es reproducir sin «ruido». El máser es exactamente «silencioso» en este sentido de la palabra.) También aplicaron sus investigaciones al espacio. El satélite soviético *Cosmos 97*, lanzado el 30 de noviembre de 1965, llevaba a bordo un máser, que trabajó satisfactoriamente.

Por dicho trabajo, Townes recibió en 1964 el premio Nobel de Física, que compartió con dos físicos soviéticos, Nikolái Yennediéievich Basov y Alexandre Mijáilovich Prójorov, que habían trabajado independientemente en la teoría del máser.

Primeramente, la técnica máser fue aplicable a las ondas electromagnéticas de cualquier longitud, en particular, las de luz visible. En 1958, Townes marcó la posible ruta de tales aplicaciones a las longitudes de ondas luminosas. Se podría

llamar «máser óptico» a ese mayor productor de luz. O bien definir el singular proceso como «*light amplification by stimulated emission of radiation*» y emplear el nuevo grupo de iniciales para darle nombre: láser. Esta palabra se hizo cada vez más popular.

En 1960 el físico norteamericano Theodore Harold Maiman construyó el primer láser eficiente. Con tal fin empleó una barra de rubí sintético, que consiste, esencialmente, en óxido de aluminio, más una cantidad mínima de óxido de cromo. Si se expone a la luz esa barra de rubí, los electrones de los átomos de cromo ascenderán a niveles superiores, y su caída se iniciará poco después. Los primeros fotones de luz (emitidos con una longitud de onda de 694,3 mμ) estimulan la producción de otros muchos fotones, y la barra emite súbitamente un rayo de fuerte luz roja. Antes que terminara el año 1960, el físico persa Ali Javan, de los laboratorios «Bell», preparó el láser continuo empleando una mezcla gaseosa (neón y helio) como fuente de luz.



*Onda láser continua con espejos cóncavos y ventanillas en ángulo Brewster sobre el tubo de descarga. El tubo contiene un gas cuyos átomos se elevan a niveles altamente energéticos mediante excitación electromagnética. Entonces se estimula a esos átomos, introduciendo un rayo luminoso, para que emitan energía con determinada longitud de onda. La cavidad resonante, actuando como un órgano, constituye un tren de ondas coherentes entre los espejos terminales. El sutil rayo que escapa es el llamado láser. (Según un dibujo de la revista Science, 9 de octubre de 1964.)*

El láser hizo posible la luz en una forma inédita. Fue la luz más intensa que jamás se produjera y la más monocromática (una sola longitud de onda), pero no se redujo a eso ni mucho menos.

La luz ordinaria producida de cualquier otra forma, desde la hoguera hasta el Sol, pasando por la luciérnaga, se compone de paquetes de ondas relativamente cortas. Cabe describirla como cortas porciones de ondas apuntando en varias direcciones. Y son innumerables las que constituyen la luz ordinaria.

Sin embargo, la luz producida por un láser estimulado consta de fotones del mismo tamaño y que se mueven en la misma dirección. Ello significa que los paquetes de ondas tienen idéntica frecuencia, y como están alineados y enlazados por los extremos, digámoslo de este modo, se fusionan entre sí. La luz parece estar constituida por largos trechos de ondas cuya amplitud (altura) y frecuencia (anchura) son uniformes. Ésta es la «luz coherente», porque los paquetes de ondas parecen agruparse. Los físicos han aprendido a preparar la radiación coherente para largas longitudes de onda, Pero eso no se había hecho nunca con la luz hasta 1960. Por añadidura ideóse el láser de tal forma que se acentuó la tendencia natural de los fotones a moverse en la misma dirección. Se trabajaron y platearon los dos extremos del tubo de rubí para que sirvieran como espejos planos. Los fotones emitidos circularon velozmente arriba y abajo de la barra, produciendo más fotones con cada pasada, hasta adquirir la intensidad suficiente para escapar explosivamente por el extremo donde el plateado era más ligero. Estos fotones fueron precisamente los que habían sido emitidos en una dirección paralela al eje longitudinal de la barra, por los que circulaban, arriba y abajo, golpeando incesantemente los espejos extremos. Si un fotón de tamaño apropiado entraba en la barra siguiendo una dirección diferente (aunque la diferencia fuera muy leve) desencadenaba un tren de fotones estimulados en esa dirección diferente, éstos escapaban por los costados de la barra, tras unas cuantas reflexiones.

Un rayo de luz láser está formado por ondas coherentes tan exactamente paralelas, que puede recorrer largas distancias sin ensancharse ni perder, por tanto, toda eficacia. Se puede enfocar con la precisión suficiente para calentar una cafetera a unos 1.600 km de distancia, los rayos láser han alcanzado incluso la Luna en 1962, y su diámetro se ha extendido sólo a 3 km después de recorrer en el espacio 402 millones de kilómetros.

Una vez inventado el láser, se evidenció un interés explosivo, y no exageramos nada- por su desarrollo ulterior. Al cabo de pocos años se habían ideado láseres

individuales que podían producir luz coherente cuyas distintas longitudes de onda se contaban por centenares: desde la cercana luz ultravioleta, hasta la distante infrarroja.

Se obtuvo la acción láser de una infinita variedad de sólidos, óxidos metálicos, fluoruros y tungstatos, semiconductores, líquidos y columnas gaseosas. Cada variedad tenía sus ventajas y desventajas.

En 1964, el físico norteamericano Jerome V. V. Kasper ideó el primer láser químico. En este láser, la fuente de energía es una reacción química. (En el caso del primero, fue la disociación del  $\text{CF}_3\text{I}$  mediante una pulsación lumínica.) La superioridad del láser químico sobre las variedades ordinarias estriba en que se puede incorporar al propio láser la reacción química productora de energía y, por tanto, no se requiere una fuente externa de energía. Esto es análogo a la comparación entre un mecanismo movido por baterías y otro que necesita una conexión con la red general de fuerza. Aquí hay una ventaja obvia respecto a la manejabilidad, aparte que esos láseres químicos parecen ser muy superiores, por su eficiencia, a las variedades ordinarias (un 12 % largo, comparado con un 2 % corto).

Los láseres orgánicos, aquellos en los que se utiliza como fuente de luz coherente un complejo tinte orgánico aparecieron en 1966 y fueron ideados por John R. Lankard y Piotr Sorokin. La complejidad molecular posibilita la producción de luz mediante una gran diversidad de reacciones electrónicas y, por consiguiente, con muy diversas longitudes de onda. Así, es posible «sintonizar» un láser orgánico para que emita cualquier longitud de onda dentro de una periferia determinada, en lugar de confinarlo a una sola longitud de onda, como ocurre con los demás.

El rayo de la luz láser es muy fino, lo cual significa que se puede enfocar gran cantidad de energía en un área sumamente reducida; dentro de esa área, la temperatura alcanza niveles extremos. El láser puede vaporizar el metal para rápidos análisis e investigaciones del espectro; también puede soldar, cortar y perforar sustancias con un elevado punto de fusión. Aplicando el rayo láser al ojo humano, los cirujanos han conseguido soldar tan rápidamente las retinas desprendidas, que los tejidos circundantes no han sufrido la menor lesión por efecto del calor; y han empleado un método similar para destruir tumores.

Deseando evidenciar la amplia gama de las aplicaciones «láser», Arthur L. Shawlow ideó algo trivial, pero impresionante: una goma de borrar láser que, con un fucilazo asombrosamente breve, vaporiza la tinta mecanográfica de las letras escritas sin chamuscar siquiera el papel; en el otro extremo de la escala están los interferómetros láser, que pueden tomar medidas con una precisión sin precedentes. Cuando se intensifican las tensiones del globo terráqueo, resulta posible hoy día detectarlas mediante varios láseres: los cambios en las bandas de interferencia de sus luces delatarán hasta el más ínfimo movimiento terrestre con la sutil precisión de una parte por cada mil billones. Por otro lado, los primeros hombres que alcanzaron la Luna dejaron allá un mecanismo reflector ideado para proyectar rayos láser hacia la Tierra. Con este método se puede determinar la distancia a la Luna con mayor exactitud generalmente que las distancias entre dos puntos de la superficie terrestre.

Una aplicación factible que despertó gran entusiasmo desde los comienzos fue el empleo de los rayos láser como rayos transmisores en las comunicaciones. La alta frecuencia de la luz coherente, comparada con las radioondas coherentes utilizadas hoy por la radiodifusión y la televisión, parece ser capaz de aglomerar muchos miles de canales en espacios que ahora mantienen un solo canal. Ello hace pensar que algún día cada ser humano podrá tener su propia longitud de onda. Naturalmente, será preciso modular la luz láser. Para ello habrá necesidad de convertir en luz láser alterna las corrientes eléctricas alternas producidas por el sonido (bien sea mediante cambios en la amplitud de su frecuencia, o quizás encendiéndola y apagándola de forma intermitente), lo cual podría servir, a su vez, para producir corriente eléctrica alterna en otros lugares. Ya se está trabajando en el desarrollo de tales sistemas.

Como la luz está mucho más expuesta que las radioondas a las interferencias ocasionadas por nubes, niebla, bruma y polvo, tal vez sea necesario conducir la luz láser por medio de tuberías provistas de lentes (para reconcentrar los rayos a intervalos) y espejos (para reflejarlos en los recodos). No obstante, se ha ideado un láser de anhídrido carbónico que emite ininterrumpidamente unos rayos láser cuya inaudita potencia les permite internarse en la zona infrarroja lo suficiente para

librarse casi por completo de las perturbaciones atmosféricas. Esto posibilitaría también la comunicación a través de la atmósfera.

Una aplicación más portentosa aún de los rayos láser, sobre la cual se habla mucho hoy- es una nueva especie de fotografía. En la fotografía corriente, sobre la película fotográfica se proyecta un rayo de luz ordinaria reflejado desde un objeto. Lo que se registra es la sección transversal de la luz, y ello no representa, ni mucho menos, toda la información potencial que puede contener.

Supongamos, por el contrario, que un rayo de luz se divide en dos. Una parte incide sobre un objeto y se refleja con todas las anomalías que pueda imponerle ese objeto. La segunda parte se refleja en un espejo sin irregularidades. Luego ambas partes convergen en la película fotográfica, en la que se registra la interferencia de las diversas longitudes de onda. Teóricamente, esa grabación de las interferencias debería incluir todos los datos referentes a cada rayo luminoso. La fotografía que registra dicho esquema de interferencias parece estar velada cuando se la revela, pero si se proyecta una luz a través de la película fotográfica, esa luminosidad hará resaltar las características de la interferencia y se obtendrá una imagen con información completa. Tal imagen será tridimensional, tal como la superficie sobre la que se reflejara la luz; entonces, para demostrar el cambio habido en la perspectiva, se puede fotografiar la imagen desde diversos ángulos con el método fotográfico ordinario.

En 1947, el físico británico, de origen húngaro, Dennis Gabor, desarrolló por primera vez este concepto cuando investigaba métodos para perfilar la imagen producida por los microscopios electrónicos. Lo denominó «holografía», voz derivada de una palabra latina que significa «escrito de puño y letra».

Aunque la idea de Gabor tenía una sólida base teórica, resultó ser inaplicable porque la luz ordinaria no servía para ese fin. Con longitudes de ondas muy diversas y moviéndose en todas direcciones, las bandas de interferencia producidas por los dos rayos de luz serían tan caóticas que no facilitarían la menor información. Ello equivaldría a producir un millón de imágenes turbias, todas ellas superimpuestas en posiciones ligeramente distintas.

La introducción de la luz láser produjo un cambio total. En 1965, Emmet N. Leith y Juris Upatnieks, de la Universidad de Michigan, lograron plasmar los primeros

hologramas. Desde entonces, la técnica se ha perfilado hasta el punto de hacer posible la holografía en color y permitir ver con luz ordinaria las bandas de interferencia fotografiadas. La Microholografía promete agregar una nueva dimensión a las investigaciones biológicas, y nadie puede predecir hasta dónde llegará el «proceso» láser.

## Capítulo 9

### EL REACTOR

#### **Fisión Nuclear**

Los rápidos avances tecnológicos del siglo XX han sido posibles a costa de un formidable incremento en nuestro consumo de la energía que producen las fuentes terrestres. Cuando las naciones subdesarrolladas, con sus miles de millones de habitantes, se incorporen a los países industrializados y compartan su alto nivel de vida, el combustible se consumirá en proporciones aún más sensacionales. ¿Dónde encontrará el género humano las reservas de energía requeridas para sustentar semejante civilización?

Ya hemos visto desaparecer una gran parte de los bosques que cubren la superficie terrestre. La madera fue el primer combustible del hombre. A principios de la Era cristiana, casi toda Grecia, África del Norte y el Oriente Próximo fueron despojados inexorablemente de sus florestas, en parte para obtener combustible, y, en parte, para roturar la tierra con objeto de dedicarla a las tareas agropecuarias. La tala indiscriminada de bosques fue un desastre de doble alcance. No sólo destruyó las reservas de madera; el desmonte drástico de la tierra entrañó también la destrucción más o menos permanente de toda fertilidad. Casi todas esas regiones antiguas, que antaño sustentaron las más prósperas culturas humanas, son hoy día estériles e improductivas y están pobladas por gentes incultas, míseras.

La Edad Media presenció la progresiva despoblación forestal de Europa Occidental, y los tiempos modernos han visto una despoblación aún más rápida del continente norteamericano. Apenas quedan ya grandes masas de madera virgen en las zonas templadas del mundo, si se exceptúan Canadá y Siberia.

Parece improbable que el hombre pueda seguir adelante sin madera. Este material será siempre necesario para fabricar papel, muebles y maderaje.

En cuanto al combustible, el carbón y el petróleo han ocupado el lugar de la madera. El botánico griego Teofrasto ya mencionó el carbón nada menos que en el año 200 antes de J.C., pero los primeros informes sobre minería carbonífera en Europa datan del siglo XII. Durante el siglo XVII, Inglaterra, desprovista de bosques y con necesidades muy urgentes de madera para su Armada, optó por el consumo

en gran escala de carbón, un cambio que echó los cimientos para la Revolución Industrial.

Esta evolución fue muy lenta en otras partes. Incluso hacia 1800 la madera proporcionaba el 94 % del combustible en los jóvenes Estados Unidos, con sus densos bosques. En 1885, la madera cubrió todavía el 50 % de esas necesidades y en 1900 sólo el 3 %. El equilibrio derivó, por añadidura, más allá del carbón, el petróleo y el gas natural. En 1900, la energía suministrada por el carbón a los Estados Unidos fue diez veces mayor que la del petróleo y gas juntos. Medio siglo después, el carbón aportó solamente una tercera parte de la energía proporcionada por el petróleo y el gas. Carbón, petróleo, y gas son «combustibles fósiles», reliquias de la vida vegetal, viejos eones... y una vez se consumen no es posible remplazarlos. Respecto al carbón y el petróleo, el hombre vive de su capital dilapidándolo a un ritmo extravagante.

Particularmente, el petróleo, se está agotando muy aprisa. Hoy día el mundo quema un millón de barriles por hora, y el índice de consumo se eleva sin cesar. Aunque la Tierra conserva todavía mil billones de barriles aproximadamente, se calcula que la producción petrolífera alcanzará su punto culminante en 1980 y después empezará a declinar. Desde luego, se puede fabricar petróleo artificial combinando el carbón más común con hidrógeno bajo presión. Este proceso fue ideado en 1920 por el químico alemán Friedrich Bergius, quien, por ello, compartió (con Bosch) el premio Nobel de Química el año 1931. Por otra parte, las reservas carboníferas son grandes sin duda, tal vez rondan los 7 mil billones de toneladas, pero, no todo ese carbón es accesible a la minería. En el siglo XXV o quizás antes, el carbón puede llegar a ser un artículo muy costoso.

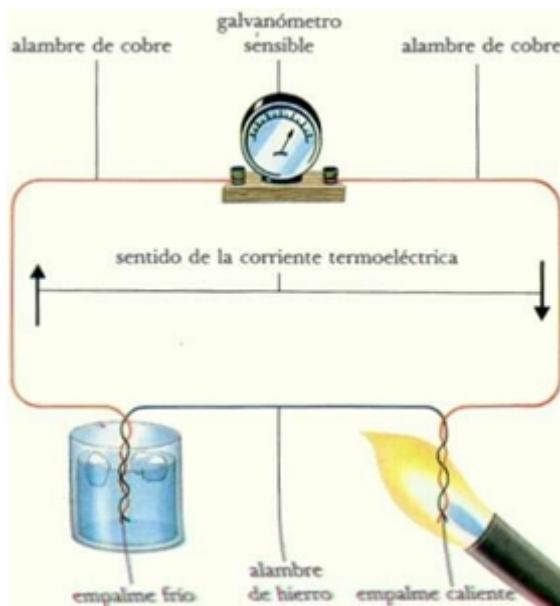
Hay esperanzas de nuevos hallazgos. Tal vez nos aguarden algunas sorpresas a juzgar por los indicios de carbón y petróleo en Australia, el Sahara y las regiones antárticas. Además, los adelantos tecnológicos pueden abaratar la explotación de cuencas carboníferas cada vez más profundas, horadar la tierra progresivamente en busca de petróleo y extraer este combustible de las reservas submarinas.

Sin duda encontraremos los medios de usar nuestro combustible con más eficacia. El proceso de quemar combustible para producir calor, convertir el agua en vapor, mover un generador o crear electricidad, desperdicia grandes cantidades de energía

en el camino. Se podrían evitar muchas pérdidas si se transformase directamente el calor en electricidad. La posibilidad de hacer tal cosa se presentó el año 1823, cuando un físico alemán, Thomas Johann Seebeck, observó que si se unen dos metales diferentes en un circuito cerrado y se calienta la divisoria entre ambos elementos, se mueve la aguja de un compás situado en sus inmediaciones. Ello significa que el calor produce una corriente eléctrica en el circuito («termoelectricidad»); pero Seebeck interpretó erróneamente su propio trabajo y el descubrimiento no tuvo consecuencias provechosas.

Sin embargo, con la llegada del semiconductor y sus técnicas, renació el antiguo «efecto Seebeck». Los aparatos termoeléctricos requieren semiconductores. Calentando el extremo de un semiconductor se crea un potencial eléctrico en la materia; cuando el semiconductor es del tipo *p*, el extremo frío se hace negativo; y si es del tipo *n*, positivo. Ahora bien, incorporando una estructura en forma de U a ambos tipos de semiconductores, con la juntura *n-p* bajo el fondo de la U, este fondo caldeado ocasionará que el extremo superior de la rama *p* gane una carga negativa y el extremo superior de la rama *n*, una positiva. De este modo, la corriente fluirá desde un extremo hasta el otro, y seguirá haciéndolo mientras se mantenga la diferencia de temperaturas. (E, inversamente, el uso de una corriente puede causar un descenso de temperatura, de modo que el aparato termoeléctrico tiene también aplicación como refrigerador.)

La célula termoeléctrica no requiere generadores costosos ni macizas máquinas de vapor, es portátil y se la puede instalar en zonas aisladas como suministradora en pequeña escala de electricidad. Todo cuanto necesita como fuente energética es un calentador de queroseno. Según se informa, la Unión Soviética emplea usualmente tales artificios en las zonas rurales.



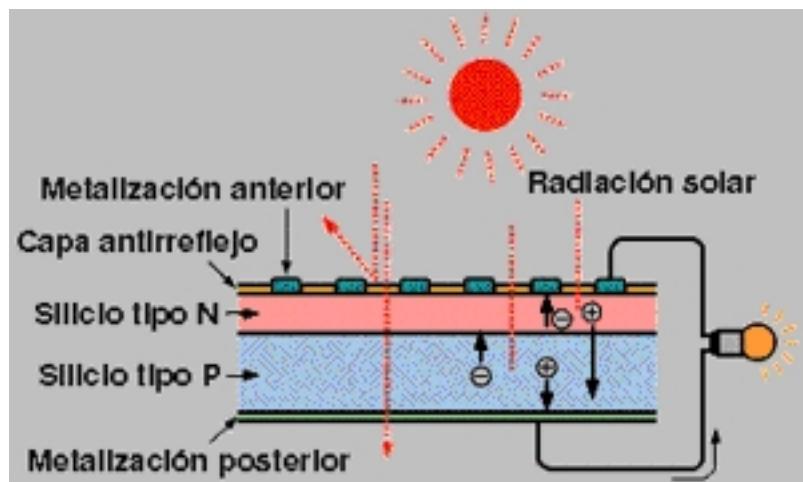
*La célula termoeléctrica. El conductor calorífico origina el flujo de electrones hacia el extremo frío del conductor tipo n, y desde la región fría a la caliente del tipo p. Si forma un circuito, la corriente fluye en la dirección que marcan las flechas. Así se convierte el calor en energía eléctrica.*

No obstante, los posibles perfeccionamientos de los métodos para usar combustible y la probabilidad de nuevos hallazgos carboníferos y petrolíferos, estas fuentes de energía son definitivamente limitadas. Llegará un día, tal vez no muy lejano, en que ni el carbón ni el petróleo sirvan como fuentes importantes y pletóricas de energía. Sin embargo, el hombre seguirá necesitando energía e incluso mayores cantidades que las requeridas hasta ahora. ¿Cómo proceder entonces?

Una posibilidad es hacer creciente uso de las fuentes cuya energía sea renovable: aprovechar la energía terrestre viviendo de las rentas, no del capital. La madera podría ser ese recurso si se dejara crecer el bosque y se recogiera la cosecha, aunque el bosque por sí solo no bastará ni mucho menos para satisfacer todas nuestras necesidades de energía. También podríamos dar mayor aplicación al poder del viento y el agua, si bien estos elementos tampoco podrán ser nunca algo más que fuentes subsidiarias de energía. Lo mismo cabe decir de otras fuentes potenciales de energía en la tierra tales como la búsqueda de calor interno (por ejemplo, fuentes termales) o el aprovechamiento de las mareas oceánicas.

Mucho más trascendental a largo plazo es la posibilidad de encauzar directamente parte de la vasta energía vertida sobre la Tierra por el Sol. Esta «insolación»

produce energía a un ritmo 50.000 veces mayor que toda la energía consumida en nuestro planeta. A este respecto, la «batería solar» es un artificio particularmente prometedor, pues hace uso también de semiconductores.



*Célula de una batería solar. Los rayos solares inciden sobre la termo-oblea y liberan los electrones, formando así pares de vacíos-electrones. La divisoria p-n actúa como una barrera, o campo eléctrico, separando los electrones de los vacíos. Por tanto se desarrolla una diferencia de potencial a través de la divisoria, y entonces fluye la corriente por el circuito alámbrico.*

Según la han diseñado los «Bell Telephone Laboratories» en 1954, es un «emparedado» plano de semiconductores tipo *n* y tipo *p*. La luz solar cayendo sobre la placa desaloja de su lugar a algunos electrones. La transferencia se conecta, como lo haría una batería ordinaria, con un circuito eléctrico. Los electrones liberados se mueven hacia el polo positivo y los vacíos marchan hacia el polo negativo, constituyéndose así una corriente. La batería solar puede desarrollar potenciales eléctricos de medio voltio y hasta 9 W de fuerza por cada centímetro cuadrado expuesto al sol. Esto no es mucho, pero lo más espléndido de la batería solar es que no tiene líquidos, ni productos químicos corrosivos ni partes móviles..., se limita a generar electricidad indefinidamente mientras le dé el sol.

El satélite artificial *Vanguard I*, lanzado por los Estados Unidos el 17 de marzo de 1958, fue el primero equipado con una batería solar para emitir sus señales radioeléctricas. Estas señales se siguen oyendo todavía al cabo de tanto tiempo, y seguirán dejándose oír durante muchos años.

La cantidad de energía que cae sobre un área de terreno en cualquier lugar soleado de la Tierra es de 9,4 millones de kilovatios-hora por año. Si algunas zonas especialmente favorecidas bajo ese aspecto, es decir, regiones desérticas como el Valle de la Muerte y el Sahara, estuviesen cubiertas con baterías solares y acumuladores eléctricos, podrían proveer al mundo con la electricidad necesaria por tiempo indefinido..., concretamente tanto como viva la raza humana, si no se suicida antes.

Pero, según parece, ni la presente generación ni la siguiente siquiera harán factible el encauzamiento de la energía solar. Por fortuna, tenemos una inmensa fuente de energía aquí, en la Tierra, que puede proveernos durante centenares de años cuando nos quedemos sin el económico carbón y el petróleo. Es la energía almacenada en el núcleo atómico.

Usualmente se denomina «energía atómica» a la energía nuclear, pero eso es un craso yerro. Hablando estrictamente, la energía es aquélla liberada por reacciones químicas tales como la combustión de carbón y petróleo, porque éstas representan el comportamiento del átomo en su conjunto. La energía generada por los cambios dentro del núcleo es de especie totalmente distinta y de magnitud mucho más vasta.

Apenas descubierto el neutrón por Chadwick en 1932 los físicos comprendieron que ahí se les ofrecía una maravillosa clave para desentrañar el núcleo atómico. Puesto que el neutrón no tenía carga eléctrica, podría penetrar fácilmente en el núcleo cargado. Los físicos empezaron inmediatamente a bombardear diversos núcleos con neutrones para observar las posibles reacciones nucleares resultantes; entre los más apasionados investigadores de esa nueva herramienta figuró el italiano Enrico Fermi.

Fermi y sus colaboradores descubrieron que se obtenían mejores resultados cuando se frenaba a los neutrones haciéndoles pasar primero por agua o parafina. Proyectando protones contra el agua o la parafina, los neutrones moderan su marcha tal como lo haría una bola de billar al recibir los golpes de otras. Cuando un neutrón se traslada a la velocidad «termal» (velocidad normal en el movimiento de los átomos), tiene mayores probabilidades de ser absorbido por el núcleo, porque permanece más tiempo en la vecindad de éste. Hay otra forma de enfocarlo si se

considera que la longitud de onda asociada al neutrón es mayor, porque la longitud de onda es inversamente proporcional al momento de la partícula. Cuando el neutrón reduce la marcha, su longitud de onda aumenta. Para emplear una metáfora, el neutrón se hace más perezoso y adquiere más volumen. Por consiguiente, golpea el núcleo con mayor facilidad, tal como una bola de bolera tiene más probabilidades de hacer un derribo total que una pelota de golf.

Esa probabilidad assignable a ciertas especies de núcleos para la captura de un neutrón se denomina su «sección transversal». Este término define metafóricamente el núcleo cual un blanco de tamaño concreto. Es más fácil lanzar una pelota de béisbol contra la pared de una granja que hacer puntería en una tabla de 30 cm a la misma distancia. Las secciones transversales del núcleo bajo el bombardeo de neutrones se calculan en mil millonésimas partes de millón de un centímetro cuadrado ( $10^{-24}$  de  $\text{cm}^2$ ). En 1942 los físicos americanos M. G. Holloway y C. P. Baker llamaron *barn* a esa unidad.

Cuando un núcleo absorbe un neutrón, su número atómico permanece invariable (porque la carga del núcleo sigue siendo la misma), pero su número másico asciende una unidad. El hidrógeno 1 se hace hidrógeno 2, el oxígeno 17 se hace oxígeno 18, y así sucesivamente. La energía que recibe el núcleo del neutrón cuando éste penetra en su masa, puede «excitar» al núcleo, es decir, acrecentar su contenido de energía. Entonces se emite esa energía adicional en forma de rayos gamma.

El nuevo núcleo es a menudo inestable. Por ejemplo, cuando el aluminio 27 capta un neutrón y se hace aluminio 28, uno de los neutrones en el nuevo núcleo pasa a ser rápidamente un protón (emitiendo un electrón). Este aumento en la carga positiva del núcleo ocasiona una transformación: el aluminio (número atómico 13) se hace silicio (número atómico 14).

Como el bombardeo de neutrones parecía un excelente recurso para transformar un elemento en el siguiente de la escala, Fermi decidió bombardear el uranio para ver si podía crear un elemento artificial: el número 93. Analizando los productos tras el bombardeo del uranio, él y sus colaboradores encontraron indicios de nuevas sustancias radiactivas. Creyeron tener ya el elemento 93, y lo llamaron «uranio X».

Pero, ¿cómo identificar positivamente el nuevo elemento? ¿Cuáles deberían ser sus propiedades químicas?

Pues bien, se pensó- el elemento 93 debería estar bajo el renio en la tabla periódica y, por tanto, sería similar químicamente el renio. (En realidad, y aunque nadie lo comprendiera por aquellas fechas, el elemento 93 pertenecía a una nueva y rara serie, lo cual significaba que se asemejaría al uranio, no al renio [véase capítulo V]; así, pues, se partió con el pie izquierdo en la búsqueda de su identificación.) Si fuera como el renio, tal vez se pudiera identificar la ínfima cantidad creada de «elemento 93» mezclando los productos del bombardeo de neutrones con renio y separando después el renio mediante procedimientos químicos. El renio actuaría como un «vehículo», transportando consigo el «elemento 93», químicamente similar. Si el renio demostrara poseer radiactividad, ello traicionaría la presencia del elemento 93.

El físico alemán Otto Hahn y la científica austriaca Lise Meitner, trabajando juntos en Berlín, siguieron esa línea de experimentación. El elemento 93 no se mostró con el renio. Entonces Hahn y Meitner se preguntaron si el bombardeo de neutrones no habría transformado el uranio en otros elementos cercanos a él en la tabla periódica, y se propusieron averiguarlo. Por aquellas fechas, 1938- Alemania ocupó Austria, y Fräulein Meitner, que como súbdita austriaca, se había sentido segura hasta entonces a pesar de ser judía, se vio obligada a huir de la Alemania hitleriana y buscar refugio en Estocolmo. Hahn prosiguió su trabajo con el físico alemán Fritz Strassman.

Varios meses después, Hahn y Strassman descubrieron que el bario adquiría cierta radiactividad cuando se le agregaba el uranio bombardeado. Ambos supusieron que esa radiactividad debería pertenecer al radio, el elemento situado inmediatamente debajo del bario en la tabla periódica. La conclusión fue que el bombardeo del uranio con neutrones cambiaba una parte de aquél en radio.

Pero este radio resultó ser una materia muy peculiar. Pese a sus impropios esfuerzos, Hahn no pudo separarlo del bario. Mientras tanto, en Francia, Irène Joliot-Curie y su colaborador P. Savitch emprendieron una tarea similar y fracasaron igualmente.

Entonces Meitner, la refugiada en Escandinavia, abordó audazmente el enigma y divulgó una conjetura que Hahn había expresado en sus círculos íntimos aunque sin atreverse a darle publicidad. En una carta abierta publicada por la revista británica *Nature* en enero de 1939, la doctora manifestó que si no se podía separar el bario del radio era porque allí no había ningún radio. El presunto radio sólo tenía un nombre: bario radiactivo. Fue bario lo que se había formado mediante el bombardeo del uranio con neutrones. Ese bario radiactivo decaía emitiendo una partícula beta y formando lantano. (Hahn y Strassman habían averiguado que si se agregaba a los resultados el lantano ordinario, éste mostraba cierta radiactividad que ellos asignaban al actinio; realmente se trataba de lantano radiactivo.)

Pero, ¿cómo se podía formar el bario del uranio? El bario era solamente un átomo de peso medio. Ningún proceso conocido de decadencia radiactiva podía transformar un elemento pesado en otro cuyo peso fuera sólo la mitad. Meitner tuvo la audacia de afirmar que el núcleo de uranio se había dividido en dos. La absorción de un neutrón había ocasionado lo que ella denominaba «fisión». Según ella, los dos elementos resultantes de esa división eran el bario y el elemento 43 situado a continuación del renio en la tabla periódica. Un núcleo del bario y otro del elemento 43 (llamado más tarde tecnecio) deberían formar juntos un núcleo de uranio. Esta sugerencia revistió singular audacia por la siguiente razón: se dijo que el bombardeo con neutrones consumiría solamente seis millones de electronvoltos cuando la idea generalizada por aquellas fechas respecto a la energía nuclear hacía suponer que ello requeriría centenares de millones.

El sobrino de Meitner, Otto Robert Frisch, partió presurosamente hacia Dinamarca para exponer la nueva teoría a Bohr antes de su publicación. Bohr hubo de reconocer que por ese medio resultaría sorprendentemente fácil dividir el núcleo, pero, por fortuna, él estaba elaborando entonces el modelo de gota líquida sobre la estructura nuclear, y le pareció que aquello serviría para elucidarlo. (Pocos años después, la teoría de la gota líquida, en la que se tenía presente el tema de las envolturas nucleares- explicaría la fisión nuclear hasta sus más recónditos detalles así como la causa que el núcleo se dividiera en dos mitades desiguales.)

Sea como fuere, con teoría o sin ella, Bohr captó instantáneamente el posible corolario. Cuando le dieron aquella noticia estaba preparando las maletas para

asistir a una conferencia de física teórica en Washington. Allí hizo saber a los físicos lo que se le había sugerido en Dinamarca sobre la fisión nuclear. Aquello causó una gran commoción. Los congresistas regresaron inmediatamente a sus laboratorios para comprobar la hipótesis y, al cabo de un mes, se anunciaron media docena de confirmaciones experimentales. Como resultado de aquello se otorgó a Hahn el premio Nobel de Química en 1944, y así se inició el trabajo que culminó con el arma destructiva más terrible que jamás se ideara.

### **La Bomba Atómica**

La reacción por fisión liberó cantidades desusadas de energía, superando largamente a la radiactividad ordinaria. Pero no fue sólo esa energía adicional lo que hizo de la fisión un fenómeno tan portentoso. Aún revistió más importancia el hecho que liberara dos o tres neutrones. Dos meses después de la carta abierta publicada por Meitner, numerosos físicos pensaron en la estremecedora posibilidad de una «reacción nuclear en cadena».

La expresión «reacción en cadena» ha adquirido un significado exótico aún cuando, realmente, es un fenómeno muy común. El quemar un simple trozo de papel es una reacción en cadena. Una cerilla proporciona el calor requerido para desencadenar la acción; una vez iniciada la combustión, ésta proporciona el verdadero agente, calor-imprescindible para mantener y extender la llama. La combustión suscita más combustión en proporciones siempre crecientes.

Eso es exactamente lo que sucede con la reacción nuclear en cadena. Un neutrón desintegra un átomo de uranio; éste libera dos neutrones que pueden ocasionar dos nuevas fisiones de las cuales se desprenderán cuatro neutrones que ocasionarán a su vez cuatro fisiones, y así sucesivamente. El primer átomo desintegrado suministra una energía de 200 MeV, el siguiente, 400 MeV, el otro 800 MeV, el siguiente 1.600 MeV, etc. Puesto que los intervalos entre las fases consecutivas equivalen aproximadamente a una mil billonésima de segundo se desprenden cantidades aterradoras de energía. La fisión de una onza de uranio produce tanta energía como la combustión de 90 t de carbón o 7.500 l de petróleo. Si se empleara con fines pacíficos, la fisión del uranio podría solventar todas nuestras

preocupaciones inmediatas sobre esos combustibles fósiles evanescentes y ese creciente consumo de energía.

Pero, infortunadamente, el descubrimiento de la fisión hizo su aparición poco antes que el mundo se sumiera en una guerra universal. Según calcularon los físicos, la desintegración de una onza de uranio rendiría tanta potencia explosiva como 600 t de TNT. Fue realmente horrible imaginar las consecuencias de una guerra librada con tales armas, pero aún fue más horripilante concebir un mundo donde la Alemania nazi monopolizara esos explosivos antes que los aliados.

El físico estadounidense de origen húngaro Leo Szilard, que había estado cavilando durante largos años sobre las reacciones nucleares en cadena, vislumbró claramente el inmediato futuro. Él y otros dos físicos húngaro-americanos, Eugene Wigner y Edward Teller, se entrevistaron con el afable y pacífico Einstein en el verano de 1939 y le hicieron escribir una carta al presidente Franklin Delano Roosevelt en la que se revelaba la potencialidad de la fisión del uranio y se recomendaba el desarrollo de tal arma con todos los medios posibles para adelantarse a los nazis.

Se redactó esa misiva el 2 de agosto de 1939, y su entrega al presidente se efectuó el 1 de octubre de 1939. Entre ambas fechas estalló la Segunda Guerra Mundial en Europa. Los físicos de la Universidad de Columbia, bajo la supervisión de Fermi, quien había partido de Italia hacia América el año anterior, trabajaron afanosamente para producir la fisión constante del uranio en grandes cantidades.

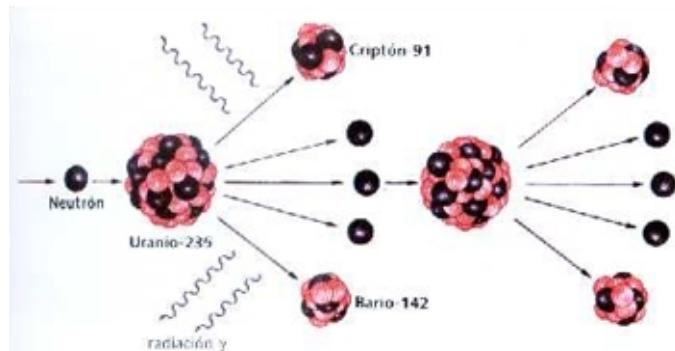
Inducido por la carta de Einstein, el Gobierno estadounidense intervino a su debido tiempo. El 6 de diciembre de 1941, el presidente Roosevelt autorizó (arriesgándose a un inmenso fracaso político en caso de malogro) la organización de un gigantesco proyecto, titulado con deliberada circunspección «Manhattan Engineer District», para construir una bomba atómica. Al día siguiente, los japoneses atacaron Pearl Harbor y los Estados Unidos entraron en la guerra.

Como era de esperar, la práctica no respondió fiel ni fácilmente a la teoría. Se requirieron no pocos experimentos para provocar la reacción en cadena del uranio. Primeramente fue preciso poseer una cantidad sustancial de uranio refinado hasta un grado de extrema pureza para no desperdiciar neutrones con la absorción ejercida por las impurezas. El uranio es un elemento bastante común sobre la

corteza terrestre; se le encuentra en la proporción de 2 g por cada tonelada de roca; así, pues, es cuatrocientas veces más común que el oro. Pero su dispersión es también considerable, y hay muy pocos lugares del mundo donde aparezca formando ricas venas o siquiera una concentración aceptable. Por añadidura, el uranio era una materia casi inservible antes de 1939 Y, por tanto, no se había ideado ningún método para purificarlo. En los Estados Unidos se había producido hasta entonces una onza de uranio a lo sumo.

Los laboratorios del «Iowa State College», bajo la dirección de Spedding..., abordaron el problema de la purificación mediante el intercambio de iones resinosos (véase capítulo V). Y en 1942 comenzó la producción de uranio razonablemente puro.

Ahora bien, eso fue tan sólo un primer paso. Llegados a ese punto fue preciso desmenuzar el uranio para separar sus fracciones más fisionables. El isótopo uranio 238 (U-238) tenía un número par de protones (92) y un número par de neutrones (146). Los núcleos con números pares de nucleones son más estables que los de números impares. El otro isótopo en el uranio natural, uranio 235- tenía un número impar de neutrones (143), y por consiguiente, según había predicho Bohr, sería más fisionable que el uranio 238.



*Reacción nuclear en cadena del uranio. Los círculos rosado-negros son núcleos de uranio; los puntos negros, neutrones; las flechas onduladas, rayos gamma; los pequeños rosados-negros, fragmentos de la fisión.*

En 1940, un equipo investigador bajo la supervisión del físico norteamericano John Ray Dunning, consiguió aislar una pequeña cantidad de uranio 235 y demostró que la conjectura de Bohr era cierta. El U-238 se desintegra solamente cuando lo golpean

neutrones rápidos de una energía determinada, pero el U-235 se somete a la fisión cuando absorbe neutrones de cualquier energía, hasta los simples neutrones termales.

El problema fue que en el uranio natural purificado sólo un átomo de cada 140 era U-235; los restantes pertenecían al U-238. Ello significaba que casi todos los neutrones liberados tras la fisión del U-235 serían captados por los átomos U-238 sin producir fisión alguna. Aún cuando se bombardease el uranio con neutrones suficientemente rápidos para desintegrar el U-238, los neutrones liberados por este U-238 no tendrían bastante energía para desatar una reacción en cadena entre los átomos remanentes de este isótopo más común. En otras palabras, la presencia del U-238 atenuaría y neutralizaría la reacción en cadena. Sería algo así como intentar quemar hojas húmedas.

Por entonces no hubo solución, salvo la de probar una disociación a gran escala entre el U-235 y el U-238, o al menos eliminar suficiente cantidad de U-238 para enriquecer sustancialmente el contenido de U-235 en la mezcla. Los físicos abordaron el problema con diversos procedimientos pero todos ellos ofrecieron escasas perspectivas de éxito. El único que pareció algo prometedor fue la «difusión gaseosa». Éste fue el método preferido, aunque enormemente costoso, hasta 1960. Entonces un científico alemán occidental ideó una técnica mucho más económica: si se aislara el U-235 mediante centrifugación, las moléculas más pesadas saldrían proyectadas hacia el exterior, y las más ligeras, conteniendo U-235, se rezagarían. Sin embargo, tal proceso abarataría la fabricación de bombas nucleares hasta un punto en que las potencias menores podrían emprenderla, lo cual no era deseable.

El átomo del uranio 235 es un 1,3 % menos masivo que el del uranio 238. Consecuentemente, si los átomos adquiriesen la forma gaseosa, los del U-235 se moverían con más rapidez que los del U-238. Por tanto, y en virtud de su mayor difusión, se los podría separar mediante una serie de barreras filtradoras. Pero primero sería preciso convertir el uranio en gas. El único medio de darle esa forma era combinarlo con flúor para hacer sexafluoruro de uranio, líquido volátil compuesto por un átomo de uranio y seis átomos de flúor. En esta combinación, la molécula conteniendo U-235 sería un 1 % escaso más ligera que la del U-238; pero esta diferencia pareció ser suficiente para demostrar la eficacia del método.

Se hizo pasar bajo presión por barreras de protones al hexafluoruro de uranio. En cada barrera, las moléculas conteniendo U-235 pasaron algo más aprisa por término medio, y esa ventaja a favor del U-235 se acrecentó con los pasos consecutivos. Se requirieron miles de barreras para obtener cantidades apreciables de hexafluoruro casi puro de uranio 235; ahora bien, las concentraciones enriquecidas con U-235 exigieron muchas menos barreras.

En 1942 hubo razones suficientemente fundadas para suponer que el método de la difusión gaseosa (y uno o dos más) podría producir bastante cantidad de «uranio enriquecido». Entonces se construyeron plantas de separación (cada una costó mil millones de dólares y consumió tanta electricidad como la ciudad de Nueva York) en la ciudad secreta de Oak Ridge, Tennessee, lugar denominado inicialmente «Dogpatch» por los irreverentes científicos, recordando la ciudad mítica de Al Capp, Li'l Abner.

Entretanto, los físicos calculaban el «tamaño crítico» requerido para mantener la reacción en cadena con un trozo de uranio enriquecido. Si el trozo era pequeño, escaparían demasiados neutrones de su superficie sin dar tiempo a que los absorbieran los átomos U-235. Si se quería reducir esas fugas, el volumen del trozo debería ser considerable en proporción con su superficie. Una vez alcanzado el «tamaño crítico», los neutrones interceptarían suficientes átomos U-235 para dar continuidad a la reacción en cadena.

Los físicos encontraron también el medio de emplear eficazmente los neutrones disponibles. Como ya he mencionado, los neutrones «termales» (es decir, lentos) se someten con más presteza a la absorción por el uranio 235 que los rápidos. Así, pues, los experimentadores utilizaron un «moderador» para frenar a los neutrones, cuyas velocidades eran relativamente elevadas cuando emergían de la reacción por fisión. El agua ordinaria hubiera sido un excelente agente retardativo, pero desgraciadamente los núcleos del hidrógeno ordinario apresaban con gran voracidad los neutrones. El deuterio (hidrógeno 2) cumplía mucho mejor esa misión; prácticamente no mostraba ninguna tendencia a absorber neutrones. Por consiguiente... los experimentadores de la fisión procuraron crear suficientes reservas de agua pesada.

Hasta 1943, recurrieron casi siempre a la electrólisis: el agua ordinaria se dividía en oxígeno e hidrógeno mucho más fácilmente que el agua pesada y, por tanto, si se electrolizaban grandes cantidades de agua, el residuo final era rico en agua pesada y, además, se conservaba bien. Sin embargo, desde 1945 se prefirió el método de la destilación fraccionada: el agua ordinaria alcanzaba el punto ínfimo de ebullición, y entonces el residuo de agua no hervida era rico en agua pesada.

Sin duda, el agua pesada fue muy valiosa a principios de la década de 1940. Hay una historia emocionante sobre las andanzas de Joliot-Curie para llevarse consigo las reservas de ese líquido en Francia anticipándose a la invasión nazi el año 1940. Los alemanes nazis apresaron solamente un millar de litros que habían sido preparados en Noruega. Pero un comando británico de asalto los destruyó el año 1942.

No obstante, el agua pesada tuvo sus altibajos; solía hervir cuando la reacción en cadena producía demasiado calor, y entonces corroía el uranio. Los científicos, cuya misión era crear un sistema de reacción en cadena para el proyecto *Manhattan*, decidieron emplear carbono en la forma más pura del grafito como moderador.

Otro moderador posible fue el berilio, aunque su toxicidad representaba una gran desventaja. Por cierto, se descubrió esa enfermedad, la berilirosis, hacia principios de 1940 en uno de los físicos que trabajaban con la bomba atómica.

Imaginemos ahora una reacción en cadena. Comenzamos por proyectar un chorro de neutrones contra el conjunto de moderador y uranio enriquecido. Cierto número de átomos de uranio 235 sufren la fisión, liberando neutrones que golpean a otros átomos de uranio 235. Éstos se desintegran a su vez y desprenden más neutrones. Algunos neutrones serán absorbidos por átomos ajenos al uranio 235; otros escaparán simplemente de la pila atómica. Pero si un neutrón de cada fisión, basta exactamente con uno- consigue producir otra fisión, entonces se mantendrá la reacción en cadena. Si el «factor multiplicador» es superior a 1, aunque sólo sea por una fracción mínima (por ejemplo, 1,001), la reacción en cadena progresará hasta provocar la explosión. Esto era beneficioso para fines bélicos, pero no para fines experimentales. Se hizo necesario idear algún dispositivo que controlara el promedio de fisiones. Ello sería posible introduciendo barras de ciertas sustancias como el cadmio, que tiene una amplia sección transversal, para la captura de

neutrones. Ahora bien, la reacción en cadena se desarrollaba tan rápidamente que no habría habido tiempo para introducir las barras moderadoras de cadmio si no hubiese sido por la afortunada circunstancia que los átomos de uranio 235 no emitían instantáneamente todos sus neutrones al desintegrarse. Un neutrón de cada ciento cincuenta, más o menos, es un «neutrón rezagado» que se emite pocos minutos después de la fisión pues este neutrón no emerge directamente de los átomos desintegrados sino de otros más pequeños formados con la fisión. Cuando el factor multiplicador sobrepasa ligeramente la unidad, este retraso es suficiente para aplicar los controles.

En 1941 se realizaron experimentos con mezclas de uranio-grafito, y la información acumulada bastó para orientar a los físicos, quienes acordaron que era posible desatar una reacción en cadena, incluso sin uranio enriquecido, si se empleaba un trozo de uranio suficientemente voluminoso.

Los físicos empezaron a construir en la Universidad de Chicago un reactor de tamaño crítico para tratar el uranio. Por aquellas fechas tenían ya a su disposición 6 t de uranio puro; y se les había añadido como complemento óxido de uranio. Entonces se colocaron capas alternas de uranio y grafito, una sobre otra hasta un total de cincuenta y siete y con un orificio a través de ellas para insertar las barras moderadoras de cadmio. Se llamó «pila» a esa estructura, designación anodina y convencional que no traicionaba su función. (Durante la Primera Guerra Mundial se denominó «tanques» a los nuevos vehículos acorazados con el mismo propósito de enmascaramiento. La palabra «tanque» subsistió, pero, afortunadamente, la expresión «pila atómica» ha dado paso a otra más descriptiva: «reactor nuclear».)

La pila de Chicago, construida bajo el estadio de rugby, medía 9 m de anchura, 9,6 m de longitud y 6,5 m de altura. Pesaba 1.400 t y contenía 52 t de uranio en forma de metal y óxido. El 2 de diciembre de 1942 se trajeron lentamente las barras moderadoras de cadmio. A las 3:45 horas, el factor multiplicador alcanzó la cifra uno: la reacción por fisión empezó a funcionar de manera autónoma. Justamente cuando ocurría eso, el género humano entró, sin saberlo- en la «Era atómica».

El físico a cargo de aquella operación fue Enrico Fermi. Inmediatamente se despachó a Washington un telegrama anunciando el éxito con estas palabras: «El navegante italiano ha penetrado en el nuevo mundo.» La Office of Scientific

Research and Development telegrafió de vuelta: « ¿Cómo se portaron los nativos?» Y la respuesta le llegó en seguida: «Se mostraron muy amistosos.» Es curioso que el primer navegante italiano descubriera un mundo nuevo en 1492, y el segundo descubriera otro en 1942; aquellos que se interesan por los trastrueques místicos de los números, atribuyen gran importancia a esa coincidencia.

Mientras tanto había aparecido otro combustible fisionable. El uranio 238 forma, al absorber un neutrón termal, el uranio 239, que se desintegra rápidamente para constituir el neptuno 239, el cual se desintegra a su vez con casi idéntica rapidez y forma el plutonio 239.

Ahora bien, el núcleo del plutonio 239 tiene un número impar de neutrones (145) y es más complejo que el uranio 235; por tanto debería ser altamente inestable. Parecía razonable suponer que el plutonio, tal como el uranio 235, se sometería a la fisión con neutrones termales. En 1941 se confirmó así por vía experimental.

No sabiendo todavía a ciencia cierta si la preparación del uranio 235 sería práctica, los físicos decidieron arriesgarse a fabricar plutonio en grandes cantidades.

Se construyeron reactores especiales en Oak Ridge y Hanford, Estado de Washington, el año 1943 con la finalidad de producir plutonio. Aquellos reactores representaron un gran avance comparados con la primera pila de Chicago. Por una parte los nuevos reactores estaban diseñados de tal forma que se podía extraer el uranio periódicamente de la pila, se separaba el plutonio del uranio mediante procedimientos químicos y se podían aprovechar los productos de la fisión, entre los cuales había algunos absorbentes muy poderosos de neutrones. Por añadidura, los nuevos reactores tenían refrigeración de agua para evitar el calentamiento excesivo. (La pila de Chicago sólo podía funcionar durante breves períodos porque se la enfriaba meramente con aire.)

En 1945 se tuvo ya suficiente uranio 235 y plutonio 239 purificado para construir bombas. Esta parte del programa se emprendió en una tercera ciudad secreta, Los Álamos, Nuevo México, bajo la supervisión del físico norteamericano, J. Robert Oppenheimer.

Para los propósitos bélicos era conveniente que la reacción nuclear en cadena se desarrollara con la mayor rapidez posible. Ello requeriría la intervención de neutrones rápidos que acortasen los intervalos entre fisiones.

Así, pues, se omitió el moderador. Asimismo se encerró la bomba en una envoltura masiva para mantener la integridad del uranio el mayor tiempo posible, a fin que se fisionara una gran proporción.

Puesto que una masa crítica de materia fisionable explotaría espontáneamente (salpicada por los neutrones erráticos del aire), se dividió el combustible de la bomba en dos o más secciones. El mecanismo detonador estuvo constituido por un explosivo ordinario (¿TNT?) que agrupaba esas secciones cuando debiera explotar la bomba. Un dispositivo llamado «el hombre flaco» consistía en un tubo con dos porciones de uranio en sus dos extremos. Otro, el «hombre gordo», fue una esfera donde una granada compuesta de materia fisionable se incrustaba por «implosión» en el núcleo central formando una densa masa crítica que mantenía momentáneamente su integridad gracias a la fuerza de la implosión y a una funda maciza llamada el «pisón». El pisón sirvió también para reflejar los neutrones hacia la masa fisionable, y reducir, por tanto, el tamaño crítico.

Fue imposible ensayar tal artefacto a escala menor. Si la bomba no sobrepasaba el tamaño crítico, todo sería inútil. Consecuentemente, la primera prueba consistió en hacer explotar una bomba de fisión a gran escala, denominada «bomba atómica» o «bomba A». El 16 de julio de 1945, a las 5.30 horas, estalló una bomba en Alamogordo, Nuevo México, con efectos verdaderamente horripilantes; tuvo la fuerza explosiva de 20.000 t de TNT. Cuando se interrogó más tarde al físico I. I. Rabi, testigo visual del ensayo, éste respondió con tono lúgubre, según se ha dicho: «No puedo explicárselo..., pero no espere morir de causas naturales.» (Es justo agregar aquí que el caballero a quien dio Rabi tal contestación, falleció de muerte natural algunos años después.)

Se prepararon otras dos bombas de fisión. La primera, una bomba de uranio llamada *Little Boy* con 3 m de longitud, 0,60 m de anchura y peso de 4,5 Tm, se dejó caer sobre Hiroshima, el 6 de agosto de 1945; se la hizo detonar mediante el eco radar. Pocos días después, la segunda, una bomba de plutonio, 3,3 m y 1,5 de longitud y anchura respectivamente, peso de 5 t llamada *Fat Man* se dejó caer sobre Nagasaki. Las dos bombas juntas tuvieron una fuerza explosiva de 35.000 t de TNT. Con el bombardeo de Hiroshima, la Era atómica, iniciada ya casi tres años antes, irrumpió en la conciencia del mundo.

Cuatro años después de aquello, los norteamericanos vivieron bajo la impresión engañosa que existía un secreto denominado «bomba atómica» y que lo podrían mantener oculto para siempre a otras naciones, si se adoptaban rigurosas medidas de seguridad. A decir verdad, los hechos y las teorías de la fisión habían sido temas del dominio público desde 1939, y la Unión Soviética había emprendido seriamente la investigación del asunto en 1940; si la Segunda Guerra Mundial no hubiera demandado sus modestos recursos en una medida tan superior a la que demandara los inmensos recursos de unos Estados Unidos libres de toda invasión, la URSS podría haber tenido una bomba atómica en 1945, tal como Estados Unidos. De cualquier forma la Unión Soviética hizo explotar su primera bomba atómica el 22 de septiembre de 1949, ante el desaliento y la incomprensible estupefacción de casi todos los norteamericanos. Aquel artefacto sextuplicó el poder de la bomba lanzada sobre Hiroshima y tuvo un efecto explosivo equivalente a 210.000 t de TNT.

El 3 de octubre de 1952, Gran Bretaña se constituyó en tercera potencia atómica, haciendo explotar su propia bomba de ensayo; el 13 de febrero de 1960. Francia se unió al «club atómico» como cuarto miembro de pleno derecho, pues hizo estallar una bomba de plutonio en el Sahara, y el 16 de octubre de 1964, la República Popular de China (China comunista) anunció la explosión de una bomba atómica que la convirtió en quinto miembro.

Además la bomba adquirió más diversidad. En 1953, los Estados Unidos dispararon por primera vez una bomba de fisión con un cañón, en lugar de lanzarla desde el aire. Así se inició el desarrollo de la «artillería atómica» (o «arma atómica táctica»). Entretanto, la bomba de fisión quedó reducida a una mera bagatela. El hombre había conseguido desencadenar otra reacción nuclear energética que hacía posible la superbomba.

En la fisión del uranio sólo se transforma en energía un 0,1 % de la masa del átomo uranio. Pero cuando se fusionan los átomos de hidrógeno para formar helio, un 0,5 completo de su masa se convierte en energía, como lo indicara por primera vez el químico estadounidense William Draper Harkins el año 1915. Bajo temperaturas de millones de grados, la energía de los protones es suficientemente alta para permitirles la fusión. Así se pueden unir dos protones y, después de emitir un positrón y un neutrino (proceso que transforma uno de los protones en neutrón),

formar un núcleo de deuterio. Entonces el núcleo de deuterio se funde con un protón para constituir un núcleo de tritio que se puede fundir todavía con otro protón para formar helio 4. O bien los núcleos de deuterio y tritio se combinan de diversas formas para formar helio 4.

Como tales reacciones nucleares tienen lugar solamente bajo el estímulo de muy elevadas temperaturas, se las conoce por el nombre de «reacciones termonucleares». Durante la década de los 30 se creía que el único lugar donde existían las temperaturas requeridas era el centro de las estrellas. En 1938, el físico de origen alemán Hans Albrecht Bethe (quien había abandonado la Alemania hitleriana para establecerse en los Estados Unidos el año 1935) manifestó que las reacciones de fusión originaban la energía irradiada por las estrellas. Aquella fue la primera explicación totalmente satisfactoria de la energía estelar desde que Helmholtz planteara la cuestión casi un siglo antes.

Pero entonces la fisión del uranio proporcionó las temperaturas necesarias en la Tierra. Su bomba podría servir como una cerilla suficientemente caliente para desatar una reacción en cadena y provocar la fusión del hidrógeno. Durante algún tiempo se dudó mucho sobre la posibilidad de hacer trabajar esa reacción en forma de bomba. Por lo pronto iba a ser preciso condensar el combustible hidrógeno hasta constituir una densa masa bajo la forma de mezcla entre deuterio y tritio, lo cual significaba que se le debería licuar y mantenerlo a temperaturas que sobrepasaran en muy pocos grados el cero absoluto. Dicho de otra forma, lo que se haría explotar sería un refrigerador masivo. Y suponiendo, por añadidura, que se pudiera construir una bomba de hidrógeno, ¿cuál sería realmente su finalidad? La bomba de fisión era ya bastante destructora para hacer desaparecer las ciudades; una bomba de hidrógeno sólo acrecentaría incommensurablemente la destrucción y barrería naciones enteras con todos sus habitantes.

No obstante, y pese a las desconsoladoras perspectivas, los Estados Unidos y la Unión Soviética se creyeron obligados a llevar adelante el proyecto. La Comisión de Energía Atómica estadounidense inició los preparativos: produjo combustible de tritio, colocó un artefacto «fisión-fusión» de 65 t en un atolón coralífero del Pacífico y, el 1 de noviembre de 1952 provocó la primera explosión termonuclear (una «bomba de hidrógeno» o «bomba H») sobre nuestro planeta. Se cumplieron todas

las ominosas predicciones: la explosión equivalió a 10 millones de toneladas de TNT (10 «megatones»), es decir, desarrolló una energía 500 veces mayor que la modesta bomba de Hiroshima con sus 20 «kilotones». La explosión destruyó el atolón.

Pero los rusos no se rezagaron mucho; el 12 de agosto de 1953 produjeron con éxito una explosión nuclear mediante un artificio suficientemente ligero para su transporte en avión. Estados Unidos no fabricó ese artefacto portátil hasta principios de 1954.

Entretanto se había concebido un esquema mucho más simple para generar una reacción termonuclear en cadena dentro de una bomba portátil. La clave de esta reacción fue el elemento litio. Cuando el isótopo del litio 6 absorbe un neutrón, se desintegra en núcleos de helio y tritio, liberando 4,8 MeV de energía en el proceso. Supongamos, pues, que se utiliza como combustible un compuesto de litio e hidrógeno (bajo la forma del isótopo pesado de deuterio). Este compuesto es sólido, no se requiere refrigeración para condensar el combustible. Un detonador de fisión proveería los neutrones necesarios para desintegrar el litio. Y el calor desarrollado por la explosión ocasionaría la fusión del deuterio existente en el compuesto y del tritio producido por la desintegración del litio. En otras palabras, se producirían varias reacciones productoras de energía: desintegración del litio, fusión del deuterio con deuterio y fusión del deuterio con tritio.

Ahora bien, además de liberar una energía formidable, esas reacciones producirían también un gran número de neutrones adicionales. Y entonces, los constructores de la bomba tuvieron esta ocurrencia: ¿Por qué no emplear esos neutrones para fisionar una masa de uranio? Se podría fisionar incluso el uranio ordinario 238 con neutrones rápidos (aunque no fuera tan expedito como el U-235). La violenta explosión de los neutrones rápidos provocada por las reacciones de fusión, podría fisionar un número muy considerable de átomos U-238. Supongamos que se construye una bomba con un núcleo de U-235 (el detonador) rodeado por una carga explosiva de litio-deuterio, y envolviendo ese conjunto una capa de uranio 238 que sirviera también como explosivo. Así resultaría una bomba realmente poderosa. La capa de U-238 podría ser casi tan gruesa como se quisiera, pues el uranio 238 no

tiene ningún tamaño crítico que provoque la reacción espontánea en cadena. Se suele llamar a ese resultado «bomba-U».

Por fin se construyó esa bomba; y se la hizo estallar en Bikini, una isla del archipiélago Marshall, el 1 de marzo de 1954; su eco retumbó por el mundo entero. La energía liberada fue de 15 megatones aproximadamente. Aún fue más dramática la lluvia de partículas radiactivas que cayó sobre veintitrés pescadores japoneses, tripulantes de un pesquero llamado *El dragón afortunado*. Su radiactividad destruyó el cargamento de pesca e hizo enfermar a aquellos pescadores de los cuales murió más tarde uno. En fin, no puede decirse que contribuyera a mejorar la salud del mundo.

Desde 1954, las bombas de fisión-fusión-fisión vienen siendo elementos integrantes del armamento general en los Estados Unidos, la Unión Soviética y Gran Bretaña. La Unión Soviética ha hecho explotar bombas de hidrógeno cuya potencia oscila entre los 50 y 100 megatones mientras los Estados Unidos se muestran perfectamente capaces de construir tales bombas, e incluso otras mayores, a corto plazo.

Asimismo se entrevé la posibilidad de diseñar una bomba de hidrógeno que libere un chorro altamente concentrado de neutrones sustituyendo al calor. Ello destruiría vidas sin causar grandes perjuicios a los inmuebles. Esta «bomba de neutrones» o «bomba-N» parece aconsejable para aquellos que estimen la propiedad y no asignen un gran precio a la vida.

## Energía Nuclear

El empleo dramático de la energía nuclear, representada por bombas increíblemente destructivas, ha hecho más que ningún otro acontecimiento desde los comienzos de la Ciencia para presentar al científico en el papel de ogro.

Esa representación gráfica es justificable hasta cierto punto, pues ningún argumento ni raciocinación puede alterar el hecho que fueron realmente los científicos quienes construyeron la bomba atómica conociendo desde el primer instante su enorme poder destructivo y su posible aplicación práctica.

Si se quiere hacer estricta justicia, es preciso añadir que obraron así bajo la presión de una gran guerra contra enemigos inexorables y ante la espantosa posibilidad que un ser tan maníaco como Adolf Hitler pudiera adelantarse y fabricar la bomba para

sus propios fines. Se debe agregar también que, por regla general, los científicos atareados con la construcción de tales bombas evidenciaron una profunda consternación y que muchos se opusieron a su empleo, mientras otros abandonaban más tarde el campo de la física nuclear, inducidos por lo que sólo cabe describir como remordimiento. Ciertamente se observaron menos remordimientos de conciencia entre los jefes políticos y militares a quienes cupo la decisión de emplear semejantes bombas.

Por otra parte, no podemos ni debemos descartar el hecho de que, cuando los científicos liberaron la energía contenida en el núcleo atómico, pusieron a disposición del hombre una fuerza que se puede emplear con fines constructivos tanto como destructivos. Es importante hacerlo constar así en un mundo y una época en los que la amenaza de una hecatombe nuclear hace adoptar a la Ciencia y los científicos una tímida actitud defensiva, especialmente en un país como los Estados Unidos con una tradición «rousseauniana» algo excesiva contra la enseñanza mediante el libro por considerársela corruptora de la integridad original del hombre en su estado natural.

Cabe decir incluso que la explosión de una bomba atómica no tiene por qué ser exclusivamente destructiva. A semejanza de los explosivos químicos menores usados desde antiguo en la minería o la construcción de diques y carreteras, los explosivos nucleares podrían representar una enorme aportación en los proyectos de ingeniería. Ya se han propuesto toda clase de fantásticos designios al respecto: dragado de bahías y canales, voladura de estratos rocosos subyacentes, almacenamiento de calor para producir energía e incluso propulsión a distancia de las naves espaciales. Sin embargo, en los años sesenta decreció el furioso entusiasmo que habían despertado esas esperanzas a largo plazo. La peligrosa probabilidad de contaminación radiactiva, de un gasto adicional inadecuado o ambas cosas a un tiempo, sirvieron de amortiguadores.

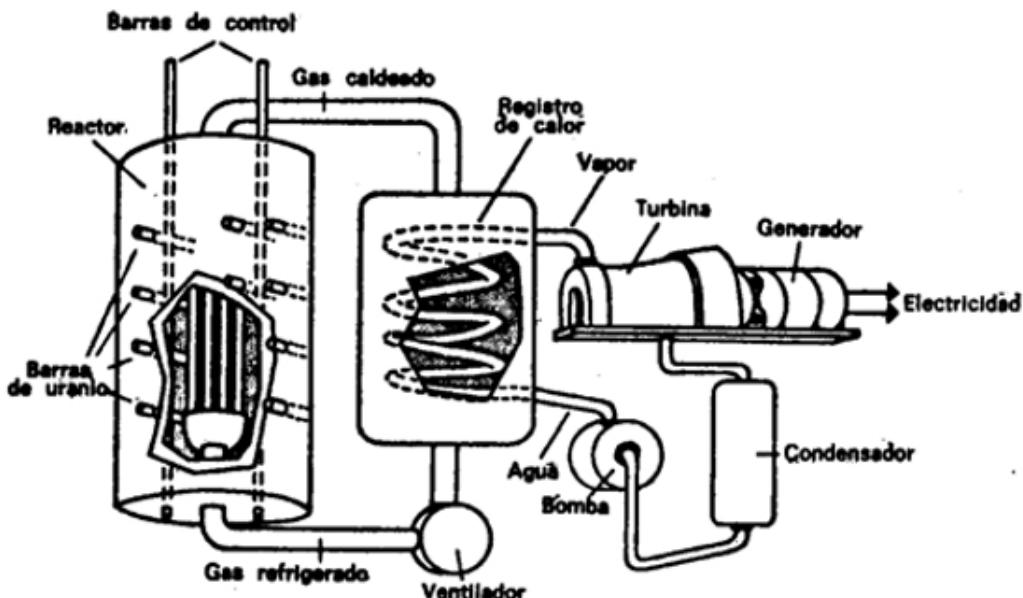
No obstante, la aplicación constructiva del poder nuclear quedó simbolizada por una especie de reacción en cadena que se instaló bajo el estadio de rugby en la Universidad de Chicago. Un reactor nuclear controlado puede generar inmensas cantidades de calor que, desde luego, se prestan al encauzamiento, mediante un

«refrigerante» tal como el agua o el metal fundido, para producir electricidad o caldear un edificio.

Pocos años después de la guerra se construyeron en Gran Bretaña y Estados Unidos reactores nucleares experimentales que produjeron electricidad. Hoy día, los Estados Unidos poseen una flota de submarinos movidos por energía nuclear, el primero de los cuales (el *Nautilus*, cuyo coste se elevó a 50 millones de dólares) fue botado en enero de 1954. Esta nave, tan importante hoy día como lo fuera la *Clermont* de Fulton en sus tiempos, posee motores con fuentes energéticas virtualmente inagotables que le permiten sumergirse durante períodos indefinidos, mientras que los submarinos ordinarios deben subir frecuentemente a la superficie para cargar sus baterías mediante generadores diesel, cuyo funcionamiento requiere aire. Por añadidura, esos submarinos alcanzan una velocidad máxima de ocho nudos, mientras el submarino nuclear se desplaza a veinte nudos o más.

El primer reactor del *Nautilus* duró para un recorrido de 100.500 km; ese itinerario incluyó una demostración espectacular. El *Nautilus* atravesó el océano Ártico en 1958 sinemerger ni una sola vez. Aquel viaje submarino demostró que la profundidad oceánica en el Polo Norte era de 4.023 m, es decir, mucho mayor de lo que se había pensado. Un segundo submarino nuclear bastante mayor, el *Triton*... circunnavegó el Globo en ochenta y cuatro días entre febrero y mayo de 1960 siguiendo la ruta magallánica.

La Unión Soviética posee también submarinos nucleares, y en diciembre de 1957 botó el primer barco de superficie movido por fuerza nuclear, el *Lenin*, un rompehielos. Poco antes los Estados Unidos habían puesto la quilla a su primer barco nuclear de superficie, y en julio de 1959 se botaron el *Long Beach* (un crucero) y el *Savannah* (un buque mercante). El *Long Beach* está provisto con dos reactores nucleares.



*Planta de energía nuclear del tipo «gas refrigerado» en forma esquemática. Aquí el calor del reactor se transfiere a un gas que puede ser un metal vaporizado circulando por él. Entonces se aprovecha el calor para transformar el agua en vapor.*

Apenas transcurridos diez años desde la botadura de los primeros barcos nucleares, los Estados Unidos tenían ya sesenta y un submarinos nucleares y cuatro buques nucleares de superficie, unos navegando y otros en construcción o en proyecto autorizado para futura construcción. Sin embargo, el entusiasmo por la propulsión nuclear se extinguió también, exceptuando si acaso los submarinos. En 1967 se retiraba el *Savannah* cuando cumplía los dos años de vida. Su mantenimiento costaba tres millones de dólares cada año, cifra que se estimaba excesiva.

Pero no debería ser solamente el elemento militar quien se aprovechara de esa innovación. En junio de 1954, la Unión Soviética hizo construir el primer reactor nuclear para uso civil: producción de energía eléctrica. Fue uno pequeño todavía, su capacidad no rebasó los 5.000 kW. Allá por octubre de 1956, Gran Bretaña puso en funcionamiento su planta atómica «Calder Hall» con una capacidad superior a los 50.000 kW. Los Estados Unidos llegaron a ese campo en tercer lugar. El 26 de mayo de 1958, la «Westinghouse» dio fin a un pequeño reactor con una capacidad de 60.000 kW para la producción de energía eléctrica en la localidad de Shippingport (Pennsylvania). Les siguieron rápidamente muchos reactores en Estados Unidos y otras partes del mundo.

Al cabo de una década o poco más, doce países poseían ya reactores nucleares y el 50 % de la electricidad suministrada en los Estados Unidos para usos civiles procedía de la fisión nuclear. Se invadió incluso el espacio exterior, pues el 3 de abril de 1965 se lanzó un satélite propulsado por un pequeño reactor. Y, no obstante, el problema de la contaminación radiactiva seguía revistiendo gravedad. Cuando comenzó la década de 1970, se hizo cada vez más audible la oposición pública contra esa incansable proliferación de centrales nucleares.

Si la fisión remplazara algún día al carbón y petróleo como principal fuente mundial de energía, ¿cuánto duraría ese nuevo combustible? No mucho si dependiéramos totalmente del escaso material fisionable, el uranio 235. Pero, por fortuna, el hombre puede crear otros combustibles fisionables partiendo del uranio 235.

Ya hemos visto que el plutonio es uno de esos combustibles creados por el hombre. Supongamos que construimos un pequeño reactor con uranio enriquecido como combustible y omitimos el moderador de modo que los neutrones rápidos fluyan dentro de una envoltura circundante de uranio natural. Esos neutrones convertirán el uranio 238 de la funda en plutonio. Si hacemos lo necesario para reducir a un mínimo el desperdicio de neutrones, obtendremos con cada fisión de un átomo de uranio 235 en el núcleo, varios átomos de plutonio cuya creación ha tenido lugar dentro de la envoltura. Es decir, produciremos más combustible del que consumimos.

El primer «reactor generador» se construyó bajo la dirección del físico canadiense Walter H. Zinn en Arco (Idaho) el año 1951. Se le llamó «EBR-1» (Experimental Breeder Reactor-1). El aparato no demostró solamente la solvencia del principio generador, sino que también produjo electricidad.

Ese sistema generador podría multiplicar muchas veces las reservas de combustibles tomando como base el uranio, porque todos los isótopos ordinarios del uranio, el uranio 238- serían combustibles potenciales.

El elemento torio, integrado totalmente por torio 232, es otro combustible fisionable en potencia. Tras la absorción de neutrones rápidos viene a ser el isótopo artificial torio 233 que decae velozmente para transformarse en uranio 233. Ahora bien, el uranio 233 es fisionable bajo los neutrones lentos y mantiene una reacción en cadena autogenética. Así, pues, se puede agregar el torio a las reservas de

combustible, precisamente un elemento cinco veces más abundante que el uranio en la Tierra. Según se ha calculado, la primera capa de 90 m en la corteza terrestre contiene como promedio 12.000 t de uranio y torio por kilómetro cuadrado. Aunque, claro está, no todos esos yacimientos están por el momento a nuestro alcance. Para recapitular: la cantidad total de energía concebible y disponible en las reservas terrestres de uranio y torio es veinte veces mayor que los depósitos de carbón y petróleo existentes hoy día a nuestra disposición.

### Radiactividad

La iniciación de la Era Atómica amenazó al hombre con un riesgo casi inédito en su campo de experiencia. Al quedar descubierto, el núcleo emitió torrentes de radiaciones nucleares. Sin duda alguna, la vida sobre esta tierra ha estado siempre expuesta a la radiactividad natural y los rayos cósmicos. Pero la concentración suscitada por el hombre de sustancias naturalmente radiactivas como el radio, cuya existencia ordinaria se disemina considerablemente sobre la superficie terrestre, acrecentó no poco el peligro. Algunos manipuladores primitivos de los rayos X y el radio absorbieron incluso dosis letales: Marie Curie y su hija Irène Joliot-Curie murieron de leucemia ocasionada por esa exposición. Y ahí está ese famoso caso: los pintores de esferas de reloj que murieron en 1920 por haber chupado sus pinceles impregnados con radio.

Los casos clínicos de leucemia se han duplicado en las dos últimas décadas, y esta circunstancia puede deberse en parte al creciente empleo de los rayos X con finalidades muy diversas. Los síntomas leucémicos entre médicos, quienes tienen más probabilidades de quedar expuestos a sus efectos- se presentan dos veces más que en el público general. Entre los radiólogos, especialistas de los rayos X y su empleo, la incidencia es diez veces mayor. No puede extrañarnos, pues, que se hagan múltiples intentos para sustituir los rayos X por otras técnicas tales como aquellas que aprovechan el sonido ultrasónico. Entretanto la fisión ha acrecentado con su aparición ese peligro. Todos esos mecanismos, tanto si son bombas como reactores, desatan radiactividad a una escala que podría contaminar la atmósfera, los océanos, y todo cuanto comemos, bebemos o respiramos, hasta el punto de hacerlos peligrosos para la vida humana. La fisión ha implantado una especie de

contaminación que pondrá a prueba el ingenio humano para dominarla.

Cuando se desintegra el átomo de uranio o plutonio, sus productos de fisión adoptan diversas formas. Entre esos fragmentos pueden figurar isótopos del bario o tecnecio o cualquiera de otras numerosas posibilidades. En total se ha conseguido identificar a unos doscientos productos radiactivos de la fisión. Éstos representan una complicación para la tecnología nuclear, pues algunos absorben vorazmente los neutrones y obstaculizan la reacción por fisión. De ahí que sea necesario extraer y purificar periódicamente el combustible de un reactor.

Por añadidura esos fragmentos de la fisión son, sin excepción, peligrosos para la vida en diversos grados según la energía y naturaleza de su radiación. Por ejemplo, las partículas alfa introducidas en el cuerpo son más peligrosas que las partículas beta. También es importante el ritmo de decadencia: un nucleido que se desintegre rápidamente bombardeará al receptor con más radiaciones por segundo o por hora que otro cuya desintegración sea lenta.

El ritmo de desintegración es algo de lo cual sólo se puede hablar cuando el número de nucleidos implicados sea muy alto. Un núcleo aislado puede desintegrarse en cualquier momento, es decir, al instante, o mil millones de años después o en un período intermedio entre esos dos extremos- y no existe ningún medio para predecir cuándo ocurrirá. Sin embargo, cada especie radiactiva tiene su ritmo promedio de desintegración y, por tanto, si el número de átomos implicados es muy alto resulta posible predecir con gran exactitud en qué proporción se desintegrarán durante cualquier unidad de tiempo. Veamos un ejemplo.

La experimentación demuestra que en una agrupación determinada de átomos, a los cuales llamaremos X- éstos se desintegran al ritmo del 50 % cada año. Al finalizar el primer año, 500 de cada 1.000 átomos X de la agrupación inicial conservarán su identidad de átomos X; al cabo de dos años, serán 250; tres años después, 125, y así sucesivamente. El tiempo requerido por la mitad de los átomos originales para desintegrarse se denomina «vida media» del átomo en cuestión (expresión sugerida por Rutherford el año 1904); consecuentemente, la vida media del átomo X es un año. Cada nucleido radiactivo tiene su característica vida media que jamás cambia en condiciones ordinarias. (El único tipo de influencia externa que puede cambiarla es el bombardeo del núcleo con una partícula o la temperatura

extremadamente alta en el interior de una estrella. Para expresarlo con otras palabras, un suceso violento capaz de atacar al núcleo *per se.*)

La vida media del uranio 238 es 4,5 miles de millones de años. No nos sorprende, por tanto, que subsista todavía el uranio 238 en el Universo pese a la decadencia de sus átomos. Un cálculo muy simple nos demostrará que se requiere un período seis veces mayor que la vida media para reducir una cantidad determinada de nucleidos radiactivos hasta el 1 % del total original. Cuando hayan transcurrido 30 mil millones de años desde estas fechas, quedará todavía 1 kg de uranio por cada tonelada existente hoy día en la corteza terrestre.

Aunque los isótopos de un elemento sean químicamente idénticos, sus propiedades nucleares pueden diferir en gran medida. El uranio 235, por ejemplo, se desintegra seis veces más aprisa que el uranio 238; su vida media es sólo de 710 millones de años. Así, pues, cabe suponer que en los eones ya desaparecidos, el uranio contenía mucho más uranio 235 que el de nuestros días. Hace 6 mil millones de años, el uranio 235 representaría el 70 % aproximadamente del uranio natural. Sin embargo, el género humano no está consumiendo los residuos del uranio 235. Aunque se hubiese retrasado un millón de años el descubrimiento de la fisión, la Tierra poseería todavía un 99,9 % del uranio 235 existente en la actualidad.

Evidentemente, cualquier nucleido con una vida media inferior a los cien millones de años habría declinado hasta desvanecerse en la dilatada vida del Universo. Así se explica que hoy sólo encontremos algunos vestigios de plutonio. El isótopo de plutonio más longevo, el plutonio 244, tiene una vida media de 70 millones de años solamente.

El uranio, el torio y otros elementos radiactivos de larga vida dispersos entre rocas y tierra, emiten pequeñas cantidades de radiación que están siempre presentes en el aire circundante de nuestro medio. El propio hombre es ligeramente radiactivo, pues todos los tejidos orgánicos contienen trazas de un isótopo relativamente raro e inestable de potasio (potasio 40) que tiene una vida media de 1.300 millones de años. (Al desintegrarse, el potasio 40 produce algún argón 40 y, probablemente, eso aclara la circunstancia que sea el nucleido más común entre los gases inertes de la Tierra. Los promedios potasio-argón han servido para verificar la edad de los meteoritos.)

Los diversos nucleidos radiactivos de origen natural constituyen lo que se suele llamar «radiación de fondo» (a la cual contribuyen también los rayos cósmicos). La exposición constante a la radiación natural ha representado probablemente un importante papel en la evolución ocasionando mutaciones y, tal vez, sea parcialmente responsable de las afecciones cancerosas. Pero los organismos vivientes han convivido con ella durante millones de años. La radiación nuclear sólo ha llegado a implicar graves riesgos en nuestros tiempos, es decir, cuando el hombre empezó a experimentar por primera vez con el radio, a lo cual se sumó luego la llegada de la fisión y los reactores nucleares. Cuando se inició el proyecto de la energía atómica, los físicos habían aprendido ya a su costa cuán peligrosa era la radiación nuclear. Por consiguiente, los artífices del proyecto procuraron rodearse con elaboradas medidas de seguridad. Los productos «temibles» de la fisión y otras materias radiactivas estuvieron almacenados detrás de sólidas paredes protectoras, y sus observadores los examinaron a través de vidrio de plomo. Se idearon instrumentos para manipular las materias por control remoto. Se exigió a cada persona que llevara trozos de película fotográfica u otros artificios detectores para «supervisar» su exposición acumulativa. (Los mamíferos son más sensativos a la radiación que cualquier otra forma de vida, pero el hombre, como término medio, es extraordinariamente resistente para ser un mamífero.)

Pese a todo, han ocurrido accidentes, y unos cuantos físicos nucleares padecieron la «enfermedad radiactiva» y murieron por haber absorbido dosis masivas. Sin embargo, toda ocupación tiene sus riesgos aún cuando sea de las más seguras; a decir verdad, los trabajadores de la energía nuclear salen mejor librados que muchos otros, pues cada vez se conoce mejor el riesgo y se procura neutralizarlo. Pero un mundo repleto de reactores nucleares, diseminando por toneladas productos de la fisión, sería otro cantar. ¿Cómo desembarazarse de todo ese material mortífero?

Una gran proporción de tales desperdicios tiene una radiactividad efímera que se desvanece hasta ser inofensiva en cuestión de semanas o meses; por tanto, se la puede almacenar durante ese período para llevarla después a los vertederos. Mucho más peligrosos son los nucleidos con vidas medias de uno a treinta años. Su vida es suficientemente corta para producir intensa radiación, y suficientemente larga para

acarrear graves riesgos a varias generaciones. Un nucleido con una vida media de treinta años requerirá dos siglos para perder el 99 % de su actividad.

Sin embargo, se podría dar una aplicación provechosa a los productos de la fisión. Como fuentes energéticas tiene capacidad para proveer con fuerza motriz a pequeños mecanismos o instrumentos. Las partículas emitidas por el isótopo radiactivo resultan absorbidas y su energía se convierte en calor. Éste produce a su vez electricidad en pares termoeléctricos. Las baterías productoras de electricidad bajo esa forma son generadores radioisotópicos a los cuales se les denomina usualmente SNAP (*Systems for Nuclear Auxiliary Power*), Sistemas de energía nuclear auxiliar, o, con más espectacularidad, «baterías atómicas». Suelen tener poco peso, apenas 2 kg, generan 60 W y duran varios años. Los satélites han llevado baterías SNAP; por ejemplo el *Transit 4A* y el *Transit 4B*, puestos en órbita por los Estados Unidos en 1961, con la finalidad de auxiliar a la navegación.

El isótopo de uso más común en las baterías SNAP es el estroncio 90, al cual nos referiremos más adelante en otro aspecto. También se emplean en ciertas variedades los isótopos del plutonio y el curio.

Los radionucleidos tienen asimismo una utilidad potencial en Medicina (por ejemplo, para el tratamiento del cáncer), pues eliminan las bacterias y preservan los alimentos; también son aplicables a muchos campos de la industria, incluyendo la fabricación de productos químicos.

Para citar un ejemplo entre muchos, la «Hercules Powder Company» ha diseñado un reactor cuya radiación se emplea en la producción de etilenglicol anticongelante.

No obstante, y una vez mencionadas esas excepciones, es imposible imaginar una aplicación para los ingentes residuos de la fisión que expulsan los reactores nucleares. Ello representa generalmente un riesgo en relación con la energía nuclear. El peligro más evidente es la explosión ocasionada por una reacción súbita e insospechada de la fisión (una «excursión nuclear», como suele llamársele) y ha estado siempre presente en la mente de los proyectistas. Debe decirse en honor suyo que eso ha ocurrido muy pocas veces, si bien un accidente semejante mató a tres hombres en Idaho el año 1961 y difundió la contaminación radiactiva por toda la central. Mucho más difícil es manipular los residuos de la fisión. Se calcula que cada 200.000 kW de electricidad generada por la fuerza nuclear producen 0,70 kg

diarios de residuos de la fisión. ¿Qué hacer con ellos? En los Estados Unidos se han almacenado ya bajo tierra millones de litros de líquido radiactivo, y, según se calcula, hacia el año 2000 será preciso eliminar cada día alrededor de dos millones de litros de líquido radiactivo. Tanto los Estados Unidos como la Gran Bretaña han sepultado en el mar recipientes de cemento conteniendo residuos radiactivos. Se han hecho propuestas para depositarlos en las simas oceánicas, o las antiguas minas de sal, o incinerarlos con vidrio derretido para enterrar después la materia solidificada. Pero siempre surge el inquietante pensamiento que la radiactividad consiga escapar de un modo u otro y contamine el fondo marino. Una pesadilla particularmente estremecedora es la posibilidad que naufrague un barco movido por energía nuclear y disemine sus residuos acumulados de la fisión por el océano. El hundimiento del submarino nuclear estadounidense *Tresher* en el Atlántico Norte el 10 de abril de 1963 prestó nuevo acicate a tal temor, aunque en aquel caso no se produjo, aparentemente, la contaminación.

Aunque la contaminación radiactiva ocasionada por la energía nuclear pacífica represente un peligro potencial, se la podrá controlar por lo menos con todos los medios posibles y, probablemente, se tendrá éxito. Pero hay otra contaminación que se ha extendido ya a todo el mundo y que, con seguridad, sería objeto de propagación deliberada en una guerra nuclear. Me refiero a la lluvia radiactiva procedente de bombas atómicas.

La lluvia radiactiva es un producto de toda bomba nuclear, incluso de aquéllas lanzadas sin intención aviesa. Como los vientos acarrean la lluvia radiactiva alrededor del mundo y las precipitaciones de agua la arrastran hacia tierra, resulta virtualmente imposible para cualquier nación el hacer explotar una bomba nuclear en la atmósfera sin la correspondiente detección. En el caso de una guerra nuclear, la lluvia radiactiva podría producir a largo plazo más víctimas y más daños a los seres vivientes del mundo entero que los estallidos incendiarios de las propias bombas sobre los países atacados.

La lluvia radiactiva se divide en tres tipos: «local», «toposférico» y «estratosférico». La lluvia radiactiva local resulta de las grandes explosiones cuando las partículas de polvo absorben a los isótopos radiactivos y se depositan rápidamente a centenares de kilómetros. Las explosiones aéreas de bombas nucleares de la magnitud kilotón,

envían residuos de la fisión a la troposfera. Éstos quedan en suspensión al cabo de un mes, y durante ese intervalo los vientos los arrastran hacia el Este, haciéndoles recorrer millares de kilómetros.

Las superbombas termonucleares producen cantidades tremendas de residuos cuya masa, impulsada por las corrientes, se traslada hacia la estratosfera. Esta lluvia radiactiva estratosférica requiere un año o más para asentarse y entonces se distribuye por todo el hemisferio, cayendo ocasionalmente sin distinción alguna sobre atacantes y atacados.

La intensidad de la lluvia radiactiva desatada por la primera superbomba, cuya explosión tuvo lugar en el Pacífico el 1 de marzo de 1954, cogió por sorpresa a los científicos. Ninguno había esperado que la lluvia radiactiva producida por una bomba de fusión fuese tan «perniciosa». La contaminación afectó seriamente a 22.000 km<sup>2</sup>, un área casi equivalente a la superficie de Massachusetts. Pero todos ellos vieron claramente las razones cuando supieron que se había reforzado el núcleo de fusión con una capa de uranio 238 sobre la cual actuaron los neutrones para fisionarla. Ello no multiplicó solamente la fuerza de la explosión, sino que también originó una nube de residuos radiactivos mucho más voluminosa que la producida por una simple bomba de fisión del tipo Hiroshima.

Hasta estas fechas la lluvia radiactiva de los ensayos nucleares ha agregado solamente una pequeña cantidad de radiactividad a la radiación terrestre de fondo. Pero incluso un aumento ínfimo sobre el nivel natural acrecentaría la incidencia del cáncer, causaría trastornos genéticos y acortaría ligeramente el término medio de la longevidad. Los analistas más circunspectos de esos riesgos, conceden que si se incrementara el ritmo de mutación (véase en el capítulo XII la discusión sobre mutaciones), la lluvia radiactiva entrañaría ciertas complicaciones para futuras generaciones.

Un producto determinado de la fisión es particularmente peligroso para la vida humana. Nos referimos al estroncio 90 (vida media: veintiocho años), un isótopo muy útil en los generadores SNAP. Cuando el estroncio 90 se precipita sobre tierras y aguas, las plantas lo asimilan .Y después lo incorporan a los cuerpos de aquellos animales (incluido el hombre) que se alimenten directa o indirectamente de ellas. El estroncio tiene gran similitud química con el calcio, y por ello se dirige a los huesos

para alojarse en ellos durante largo tiempo. Ahí reside su peculiar peligro. Los minerales alojados en los huesos tienen una lenta «evolución»; es decir, no se les remplaza tan rápidamente como a las sustancias de los tejidos blandos. Por tal razón, el estroncio 90, una vez absorbido, puede permanecer en el cuerpo de la persona afectada durante el resto de su vida.

El estroncio 90 es una sustancia insólita en nuestro medio ambiente; no existía sobre la tierra en cantidades apreciables hasta que el hombre fisionó el átomo de uranio. Pero, hoy día, al cabo de una generación escasamente, el estroncio 90 se ha incorporado a los huesos de todo ser humano sobre la tierra y, sin duda, de todos los vertebrados. En la estratosfera flotan todavía cantidades considerables de este elemento y, tarde o temprano, reforzarán la concentración ya existente en nuestros huesos.

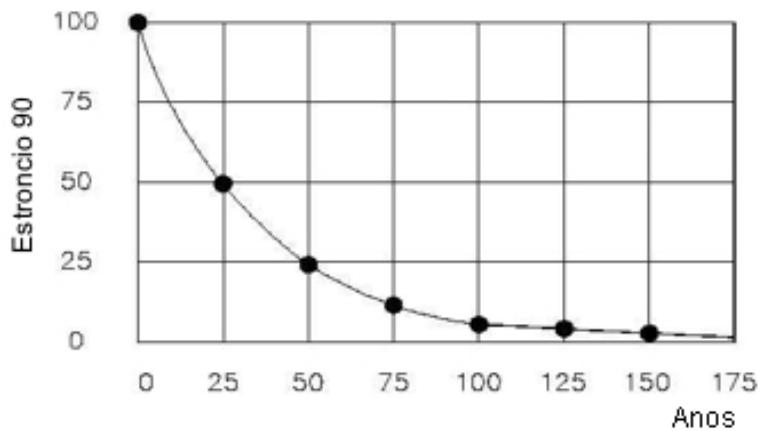
Las «unidades estroncio» (UE) miden la concentración de estroncio 90. Una UE es un micromicrocurie de estroncio 90 por cada gramo de calcio en el cuerpo. Un «curie» es una unidad de radiación (naturalmente llamada así en memoria de los Curie) que equivalía inicialmente a la radiación producida por un gramo de radio equilibrado con el producto de su desintegración, el radón. Hoy se la conceptúa generalmente como el equivalente de 37 mil millones de desintegraciones por segundo. Un micromicrocurie es una trillonésima de curie, o bien 2,12 desintegraciones por minuto. Por consiguiente, una «unidad estroncio» representa 2,12 desintegraciones por minuto y por cada gramo de calcio existente en el cuerpo.

La concentración de estroncio 90 en el esqueleto humano varía considerablemente según los lugares y los individuos. Se ha comprobado que algunas personas contienen una cantidad setenta y cinco veces mayor que el promedio. Los niños, cuadriplican como término medio la concentración de los adultos debido a la más intensa evolución de la materia en sus huesos incipientes. El cálculo del promedio varía según los casos, pues su base fundamental es la porción de estroncio 90 en las dietas. (Por cierto que la leche no es un alimento especialmente peligroso en este sentido, aunque el calcio asimilado de los vegetales vaya asociado con bastante más estroncio 90. El «sistema filtrador» de la vaca elimina parte del estroncio que ingiere con el pienso vegetal.) Se calcula que el promedio de concentración del

estroncio 90 en los huesos de los ciudadanos estadounidenses en 1959 oscilaba entre una unidad estroncio y cinco unidades estroncio largas. (La Comisión Internacional de Radiación estableció el «máximo permisible» en 67 UE.) Pero los promedios significan muy poca cosa, máxime cuando el estroncio 90 puede concentrarse en «lugares críticos» de los huesos y alcanzar suficiente nivel para producir leucemia o cáncer.

Los efectos de la radiación ocasionaron por su importancia, entre otras cosas, la adopción de diversas unidades específicas con objeto de apreciar su amplitud. Una, por ejemplo, el «roentgen» (llamada así para recordar al descubridor de los rayos X) se basa en el número de iones originados por los rayos X o los rayos gamma bajo estudio. Más recientemente se ha implantado el «rad» (abreviatura de «radiación»). Representa la absorción de 100 ergios por gramo de cualquier tipo de radiación.

La naturaleza de la radiación tiene su importancia. Un «rad» de partículas masivas es mucho más efectivo que un «rad» de partículas ligeras respecto a la inducción de cambios químicos en los tejidos; por tanto, la energía bajo la forma de partículas alfa es más peligrosa que esa misma energía bajo la forma de electrones.



*Decadencia del estroncio 90 al cumplirse aproximadamente 200 años.*

Los estragos químicos causados por la radiación obedecen principalmente a la desintegración de las moléculas del agua (que integran la mayor parte de los tejidos vivos) en fragmentos excepcionalmente activos («radicales libres») que reaccionan a su vez con las complejas moléculas del tejido. Las lesiones medulares,

interceptando la producción de células sanguíneas, son una manifestación particularmente grave de la «enfermedad radiactiva» que conduce sin remedio a la muerte cuando se desarrolla lo suficiente.

Muchos científicos eminentes creen firmemente que la lluvia radiactiva representa un importante riesgo para la raza humana. El químico norteamericano Linus Pauling asegura que la lluvia radiactiva de una sola superbomba puede ocasionar 100.000 muertes por leucemia y otras enfermedades en el mundo entero, e indica que el carbono radiactivo 14, producido por los neutrones de una explosión nuclear, constituye un grave peligro genético. Así, pues, Pauling ha abogado apasionadamente por el cese de las pruebas nucleares; hoy respalda todos los movimientos encaminados a atajar el peligro de una guerra y promover el desarme. Por otra parte, algunos científicos, incluido el físico estadounidense de origen húngaro Edward Teller, quitan importancia a los riesgos implícitos en la lluvia radiactiva.

Por regla general, el mundo simpatiza con Pauling, como lo revela el hecho que se le concediera el premio Nobel de la Paz en 1962. (Ocho años antes, Pauling había ganado el premio Nobel de Química; así, pues, él y Marie Curie son los únicos miembros de esa agrupación selecta a quienes se han otorgado dos premios Nobel.) En el otoño de 1958, los Estados Unidos, la URSS y Gran Bretaña suspendieron los ensayos nucleares con arreglo a un «acuerdo entre caballeros» (lo cual no impidió que Francia hiciera explotar su primera bomba atómica en la primavera de 1960). Durante tres años todo pareció de color rosa; la concentración de estroncio 90 llegó a un punto culminante hacia 1960 y luego se equilibró muy por debajo de un nivel que, según se estima, es la cantidad máxima compatible con la seguridad. Así y todo, en los trece años de pruebas nucleares totalizando la explosión de 150 bombas muy diversas, se ha contaminado la atmósfera con 25 millones de curies de estroncio 90 y cesio 137 (otro producto peligroso de la fisión). Solamente dos de esos artefactos explotaron con intenciones homicidas, pero el resultado de las restantes explosiones fue también bastante funesto.

En 1961, la Unión Soviética puso fin a la moratoria sin el menor aviso y reanudó sus ensayos. Como quiera que la URSS hiciera explotar bombas termonucleares de un poder sin precedentes, los Estados Unidos se creyeron obligados a renovar sus

experimentos. La opinión pública mundial, despabilada por el alivio de la moratoria, reaccionó con suma indignación.

Por consiguiente, el 10 de octubre de 1963, las tres potencias nucleares más representativas firmaron un tratado acordando suspender las pruebas nucleares (ya no fue un mero acuerdo entre caballeros), es decir, la explosión de bombas nucleares en la atmósfera, el espacio y el fondo marino. Sólo se permitieron las explosiones subterráneas porque no producían lluvia radiactiva. Ésta fue la iniciativa más esperanzadora respecto a la supervivencia humana desde el comienzo de la Era atómica. Ahora el principal peligro, suponiendo que todas las potencias signatarias del tratado se sometan a lo convenido, es que Francia y la República Popular China (los miembros más recientes del club atómico) se sigan negando a firmar el susodicho tratado.

### Fusión Nuclear

Durante veinte años largos, los físicos nucleares han cultivado en el fondo de sus mentes un sueño aún más atractivo que la fisión destinada a fines constructivos. Sueñan con dominar la energía de fusión. Al fin y al cabo, la fusión es el motor que hace girar nuestro mundo: las reacciones generadas por la fusión en el Sol son la fuente esencial de todas nuestras formas energéticas y de la propia vida. Si pudiéramos reproducir y controlar de algún modo dichas reacciones sobre la Tierra, resolveríamos todos nuestros problemas de energía. Nuestras reservas de combustible serían tan inmensas como el océano, pues ese combustible sería justamente el hidrógeno.

Y, aunque parezca extraño, no sería la primera vez que se utilizase como combustible el hidrógeno. No mucho después de su descubrimiento y el estudio de sus propiedades, el hidrógeno ocupó un lugar importante como combustible químico. El científico norteamericano Robert Hare ideó una antorcha de hidrógeno oxhídrico en 1861, y desde entonces la industria viene aprovechando esa brillante llama oxhídrica. Pero hoy día ofrece, como combustible nuclear, posibilidades mucho más prometedoras.

La energía de fusión podría ser muy superior a la energía de fisión. Un reactor de fusión proporcionaría entre cinco y diez veces más energía que un reactor de fisión.

Una libra de hidrógeno en fusión produciría 35 millones de kilovatios/hora. Por añadidura, la fusión no desprende cenizas radiactivas. Finalmente, una reacción por fusión sólo se interrumpirá en el caso de cualquier avería concebible mientras que la reacción por fisión se sustrae a todo control (aunque esto no sea lo corriente) y provoca la explosión total.

El hidrógeno 1 es el más corriente entre los tres isótopos del hidrógeno, pero también el que resiste más a la fusión. Es también el combustible privado del Sol; ahora bien, el Sol lo posee por billones de kilómetros cúbicos y, además, tiene un inmenso campo gravitatorio para mantenerlo unido así como una temperatura central de muchos millones de grados. Sólo un ínfimo porcentaje del hidrógeno existente dentro del Sol se funde en un momento dado, pero, teniendo presente su formidable masa, ese minúsculo porcentaje es suficiente.

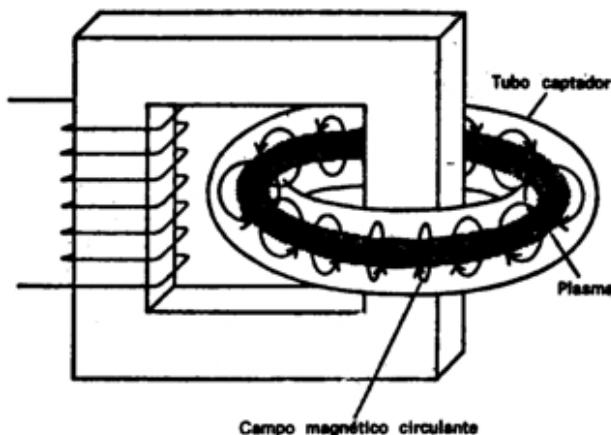
El hidrógeno 3 se presta mucho mejor a la fusión pero es tan escaso y requiere tal consumo de energía que no vale la pena pensar en él como combustible práctico por sí solo.

Así, pues, nos queda solamente el hidrógeno 2, más manejable que el hidrógeno 1 y mucho más abundante que el hidrógeno 3. En todo el hidrógeno del mundo únicamente un átomo de cada 6.000 es deuterio, pero eso basta y sobra. El océano contiene deuterio, 35 billones de toneladas nada menos, lo suficiente para proveer al hombre con grandes cantidades de energía durante todo el futuro previsible.

Sin embargo, se plantean algunos problemas. Esto pudiera parecer sorprendente, puesto que existen las bombas de fusión. Si ahí hemos logrado fundir el hidrógeno, ¿por qué no podemos hacer un reactor tal como hemos hecho una bomba? ¡Ah, pero para fabricar una bomba de fusión es preciso utilizar como cebo una bomba de fisión... y ahí queda eso! Para fabricar un reactor de fusión necesitamos evidentemente un cebo más benigno, es decir, debemos mantener la reacción a un ritmo constante, controlado... y no explosivo.

El primer problema es el menos engorroso. Las potentes corrientes eléctricas, las ondas supersónicas, los rayos láser y todo el resto pueden producir temperaturas que alcanzan en un instante 100 millones de grados. Sin duda alguna será posible procurar la temperatura adecuada.

Pero el mantener esa temperatura mientras se mete en cintura (según se espera) al hidrógeno fusible, es otro cantar. Evidentemente ningún recipiente conocido puede contener un gas cuya temperatura rebase los 100 millones de grados. Una de dos, el recipiente se vaporizará o el gas se enfriará. El primer paso hacia una solución es reducir la densidad del gas hasta un punto muy inferior a la presión normal; ello rebaja el contenido de fuerza calorífica, si bien la energía de las partículas seguirá siendo elevada. El segundo paso representa un concepto sumamente ingenioso. Un gas a temperatura muy elevada ofrece la particularidad que todos sus átomos se ven desprovistos de los electrones; es un «plasma» (término propuesto por Irving Langmuir a principios de los años 30) compuesto de electrones y núcleos desnudos. Y si lo integran totalmente partículas cargadas, ¿por qué no retenerlo utilizando un potente campo magnético en lugar del recipiente? Desde 1907 se sabe que los campos magnéticos pueden refrenar a las partículas cargadas y «captar» una corriente de ellas, lo cual se llamaba por entonces «efecto de captación». Así, pues, se hizo un ensayo con la «botella magnética» y dio resultado... pero sólo durante un lapso muy breve. Los jirones de plasma, captados instantáneamente por la botella, se retorcieron como serpientes, se disgregaron y, acto seguido, se extinguieron. Otro planteamiento consiste en instalar un campo magnético más potente al final del tubo para contener el plasma, rechazarlo y evitar las fugas. Esto se considera igualmente defectuoso, aunque no parece que el defecto sea excesivo. Si se pudiera retener el plasma a 100 millones de grados durante un segundo solamente, se desencadenaría la reacción de fusión y la energía fluiría del sistema. Esa energía podría servir para consolidar y fortalecer el campo magnético así como mantener la temperatura al nivel apropiado, es decir, funcionaría con la energía generada por ella misma. Pero el evitar las fugas de plasma durante un simple segundo era algo inalcanzable todavía.



*Botella magnética cuya misión consiste en retener un gas caliente de los núcleos de hidrógeno (el plasma). El anillo se denomina torus.*

Ahora bien, puesto que las fugas se producían con especial facilidad en el extremo del tubo, ¿por qué no eliminar ese extremo dando al tubo una forma de rosquilla? Efectivamente, un diseño de evidente utilidad fue el tubo con forma de rosquilla («torus») similar a un ocho. En 1951, Spitzer diseñó ese artefacto en forma de ocho y lo denominó «stellarator». Aún fue más prometedor otro artilugio ideado por el físico soviético Lev Andreievich Artsímovich. Se le llamó «Toroidal Kamera Magnetic» (cámara magnética toroide), y, como abreviatura. «Tokamak».

El Tokamak trabaja únicamente con gases muy rarefactos, pero los soviéticos han logrado alcanzar una temperatura de 100 millones de grados y mantenerla durante una centésima de segundo empleando hidrógeno cuya densidad atmosférica es de una millonésima. Desde luego, un hidrógeno tan rarefacto debe contenerse fijo durante más de un segundo, pero si los soviéticos consiguieran decuplicar la densidad del hidrógeno 2 y luego mantenerlo fijo durante un segundo, tal vez harían baza.

Los físicos norteamericanos están trabajando también con el Tokamak y, por añadidura, utilizan un artefacto denominado «Scyllac», que habiendo sido diseñado para contener gas más denso requerirá un período más corto de fijación.

Durante casi veinte años, los físicos vienen orientándose hacia la energía generada por la fusión. Aún cuando el progreso haya sido lento, no se ven todavía indicios de un callejón sin salida definitivo.

Entretanto, la investigación de la fusión ha proporcionado ya diversas aplicaciones prácticas. Los sopletes de plasma disparando chorros a temperaturas de 50.000º C en absoluto silencio superan largamente a los sopletes químicos ordinarios. Se ha sugerido que el soplete de plasma podría ser la última palabra en unidades incineradoras de desperdicios. Su llama desintegraría todo, *absolutamente todo*, en sus elementos constitutivos, y cada uno de esos elementos quedaría disponible para su regeneración y conversión en material nuevamente aprovechable.

## APÉNDICE

### Las Matemáticas en la Ciencia

#### **Gravitación**

Como se ha explicado en el capítulo 1, Galileo inició la ciencia en su sentido moderno introduciendo el concepto de razonamiento apoyado en la observación y en la experimentación de los principios básicos. Obrando así, introdujo también la técnica esencial de la medición de los fenómenos naturales con precisión y abandonó la práctica de su mera descripción en términos generales. En resumen, cambió la descripción cualitativa del universo de los pensadores griegos por una descripción cuantitativa.

Aunque la ciencia depende mucho de relaciones y operaciones matemáticas, y no existiría en el sentido de Galileo sin ellas, sin embargo, no hemos escrito este libro de una forma matemática y lo hemos hecho así deliberadamente. Las matemáticas, después de todo, son una herramienta altamente especializada. Para discutir los progresos de la ciencia en términos matemáticos, necesitaríamos una cantidad de espacio prohibitivo, así como un conocimiento sofisticado de matemáticas por parte del lector. Pero en este apéndice nos gustaría presentar uno o dos ejemplos de la manera en que se han aplicado las matemáticas sencillas a la ciencia con provecho. ¿Cómo empezar mejor que con el mismo Galileo?

Galileo (al igual que Leonardo da Vinci casi un siglo antes) sospechó que los objetos al caer aumentan constantemente su velocidad a medida que lo hacen. Se puso a medir exactamente en qué cuantía y de qué manera aumentaba la velocidad.

Dicha medición no podía considerarse fácil para Galileo, con los instrumentos de que disponía en 1600. Medir una velocidad requiere la medición del tiempo. Hablamos de velocidades de 1.000 km por hora, de 4 km por segundo.

Pero no había ningún reloj en tiempos de Galileo que diera la hora en intervalos aproximadamente iguales.

Galileo halló que una bola, al rodar sobre un plano perfectamente horizontal, se movía con velocidad constante, (Esto supone una ausencia de rozamiento, una condición que podría presumirse dentro de los límites de las rudimentarias mediciones de Galileo.) Ahora bien, un cuerpo que se mueve en una trayectoria horizontal lo hace formando ángulos rectos con la fuerza de gravedad. En tales condiciones, la velocidad de este cuerpo no es afectada por la gravedad de ninguna manera. Una bola que descansa sobre un plano horizontal permanece inmóvil, como cualquiera puede observar. Una bola impulsada a moverse sobre un plano horizontal lo hace con una velocidad constante, como observó Galileo.

Matemáticamente, entonces, se puede establecer que la velocidad  $v$  de un cuerpo, *en ausencia de cualquier fuerza exterior*, es una constante  $k$ , o:

$$v = k$$

Si  $k$  es igual a cualquier número distinto de cero, la bola se mueve con velocidad constante. Si  $k$  es igual a cero, la bola está en reposo; así, el reposo es un «caso particular» de velocidad constante.

Casi un siglo después, cuando Newton sistematizó los descubrimientos de Galileo referentes a la caída de cuerpos, este hallazgo se transformó en la Primera Ley del Movimiento (también llamada el «principio de inercia»). Esta ley puede expresarse así: todo cuerpo persiste en un estado de reposo o de movimiento uniforme rectilíneo, a menos que una fuerza exterior le obligue a cambiar dicho estado.

Cuando una bola rueda hacia abajo por un plano inclinado, no obstante, está bajo la continua atracción de la gravedad. Su velocidad entonces, como halló Galileo, no

era constante, sino que se incrementaba con el tiempo. Las mediciones de Galileo mostraron que la velocidad aumentaba en proporción al período de tiempo  $t$ .

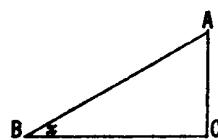
En otras palabras, cuando un cuerpo sufre la acción de una fuerza exterior constante, su velocidad, partiendo del reposo, puede ser expresada como:

$$v = k t$$

¿Cuál era el valor de  $k$ ? Éste, como fácilmente se hallaba por experimentación, dependía de la pendiente del plano inclinado. Cuanto más cerca de la vertical se hallaba el plano, más rápidamente la bola que rodaba aumentaba su velocidad y mayor era el valor de  $k$ . El máximo aumento de velocidad aparecía cuando el plano era vertical, en otras palabras, cuando la bola caía bajo la fuerza integral de la gravedad. El símbolo  $g$  (por «gravedad») se usa cuando la fuerza íntegra de la gravedad está actuando, de forma que la velocidad de una bola en caída libre, partiendo del reposo, era:

$$v = g t$$

Consideremos el plano inclinado con más detalle, en el diagrama:



La longitud del plano inclinado es AB, mientras que su altura hasta el extremo superior es AC. La razón de AC a AB es el seno del ángulo  $x$ , usualmente abreviado como  $\sin x$ .

El valor de esta razón —esto es, de  $\sin x$ — puede ser obtenido de forma aproximada construyendo triángulos con ángulos particulares y midiendo realmente la altura y longitud implicadas en cada caso. O puede calcularse mediante técnicas matemáticas con toda precisión, y los resultados pueden incorporarse en una tabla. Usando dicha tabla, podemos hallar, por ejemplo, que  $\sin 10^\circ$  es aproximadamente igual a 0,17356, que  $\sin 45^\circ$  es aproximadamente igual a 0,70711, y así sucesivamente.

Hay dos importantes casos particulares. Supongamos que el plano «inclinado» es precisamente horizontal. El ángulo  $x$  es entonces cero, y como la altura del plano inclinado es cero, la razón de la altura a su longitud será también cero. En otras palabras,  $\sin 0^\circ = 0$ . Cuando el plano «inclinado» es precisamente vertical, el

ángulo que forma la base es un ángulo recto, o de  $90^\circ$ . Su altura es entonces exactamente igual a su longitud, de forma que la razón de uno al otro es exactamente 1. Por tanto,  $\sin 90^\circ = 1$ .

Volvamos ahora a la ecuación que muestra que la velocidad de una bola rodando hacia abajo por un plano inclinado es proporcional al tiempo:

$$v = k t$$

Se puede probar empíricamente que el valor de  $k$  varía con el seno del ángulo, de forma que:

$$k = k' \sin x$$

(donde  $k'$  es utilizado para indicar una constante que es diferente de  $k$ ).

(En honor a la verdad, el papel del seno en relación con el plano inclinado fue estudiado, con anterioridad a Galileo, por Simon Stevinus, quien también llevó a cabo el famoso experimento de dejar caer diferentes masas desde una cierta altura, un experimento tradicional, pero erróneamente atribuido a Galileo. Sin embargo, si Galileo no fue realmente el primero en experimentar y medir, sí lo fue en inculcar al mundo científico, de forma indeleble, la necesidad de experimentar y medir, y ésa es ya una gloria suficiente.) En el caso de un plano inclinado completamente vertical, el  $\sin x$

$$k = k'$$

se convierte en  $\sin 90^\circ$ , que es 1, también en la caída libre.

Se deduce que  $k'$  es el valor de  $k$  en la caída libre bajo la total atracción de la gravedad, que ya hemos convenido en representar por  $g$ . Podemos sustituir  $g$  por  $k'$ , y tendremos para cada plano inclinado:

$$k = g \sin x$$

$$v = (g \operatorname{sen} x) t$$

Sobre un plano horizontal con  $\operatorname{sen} x = \operatorname{sen} 0^\circ = 0$ , la ecuación para la velocidad se transforma en:

$$v = 0$$

Esto es otra manera de expresar que una bola sobre un plano horizontal, partiendo de un estado de reposo, permanecerá inmóvil a pesar del paso del tiempo. Un objeto en reposo tiende a permanecer en él, y así sucesivamente. Eso es parte de la Primera Ley del Movimiento, y se deduce de la ecuación de la velocidad en el plano inclinado.

Supongamos que la bola no parte del reposo, sino que tiene un movimiento inicial antes de empezar a rodar. Supongamos, en otras palabras, que tenemos una bola moviéndose a lo largo de un plano horizontal a 1,5 m por segundo, y que, de pronto, se halla en el extremo superior de un plano inclinado y empieza a rodar hacia abajo por él.

El experimento prueba que su velocidad después de eso es mayor de 1,5 m por segundo, en cada instante, que la que debería tener si hubiera empezado a rodar hacia abajo por el plano partiendo del reposo. En otras palabras, la ecuación para el movimiento de una bola rodando hacia abajo por un plano inclinado puede expresarse, en una forma más completa, como sigue:

$$v = (g \operatorname{sen} x) t + V$$

donde  $V$  es la velocidad inicial anterior. Si un objeto parte del reposo, entonces  $V$  es igual a 0 y la ecuación se convierte en la que teníamos antes:

$$v = (g \operatorname{sen} x) t$$

Si consideramos a continuación un objeto con una velocidad inicial sobre un plano horizontal, de forma que ese ángulo  $x$  es  $0^\circ$ , la ecuación queda:

$$v = (g \operatorname{sen} (0^\circ) + V$$

o, puesto que  $\operatorname{sen} 0^\circ$  es 0:

$$v = V$$

Así, la velocidad de tal objeto permanece igual a su velocidad inicial, pese al tiempo transcurrido. Esto es la consecuencia de la Primera Ley del Movimiento, también deducida de la observación del movimiento sobre un plano inclinado.

La proporción en que cambia la velocidad se llama «aceleración». Si, por ejemplo, la velocidad (en metros por segundo) de una bola rodando hacia abajo por un plano inclinado es, al final de los sucesivos segundos, 4, 8, 12, 16..., entonces la aceleración es de un metro por segundo cada segundo.

En la caída libre, si usamos la ecuación:

$$v = gt$$

cada segundo de caída origina un aumento de velocidad de  $g$  metros por segundo. Por tanto,  $g$  representa la aceleración debida a la gravedad.

El valor de  $g$  puede determinarse a partir de los experimentos del plano inclinado. Despejando la ecuación del plano inclinado hallamos:

$$g = \frac{v}{\operatorname{sen} x}$$

Puesto que  $v$ ,  $t$  y  $x$  pueden medirse,  $g$  puede calcularse y resulta ser igual a 9 metros por segundo, cada segundo en la superficie terrestre. Por tanto, en la caída libre bajo la acción de la gravedad normal en la superficie terrestre, la velocidad de caída está relacionada con el tiempo de este modo:

$$v = 9 t$$

Ésta es la solución del problema original de Galileo, esto es, determinar la velocidad de caída de un cuerpo y la proporción en que esa velocidad varía.

El siguiente problema es: ¿qué distancia recorre un cuerpo que cae en un tiempo dado? A partir de la ecuación que relaciona la velocidad con el tiempo, es posible relacionar la distancia con el tiempo por un proceso de cálculo llamado «integración». No es necesario entrar en eso, sin embargo, porque la ecuación puede ser obtenida por la experiencia, y, en esencia, Galileo hizo esto.

Halló que una bola rodando hacia abajo por un plano inclinado recorre una distancia proporcional al cuadrado del tiempo. En otras palabras, doblando el tiempo, la distancia aumenta al cuádruplo, y así sucesivamente.

Para un cuerpo que cae libremente, la ecuación que relaciona la distancia  $d$  y el tiempo es:

$$d = \frac{1}{2} g t^2$$

o, puesto que  $g$  es igual a 9:

$$d = 4.5 t^2$$

A continuación, supongamos que, en vez de partir del reposo, se lanza horizontalmente un objeto desde una cierta altura en el aire. Su movimiento será, por tanto, la composición de dos movimientos: uno horizontal y otro vertical.

El movimiento horizontal, que no incluye ninguna otra fuerza aparte del impulso inicial (si despreciamos el viento, la resistencia del aire, etc.), es de velocidad constante, de acuerdo con la Primera Ley del Movimiento, y la distancia que recorre horizontalmente el objeto es proporcional al tiempo transcurrido. Sin embargo, el movimiento vertical cubre una distancia, tal como ya explicamos, que es proporcional al cuadrado del tiempo transcurrido. Antes de Galileo, se creía vagamente que un proyectil del tipo de una bala de cañón se desplazaba en línea recta hasta que el impulso que lo empujaba se agotaba de algún modo, después de

lo cual caía en línea recta hacia abajo. Galileo, sin embargo, realizó el gran adelanto de *combinar* los dos movimientos.

La combinación de estos dos movimientos (proporcional al tiempo, horizontalmente, y proporcional al cuadrado del tiempo, verticalmente) origina una curva llamada parábola. Si un cuerpo se lanza, no horizontalmente, sino hacia arriba o hacia abajo, la curva del movimiento es también una parábola.

Tales curvas de movimiento, o trayectorias, se aplican, por supuesto, a proyectiles como una bala de cañón. El análisis matemático de las trayectorias contenido en los trabajos de Galileo permitió calcular dónde caería una bala de cañón, cuando se la dispara conociendo la fuerza de propulsión y el ángulo de elevación del cañón. A pesar de que el hombre ha lanzado objetos por diversión, para obtener alimentos, para atacar y para defenderse, desde hace incontables milenios, se debe únicamente a Galileo el que por vez primera, gracias a la experimentación y medición, exista una ciencia de la «balística». Por tanto, dio la casualidad que el verdadero primer hallazgo de la ciencia moderna demostraba tener una aplicación militar directa e inmediata.

También tenía una importante aplicación en la teoría. El análisis matemático de la combinación de más de un movimiento resolvía varias objeciones a la teoría de Copérnico. Demostraba que un objeto lanzado hacia arriba no quedaría retrasado en el espacio con respecto a la Tierra en movimiento, puesto que el objeto tendría dos movimientos: uno originado por el impulso del lanzamiento y otro ligado al movimiento de la Tierra. También hacía razonable suponer que la Tierra poseía dos movimientos simultáneos: uno de rotación alrededor de su eje y otro de traslación alrededor del sol —una situación que algunos de los no-copernicanos insistían que era inconcebible.

Isaac Newton extendió los conceptos de Galileo sobre el movimiento a los cielos y demostró que el mismo sistema de leyes del movimiento podía aplicarse tanto a los astros como a la Tierra.

Empezó considerando la posibilidad de que la Luna pudiera caer hacia la Tierra, debido a la gravedad de ésta, pero afirmó que nunca podría colisionar con ella a causa de la componente horizontal de su movimiento. Un proyectil disparado horizontalmente, como decíamos, sigue una trayectoria parabólica descendente

para intersectar con la superficie de la Tierra. Pero la superficie de la Tierra también está curvada hacia abajo, puesto que la Tierra es una esfera. Si se le diera a un proyectil un movimiento horizontal lo suficientemente rápido, podría describir una curva hacia abajo no más acusada que la superficie de la Tierra y, por tanto, podría circunvalar eternamente la Tierra.

Ahora bien, el movimiento elíptico de la Luna alrededor de la Tierra puede descomponerse en sus componentes horizontal y vertical. El componente vertical es tal, que, en el intervalo de un segundo, la Luna cae un poco más de 0.127 cm hacia la Tierra.

En ese tiempo, se desplaza también cerca de unos 1.000 m en dirección horizontal, justamente la distancia necesaria para compensar la caída y proseguir alrededor de la curvatura de la Tierra.

La cuestión era si estos 0,127 cm de descenso de la Luna era causado por la misma atracción gravitatoria que hacía que una manzana, cayendo desde un árbol, descendiera unos 5 m en el primer segundo de su caída.

Newton vio la fuerza de la gravedad terrestre como separándose en todas direcciones, al igual que una gran esfera en expansión.

El área A de la superficie de una esfera es proporcional al cuadrado de su radio r:

$$A = 4 \pi r^2$$

En consecuencia, razonaba que la fuerza gravitatoria expandiéndose por la superficie esférica, debe disminuir en proporción al cuadrado de su radio. La intensidad de la luz y del sonido disminuye con el cuadrado de la distancia hasta el foco, ¿por qué no podía suceder lo mismo con la fuerza de la gravedad?

La distancia desde el centro de la Tierra hasta una manzana situada en su superficie es aproximadamente de 6.437 km. La distancia desde el centro de la Tierra a la Luna es aproximadamente de 386.000 km. Puesto que la distancia a la Luna es sesenta veces mayor que hasta la manzana, la fuerza de la gravedad terrestre en la Luna debía ser  $60^2$ , o 3.600 veces menor que en la manzana.

Si dividimos 5 cm por 3.600, nos dará aproximadamente 0.127. Le pareció evidente a Newton que la Luna ciertamente se movía dentro del campo de acción de la gravedad terrestre.

Newton fue llevado, además, a considerar la «masa» en relación con la gravedad. Corrientemente, medimos la masa como el peso. Pero el peso es solamente el resultado de la atracción de la fuerza gravitatoria de la Tierra. Si no existiera ninguna gravedad, un objeto no tendría peso; sin embargo, contendría la misma cantidad de materia. La masa, por tanto, es independiente del peso, y deberíamos ser capaces de medirla sin tener en cuenta éste.

Supongamos que se tira de un objeto situado sobre una superficie perfectamente pulimentada en una dirección horizontal a la superficie terrestre, de forma que no exista ninguna resistencia de la gravedad. Habrá que efectuar una fuerza para poner el objeto en movimiento y para acelerar este movimiento, a causa de la inercia del cuerpo. Si se mide cuidadosamente la fuerza aplicada, es decir tirando con un dinamómetro unido al objeto, hallaremos que la fuerza  $f$  requerida para producir una aceleración dada  $a$  es directamente proporcional a la masa  $m$ . Si se dobla la masa, hallaremos que hay que doblar la fuerza. Para una masa dada, la fuerza requerida es directamente proporcional a la aceleración deseada. Matemáticamente, esto se expresa en la ecuación:

$$f = m a$$

La ecuación se conoce como la Segunda Ley del Movimiento de Newton.

Así, tal como Galileo había descubierto, la atracción de la gravedad terrestre acelera todos los cuerpos, pesados o ligeros, exactamente en la misma proporción. (La resistencia del aire puede retrasar la caída de muchos cuerpos ligeros, pero, en el vacío, una pluma caerá tan rápidamente como una masa de plomo, lo cual puede comprobarse fácilmente.) Si la Segunda Ley del Movimiento es válida, hemos de concluir que la atracción de la fuerza de la gravedad sobre un cuerpo pesado debe ser mayor que sobre un cuerpo ligero, con el fin de producir la misma aceleración. Para acelerar una masa que es ocho veces mayor que otra, por ejemplo, necesitamos una fuerza ocho veces superior. De aquí se deduce que la atracción de

la fuerza de la gravedad sobre cualquier cuerpo debe ser exactamente proporcional a la masa de este cuerpo. (Éste es, en realidad, el motivo por el que la masa sobre la superficie terrestre puede medirse de una forma tan completamente precisa como el peso.) Newton desarrolló también una Tercera Ley del Movimiento: «Para cada acción, existe una reacción igual y en sentido contrario.» Esto se aplica a la fuerza. En otras palabras, si la Tierra atrae a la Luna con una fuerza determinada, la Luna, por su parte, tira de la Tierra con una fuerza igual. Si la Luna súbitamente duplicase su masa, la fuerza de la gravedad de la Tierra sobre ella quedaría también doblada, de acuerdo con la Segunda Ley; desde luego, la fuerza de la gravedad de la Luna sobre la Tierra tendría entonces que multiplicarse por dos, de acuerdo con la Tercera Ley.

De forma similar, si ambas, la Tierra y la Luna, duplicaran su masa, se produciría en este caso una doble duplicación, es decir cada cuerpo doblaría su fuerza de gravedad dos veces, con lo que tendría lugar un crecimiento de cuatro veces en total.

Newton podría solamente concluir, a partir de este tipo de razonamiento, que la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos en el universo era directamente proporcional al producto de las masas de dichos cuerpos. Y, por supuesto, como ya había decidido antes, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (de centro a centro) entre los cuerpos. Ésta es la Ley de la Gravitación Universal de Newton.

Si  $f$  representa la fuerza gravitatoria,  $m_1$  y  $m_2$  las masas de los dos cuerpos implicados, y  $d$  la distancia entre ellos, entonces la ley puede establecerse:

$$f = \frac{G m_1 m_2}{d^2}$$

$G$  es la «constante gravitatoria», cuya determinación le hizo posible «pesar la Tierra» (véase capítulo III). Newton conjecturaba que  $G$  tenía un valor fijo en todo el universo. Con el tiempo, se halló que nuevos planetas, no descubiertos en tiempo de Newton, ajustaban sus movimientos a las exigencias de la ley de Newton; incluso estrellas dobles increíblemente distantes danzaban al compás del análisis de Newton del universo.

Todo esto surgió de la nueva visión cuantitativa del universo explorada por Galileo. Como puede comprobarse, gran parte de las matemáticas implicadas eran realmente muy sencillas. Las que hemos citado aquí son de álgebra de estudios de bachillerato.

En realidad, todo lo que se necesitaba para introducir una de las mayores revoluciones intelectuales de todos los tiempos era:

1. Un simple conjunto de observaciones que todo estudiante de física puede hacer con una pequeña orientación.
2. Una sencilla serie de generalizaciones matemáticas.
3. El genio trascendental de Galileo y Newton, que tuvieron la perspicacia y originalidad de realizar estas observaciones y generalizaciones por vez primera.

## **Relatividad**

Las leyes del movimiento, tal como fueron elaboradas por Galileo y Newton, estaban basadas en la suposición de que existía algo como el movimiento absoluto —es decir un movimiento con referencia a algún objeto en reposo. Pero todos los objetos que conocemos del universo están en movimiento: la Tierra, el Sol, la Galaxia, los sistemas de galaxias. ¿Dónde en el Universo, entonces, podemos hallar el reposo absoluto con respecto al cual medir el movimiento absoluto?

Fue este orden de ideas lo que llevó al experimento de Michelson-Morley, el cual condujo nuevamente a una revolución científica tan grande, en algunos aspectos, como la iniciada por Galileo (véase capítulo VII). Aquí también la base matemática es bastante sencilla.

El experimento fue una tentativa para descubrir el movimiento absoluto de la Tierra con respecto a un «éter» del que se suponía estaba lleno todo el espacio que se hallaba en reposo. El razonamiento, una vez finalizado el experimento, fue el siguiente:

Supongamos que un rayo de luz se envía en la dirección en que la Tierra se está desplazando por el éter, y que, a una cierta distancia en esa dirección, existe un espejo inmóvil que refleja la luz, devolviéndola a su fuente. Representemos la velocidad de la luz como  $c$ , la velocidad de la Tierra a través del éter como  $v$ , y la

distancia al espejo como  $d$ . La luz parte con la velocidad  $c + v$ : su propia velocidad, más la velocidad de la Tierra. (Está viajando con el viento de cola, podríamos decir.) El tiempo que necesita para alcanzar el espejo es  $d$  dividido por  $(c + v)$ . Sin embargo, en el viaje de regreso, la situación se invierte. La luz reflejada ahora recibe el viento de cara de la velocidad de la Tierra, y su velocidad neta es  $c - v$ . El tiempo que emplea en volver al foco es  $d$  dividido por  $(c - v)$ .

El tiempo total para el viaje completo es:

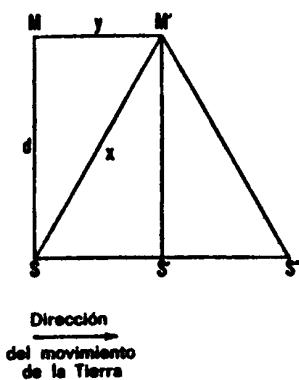
$$\frac{d}{c+v} + \frac{d}{c-v}$$

Combinando algebraicamente los términos hallamos:

$$\frac{d(c-v) + d(c+v)}{(c+v)(c-v)} = \frac{dc - dv + dc + dv}{c^2 - v^2} = \frac{2dc}{c^2 - v^2}$$

Supongamos ahora que el rayo de luz se envía a un espejo, situado a la misma distancia, en una dirección perpendicular al movimiento de la Tierra a través del éter.

El rayo de luz está apuntando desde  $S$  (el foco) a  $M$  (el espejo) sobre la distancia  $d$ . Sin embargo, durante el tiempo que toma en alcanzar el espejo,



el movimiento de la Tierra ha llevado el espejo desde  $M$  a  $M'$ , de forma que el actual camino recorrido por el rayo de luz es desde  $S$  a  $M'$ . Esta distancia llamémosla  $x$ , y la distancia desde  $M$  a  $M'$  llamémosla  $y$ .

Mientras que la luz se desplaza a través de la distancia  $x$  con su velocidad  $c$ , el espejo lo hace a través de la distancia  $y$  con la velocidad del movimiento de la tierra  $v$ . Puesto que ambos, la luz y el espejo, llegan a  $M'$  simultáneamente, las distancias recorridas deben ser exactamente proporcionales a las respectivas velocidades, Por tanto,

$$\frac{y}{x} = \frac{v}{c}$$

$$y = \frac{vx}{c}$$

Ahora podemos hallar el valor de  $x$  mediante el teorema de Pitágoras, que afirma que la suma de los cuadrados de los catetos de un triángulo rectángulo es igual al cuadrado de la hipotenusa. En el triángulo  $SMM'$ , por tanto, sustituyendo  $vx/c$  por  $y$ :

$$x^2 = d^2 + \left(\frac{vx}{c}\right)^2$$

$$x^2 - \left(\frac{vx}{c}\right)^2 = d^2$$

$$x^2 - \frac{v^2 x^2}{c^2} = d^2$$

$$\frac{c^2 x^2 - v^2 x^2}{c^2} = d^2$$

$$(c^2 - v^2)x^2 = d^2 c^2$$

$$x^2 = \frac{d^2 c^2}{c^2 - v^2}$$

$$x = \frac{dc}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

La luz se refleja desde el espejo situado en  $M'$  al foco, que, mientras tanto, se ha desplazado a  $S'$ . Puesto que la distancia  $S'S''$  es igual a  $SS'$ , la distancia  $M'S''$  es

igual a  $x$ . El camino total recorrido por el rayo de luz es, por tanto,  $2x$ , o  $\frac{2dc}{\sqrt{c^2 - v^2}}$ . El tiempo empleado por el rayo de luz para recorrer esta distancia con su velocidad  $c$  es:

$$\frac{2dc}{\sqrt{c^2 - v^2}} / c = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

¿Cómo debemos comparar esto con el tiempo que la luz invierte en el viaje completo en la dirección del movimiento de la Tierra? Dividamos el tiempo en el

caso paralelo ( $\frac{2dc}{c^2 - v^2}$ ) por el tiempo en el caso perpendicular  $\frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}}$ :

$$\frac{2dc}{c^2 - v^2} : \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2dc}{c^2 - v^2} \times \frac{\sqrt{c^2 - v^2}}{2d} = \frac{c\sqrt{c^2 - v^2}}{c^2 - v^2}$$

Ahora bien, cada número dividido por su raíz cuadrada da la misma raíz cuadrada

como cociente, es, decir  $x/\sqrt{x} = \sqrt{x}$ . Recíprocamente,  $\frac{\sqrt{x}}{x} = \frac{1}{\sqrt{x}}$ . De forma que la última ecuación se simplifica en:

$$\frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

Esta expresión puede simplificarse más, si multiplicamos a la vez el numerador y el denominador por  $\sqrt{1/c^2}$  (que es igual a  $1/c$ ).

$$\frac{c\sqrt{1/c^2}}{l^2 - v^2\sqrt{1/c^2}} = \frac{c/c}{l^2/c^2 - v^2/c^2} = \frac{1}{l^2 - v^2/l^2}$$

Y éste es el punto a donde queríamos llegar. Es decir, la razón del tiempo que la luz emplearía viajando en la dirección del movimiento de la Tierra, comparada con el tiempo que necesitaría si lo hiciera en la dirección perpendicular al movimiento

terrestre. Para cada valor de  $v$  mayor que cero, la expresión  $\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$  es mayor que 1. Por tanto, si la Tierra se desplaza por un éter en reposo, la luz precisaría más tiempo viajando en la dirección del movimiento de la Tierra que en la dirección perpendicular. (En realidad, el movimiento paralelo consumiría el máximo de tiempo y el movimiento perpendicular el mínimo de tiempo.) Michelson y Morley realizaron su experimento para intentar descubrir las diferencias direccionales en el tiempo de recorrido de la luz. Lanzando su rayo de luz en todas direcciones, y midiendo el tiempo de retorno mediante su increíblemente preciso interferómetro, creyeron que debían encontrar diferencias en la velocidad aparente. La dirección en la que hallaron que la velocidad sería mínima debía ser paralela al movimiento absoluto de la Tierra, y la dirección en que la velocidad debería ser un máximo sería perpendicular al movimiento de la Tierra. A partir de la diferencia en velocidad, podría calcularse el valor (así como la dirección) del movimiento absoluto de la Tierra.

¡No hallaron diferencias en la velocidad de la luz a pesar de los cambios de dirección! Dicho de otra manera, la velocidad de la luz era siempre igual a  $c$ , independientemente del movimiento del foco —una clara contradicción de las leyes del movimiento de Newton—. Intentando medir el movimiento absoluto de la Tierra, Michelson y Morley habían logrado así plantear dudas, no sólo sobre la existencia del éter, sino también sobre el concepto total de reposo absoluto y de movimiento absoluto, y sobre la verdadera base del sistema newtoniano del universo (véase capítulo VII).

El físico irlandés G. F. FitzGerald concibió una forma de salvar la situación. Sugirió que todos los objetos disminuyen en longitud, en la dirección en que se mueven, en una cantidad igual a  $\sqrt{1-v^2/c^2}$ .

Así:

$$L' = L \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

donde  $L'$  es la longitud del cuerpo que se mueve, en la dirección de su movimiento, y  $L$  es la longitud que debería tener si estuviera en reposo.

La fracción contractora  $\sqrt{1-v^2/c^2}$ , según mostró FitzGerald, simplificaría precisamente la razón  $v\sqrt{1-v^2/c^2}$  que indica las velocidades máxima y mínima de la luz, en el experimento de Michelson-Morley. La razón se convertiría en la unidad, y la velocidad de la luz aparecería a nuestros instrumentos y órganos sensoriales contraídos como igual en todas direcciones, independientemente del movimiento del foco de la luz por el éter.

En condiciones ordinarias, el valor de la contracción es *muy* pequeña. Incluso si un cuerpo se desplaza con una décima parte de la velocidad de la luz, o 30.000 km por segundo, su longitud se contraería sólo ligeramente, de acuerdo con las ecuaciones de FitzGerald. Considerando la velocidad de la luz igual a 1, la ecuación dice:

$$L' = L \sqrt{1 - \left(\frac{0.1}{1}\right)^2}$$

$$L' = L \sqrt{1 - 0.01}$$

$$L' = L \sqrt{0.99}$$

Así,  $L'$  vuelve a ser aproximadamente igual a  $0,995 L$ , una contracción de alrededor del 1 por ciento.

¿A qué velocidad se contraerá un objeto hasta alcanzar la mitad de la longitud que tiene en reposo? Con  $L'$  igual a un medio de  $L$ , la ecuación de FitzGerald es:

$$\frac{L}{2} = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

o dividiendo por  $L$ :

$$\frac{1}{2} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Elevando al cuadrado ambos miembros de la ecuación.

$$\frac{1}{4} = 1 - \frac{v^2}{c^2}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{3}{4}$$

$$v = \sqrt{\frac{3c^2}{4}} = 0.866c$$

Puesto que la velocidad de la luz en el vacío es de 300.000 km por segundo, la velocidad a la cual un objeto se contrae a la mitad de su longitud es 0,866 veces 300.000, o sea, aproximadamente, 259.800 km por segundo.

Si un cuerpo se mueve con la velocidad de la luz, de forma que  $v$  sea igual a  $c$ , la ecuación de FitzGerald se transforma en

---


$$L' = L \sqrt{1 - \frac{c^2}{c^2}} = L \sqrt{0} = 0$$

A la velocidad de la luz, por tanto, la longitud en la dirección del movimiento queda cero. Se sigue, en consecuencia, que ninguna velocidad mayor que la luz de la luz es posible, porque aparecería una longitud negativa, lo cual carece de sentido en el mundo físico.

En la década siguiente a la formulación de la ecuación de FitzGerald, fue descubierto el electrón, y los científicos empezaron a examinar las propiedades de las minúsculas partículas cargadas. Lorentz elaboró una teoría de que la masa de una partícula con una carga dada era inversamente proporcional a su radio. En otras palabras, cuanto más pequeño era el volumen en que una partícula concentraba su carga, mayor era su masa.

Ahora bien, si una partícula está contraída a causa de su movimiento, su radio se reduce en la dirección del movimiento, de acuerdo con la ecuación de FitzGerald. Sustituyendo los símbolos  $R$  y  $R'$  por  $L$  y  $L'$  escribimos la ecuación:

$$R = R \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$\frac{R'}{R} = \frac{M}{M'}$$

La masa de una partícula es inversamente proporcional a su radio. Por tanto,

$$\frac{R'}{R} = \frac{M}{M'}$$

donde  $M$  es la masa de la partícula en reposo y  $M'$  es su masa cuando está en movimiento.

Sustituyendo  $M/M'$  por  $R'/R$  en la precedente ecuación, tenemos:

$$\frac{M}{M'} = \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$M' = \frac{M}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Finalmente, para una partícula moviéndose a una velocidad igual a la de la luz, de forma que  $v$  es igual a  $c$ , la ecuación de Lorentz se transforma en:

$$M' = \frac{M}{\sqrt{1 - c^2/c^2}} = \frac{M}{0}$$

Ahora bien, cuando el denominador de una fracción con un numerador fijo se vuelve cada vez más pequeño («tiende acero»), el valor de la fracción se hace progresivamente mayor; sin límites. En otras palabras, a partir de la anterior ecuación, se deduciría que la masa de un objeto que se mueve a una velocidad aproximándose a la de la luz se convertiría en infinitamente grande. Asimismo, la velocidad de la luz resultaría ser la máxima posible, pues una masa mayor que el infinito aparece como algo sin sentido.

Todo esto condujo a Einstein a refundir las leyes del movimiento y de la gravitación. Consideró un universo, en otras palabras, en el que los resultados de los experimentos de Michelson-Morley eran posibles.

Sin embargo, aún siendo así, no hemos puesto todavía el punto final. Recordemos, por favor, que la ecuación de Lorentz asume para  $M$  cierto valor superior a cero.

Esto es aplicable a casi todas las partículas con las que estamos familiarizados y a todos los cuerpos de átomos y estrellas que están integrados por tales partículas. No obstante, hay neutrinos y antineutrinos para los cuales  $M$ , la masa en reposo o «masa-repozo», es igual a cero, y esto también es cierto para los fotones.

Dichas partículas se trasladan a la velocidad de la luz en el vacío, siempre y cuando se encuentren verdaderamente en un vacío. Apenas se forman, empiezan a moverse con esa velocidad sin ningún período mensurable de aceleración.

Cabría preguntarse cómo es posible hablar de «masa-reposo» de un fotón o un neutrino si éstos no reposan nunca y sólo pueden existir mientras viajan (en ausencia de materia interceptadora) a una velocidad constante de 300.000 km/seg. Por consiguiente, los físicos O. M. Bilaniuk y E. C. G. Sudarshan han sugerido que se haga referencia a  $M$  como «masa propia». Para una partícula cuya masa sea mayor que cero, la masa propia es igual a la masa medida cuando la partícula está en reposo respecto a los instrumentos y al observador que toma la medida. Para una partícula con masa igual a cero, se obtiene la masa propia por medio del razonamiento indirecto. Bilaniuk y Sudarshan sugieren asimismo que todas las partículas con una masa propia cero se denominen «luxones» (palabra latina que significa «luz»), porque se trasladan a la velocidad de la luz, mientras que las partículas con masa propia superior a cero deberían llamarse «tardiones», porque se trasladan con menos velocidad que la luz, es decir a «velocidades sublumínicas». En 1962, Bilaniuk y Sudarshan iniciaron unos trabajos especulativos sobre las consecuencias de las velocidades superiores a la de la luz («velocidades superlumínicas»). Cualquier partícula trasladándose con esas velocidades tendría una masa imaginaria. Es decir, la masa sería un valor ordinario multiplicado por la raíz cuadrada de -1.

Supongamos, por ejemplo, una partícula que se traslada a dos veces la velocidad de la luz, de forma que en la ecuación de Lorentz  $v$  es igual a  $2c$ . En tal caso:

$$M' = \frac{M}{\sqrt{1 - \frac{(2c)^2}{c^2}}} = \frac{M}{\sqrt{1 - \frac{4c^2}{c^2}}} = \frac{M}{\sqrt{-3}}$$

Esto conduce al hecho de que, mientras estuviese en movimiento, su masa sería una masa propia ( $M$ ) dividida por  $\sqrt{-3}$ . Pero  $\sqrt{-3}$  es igual a  $\sqrt{3} \times \sqrt{-1}$ , es decir,  $1.73 \times \sqrt{-1}$ . Por consiguiente, la masa propia  $M$  es igual a  $M \times 1.73 \times \sqrt{-1}$ . Puesto que

cualquier cantidad donde se incluya  $\sqrt{-1}$  se llama imaginaria, debemos llegar a la conclusión de que las partículas con velocidades superlumínicas tienen masas propias imaginarias.

Las partículas corrientes en nuestro universo ordinario tienen siempre masas que son cero o positivas. Una masa imaginaria no puede tener un significado concebible en nuestro universo. ¿Significa esto que las partículas más veloces que la luz son inexistentes? No necesariamente. Dando por supuesta la existencia de masas propias imaginarias, podemos hacer que esas partículas «más veloces que la luz» encajen en todas las ecuaciones de la Teoría Especial de la Relatividad de Einstein. Sin embargo, tales partículas muestran una propiedad aparentemente paradójica: cuanto más lento es su movimiento, tanta más energía contienen. Esto es precisamente el reverso de la situación en nuestro universo y también, quizás, el significado de la masa imaginaria.

Una partícula con una masa imaginaria gana velocidad cuando encuentra resistencia y la pierde cuando la impulsa hacia delante alguna fuerza. Al decaer su energía, se traslada cada vez más aprisa, y alcanza una velocidad infinita cuando esa energía desciende hasta cero. Al aumentar su energía, se mueve con creciente lentitud, y cuando la energía se aproxima al infinito, la velocidad se reduce hasta igualar casi la de la luz.

El físico americano Gerald Feinberg ha dado a estas partículas más veloces que la luz el nombre de «taquíon» de una palabra griega que significa «velocidad».

Podemos imaginar, pues, la existencia de dos universos. Uno, el nuestro, es el universo «tardión», donde todas las partículas marchan a velocidades sublumínicas y pueden acelerar su marcha hasta alcanzar casi la velocidad de la luz cuando se incrementa su energía. El otro es el universo «taquíon», donde todas las partículas alcanzan velocidades superlumínicas y pueden decelerar hasta igualar casi la velocidad de la luz cuando aumenta su energía. En medio está la «pared luxón», infinitamente delgada, donde hay partículas cuya velocidad es exactamente lumínica. Podemos considerar que ambos universos comparten la pared luxón.

Si un taquíon es suficientemente energético y, por tanto, se mueve con suficiente lentitud, tendrá bastante energía y permanecerá en algún lugar durante un período lo bastante prolongado para permitirle emitir una ráfaga apreciable de fotones. (Los

taquiones dejarían una estela de fotones incluso en el vacío, como una especie de radiación Cherenkov.) Los científicos se mantienen alerta para captar esas ráfagas, pero no hay grandes probabilidades de poder emplazar un instrumento en el lugar preciso donde se muestra durante una trillonésima de segundo una de esas ráfagas (posibles, pero muy infrecuentes).

Algunos físicos opinan que «todo cuanto no esté prohibido es compulsivo». Dicho de otra forma, cualquier fenómeno que no quebrante una ley de conservación *debe* manifestarse en un momento u otro; o, si los taquiones no quebrantan la relatividad especial, *deben* existir. No obstante, incluso los físicos tan convencidos de que esa fórmula es algo así como un «aseo» necesario del universo, se alegrarían (y quizás se tranquilizasen también) si encontraran algunas pruebas sobre estos taquiones no prohibidos. Hasta ahora no han logrado encontrarlas.

Una consecuencia de la ecuación de Lorentz fue deducida por Einstein para crear la que se ha convertido, tal vez, en la más famosa ecuación científica de todos los tiempos.

La ecuación de Lorentz puede escribirse en la forma siguiente:

$$M' = M(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

ya que, en notación algebraica,  $\sqrt{1-v^2/c^2}$  puede escribirse  $x^{1/2}$ . Esto dispone la ecuación de una forma en que puede desarrollarse (es decir convertirse en una serie de términos) mediante una fórmula descubierta por Newton, entre otros. La fórmula es el teorema del binomio.

El número de términos en que puede desarrollarse la ecuación de Lorentz es infinito, pero, puesto que cada término es menor que el anterior, si tomamos sólo los dos primeros términos que consideremos aproximadamente correctos, la suma de todos los restantes es bastante pequeña como para despreciarse.

El desarrollo queda así:

$$(1 - v^2/c^2)^{-1/2} = 1 + \frac{v^2}{c^2} \dots$$

sustituyendo esto en la ecuación de Lorentz, tenemos,

$$M' = M \left( 1 + \frac{v^2}{c^2} \right) = M + \frac{1}{2} \frac{Mv^2}{c^2}$$

Ahora bien, en física clásica la expresión  $\frac{1}{2} \frac{Mv^2}{c^2}$  representa la energía de un cuerpo en movimiento. Si utilizamos el símbolo  $e$  para representar la energía, la ecuación anterior queda de la forma siguiente:

$$M' = M + \frac{e}{c^2}$$

o

$$M' - M = \frac{e}{c^2}$$

El incremento en la masa debido al movimiento ( $M' - M$ ) puede representarse como  $m$ , así pues:

$$m = \frac{e}{c^2}$$

o

$$e = mc^2$$

Fue esta ecuación la que por primera vez indicaba que la masa era una forma de energía. Einstein llegó a demostrar que la ecuación podía aplicarse a todas las masas, no solamente al incremento en la masa debido al movimiento.

También aquí, la mayor parte de las matemáticas implicadas están solamente a nivel universitario. Sin embargo, representó para el mundo los comienzos de una visión del Universo más grande y amplia aún que la de Newton, y también puso de manifiesto la manera de concretar sus consecuencias. Señaló el camino para el reactor nuclear y la bomba atómica, por ejemplo.

## Bibliografía I

Una introducción a la Ciencia resultaría incompleta sin una guía para ampliar las lecturas acerca del tema. Seguidamente presento una breve selección de libros. Esta relación constituye una miscelánea y no pretende ser una colección completa de los mejores libros modernos sobre temas científicos. Sin embargo, he leído la mayor parte de ellos y puedo recomendarlos todos, incluso los míos.

<b>CAPÍTULO 1. ¿QUÉ ES LA CIENCIA?</b>	
BERNAL, J. D.	<i>Science in history</i> . Hawthorn Books, Nueva York, 1965.
CLAGETT, MARSHALL	<i>Greek Science in Antiquity</i> . Adelard-Schuman, Nueva York, 1955.
CROMBIE, A. C.	<i>Medieval and Early Modern Science</i> (2 vols.). Doubleday & Company, Nueva York, 1959.
DAMPIER, SIR WILLIAM CECIL	<i>A History of Science</i> . Cambridge University Pres, Nueva York, 1958.
DREYER, J. L. E.	<i>A History of Astronomy from Thales to Kepler</i> . Dover Publications, Nueva York, 1953.
FORBES, R. J. y DIJKSTERHUIS, E. J.	<i>A History of Science and Technology</i> , (2 vols.). Penguin Books, Baltimore, 1963.
MASON, S. F.	<i>Main Currents of Scientific Thought</i> . Abelard-Schuman, Nueva York, 1953.
TATON, R. (editor)	<i>History of Science</i> (4 vols.). Basic Books, Nueva York, 1963-1966.
<b>CAPÍTULO 2. EL UNIVERSO</b>	
ALTER, D. CUMINSHAW, C H. y PHILLIPS, J. G.	<i>Pictorial Astronomy</i> (3 <sup>ra</sup> ed. rev.). Thomas Y. Crowell, Nueva York, 1969.
ASIMOV, ISAAC	<i>The Universe</i> (ed. rev.). Walker & Company, Nueva York, 1971.
BONNOR, WILLIAM	<i>The Mystery of the Expanding Universe</i> . Macmillan Company, Nueva York, 1964.
BURBIDGE, G. y BURBIDGE, M.	<i>Quasi-Stellar Objects</i> . Freeman, San Francisco, 1967.
FLAMMARION, G. C. y otros	<i>The Flammarion Book of Astronomy</i> . Simon & Schuster, Nueva York, 1964.
GAMOW, GEORGE	<i>The Creation of the Universe</i> . Viking Press, Nueva York, 1955.
HOYLE, FRED	<i>Astronomy</i> . Doubleday & Company, Nueva York, 1962.
HOYLE, FRED	<i>Frontiers of Astronomy</i> . New American Library, Nueva York, 1955.
JOHNSON, MARTIN	<i>Astronomy of Stellar Energy and Decay</i> . Dover Publications, Nueva York, 1959
KRUSE, W. y DIECKVOSS, W.	<i>The Stars</i> . University of Michigan Press, Ann Arbor, 1957.
LEY, WILLY	<i>Watchers of the Skies</i> . Viking Press, Nueva York, 1966.
MCLAUGHLIN, DEAN B.	<i>Introduction to Astronomy</i> . Houghton Mifflin Company, Boston, 1961.
OPIK, ERNST J.	<i>The Oscillating Universe</i> . New American Library, Nueva York, 1960.
SCIAMA, D. W.	<i>The Unity of the Universe</i> . Doubleday & Company, Nueva York, 1959.
SHKLOVSKO, I. S. y SAGAN, CARL	<i>Intelligent Life in the Universe</i> . Holden-Day, San Francisco, 1966.

SMITH, F. GRAHAM	<i>Radio Astronomy</i> . Penguin Books, Baltimore, 1960.
STRUVE, OTTO, y ZEBERGS, VELTA	<i>Astronomy of the 20th Century</i> . Macmillan Company, Nueva York, 1962.
WHIPPLE, FRED L.	<i>Earth, Moon and Planets</i> (ed. rev.). Harvard University Press, Cambridge, Mass. 1963.
WHITHROW, G. J.	<i>The Structure and Evolution of the Universe</i> . Harper & Brothers, Nueva York, 1959.
<b>CAPÍTULO 3. LA TIERRA</b>	
ADAMS, FRANK DAWSON	<i>The Birth and Development of the Geological Sciences</i> . Dover Publications, Nueva York, 1938.
BURTON, MAURICE	<i>Life in the Deep</i> . Roy Publishers, Nueva York, 1958.
GAMOW, GEORGE	<i>A Planet Called Earth</i> . Viking Press, Nueva York, 1963.
GILLULY, J. WATERS, A. C. y WOODFORD, A. O.	<i>Principles of Geology</i> . W. H. Freeman & Company, San Francisco, 1958.
GUTENBERG, B. (editor)	<i>Internal Constitution of the Earth</i> . Dover Publications, Nueva York, 1951.
HURLEY, PATRICK M.	<i>How Old Is the Earth?</i> Doubleday & Company, Nueva York, 1959.
KUENEN, P. H.	<i>Realms of Water</i> . John Wiley & Sons, Nueva York, 1963.
MASON, BRIAN	<i>Principles of Geochemistry</i> . John Wiley & Sons, Nueva York, 1958.
MOORE, RUTH	<i>The Earth We Live On</i> . Alfred A. Knopf, Nueva York, 1956.
SCIENTIFIC AMERICAN (editores)	<i>The Planet Earth</i> . Simon & Schuster, Nueva York, 1957.
<b>CAPÍTULO 4. LA ATMÓSFERA</b>	
BATES, D. R. (editor)	<i>The Earth and Its Atmosphere</i> . Basic Books, Nueva York, 1957.
GLASSTONE, SAMUEL	<i>Sourcebook on the Space Sciences</i> . Van Nostrand, Nueva York, 1965.
LEY, WILLY	<i>Rockets, Missiles, and Space Travel</i> . Viking Press, Nueva York, 1957.
LOEBSACK, THEO	<i>Our Atmosphere</i> . New American Library, Nueva York, 1961.
NEWELL, HOMER E.	JR. <i>Window in the Sky</i> . McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1959.
NININGER, H. H.	<i>Out of the Sky</i> . Dover Publications, Nueva York, 1952
ORR, CLYDE, JR.	<i>Between Earth and Space</i> . Collier Books, Nueva York, 1961.
<b>CAPÍTULO 5. LOS ELEMENTOS</b>	
ALEXANDER, W. y STREET	A. <i>Metals in the Service of Man</i> . Penguin Books, Nueva York, 1954.
ASIMOV, ISAAC	<i>A Short History of Chemistry</i> . Doubleday & Company, Nueva York, 1965.
ASIMOV, ISAAC	<i>The Noble Gases</i> . Basic Books, Nueva York, 1966.
DAVIS, HELEN MILES	<i>The Chemical Elements</i> . Ballantine Books, Boston, 1959.
HOLDEN, ALAN, y SINGER, PHYLLIS	<i>Crystals and Crystal Growing</i> . Doubleday & Company, Nueva York, 1960.
IHDE, AARON, J.	<i>The Development of Modern Chemistry</i> . Harper & Row, Nueva York, 1964.
JAFFE, BERNARD	<i>Chemistry Creates a New World</i> . Thomas Y. Crowell, Nueva York, 1957
LEICESTER, HENRY, M.	<i>The Historical Background of Chemistry</i> . John Wiley & Sons, Nueva York, 1956.
PAULING, LINUS	<i>College Chemistry</i> (3 <sup>ra</sup> . ed.). W. H. Freeman & Company, San Francisco, 1964.
SCIENTIFIC AMERICAN (editores)	<i>New Chemistry</i> . Simon & Schuster, Nueva York, 1957.
WEAVER, E. C. y FOSTER, L. S.	<i>Chemistry for Our Times</i> . McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1947.
WEEKS, MARY E. y LEICESTER, H. M.	<i>Discovery of the Elements</i> (7 <sup>ma</sup> . ed.). Journal of Chemical Education, Easton, Filadelfia, 1968.

<b>CAPÍTULO 6. LAS PARTÍCULAS</b>	
ALFREN, HANNES	<i>Worlds Antiworlds</i> . Freeman, San Francisco, 1966.
ASIMOV, ISAAC	<i>The Neutrino</i> . Doubleday & Company, Nueva York, 1966.
FORD, KENNETH W.	<i>The World of Elementary Particles</i> . Blaisdell Publishing Company, Nueva York, 1963.
FRIEDLANDER, G. KENNEDY, J. W. y MILLER, J. M.	<i>Nuclear and Radiochemistry</i> (2 <sup>da</sup> ed.). Wiley & Sons, Nueva York, 1964.
GAMOW, GEORGE	<i>Mr. Tompkins Explores the Atom</i> . Cambridge University Press, Nueva York, 1955.
GARDNER, MARTIN	<i>The Ambidextrous Universe</i> . Basic Books, Nueva York, 1964.
GLASSTONE, SAMUEL	<i>Sourcebook on Atomic Energy</i> (3 <sup>ra</sup> ed.). D. Van Nostrand Company, Princeton, N.J. 1967.
HUCHES, DONALD J.	<i>The Neutron Story</i> . Doubleday & Company. Nueva York, 1959.
MASSEY, SIR HARRIE	<i>The New Age in Physics</i> . Harper & Brothers, Nueva York, 1960.
PARK, DAVID	<i>Contemporary Physics</i> . Harcourt, Brace & World, Nueva York, 1964.
SHAMOS, M. H. Y MURPHY, G. M. (editores)	<i>Recent Advances in Science</i> . New York University Press, Nueva York, 1956.
<b>CAPÍTULO 7. LAS ONDAS</b>	
BENT, H. A.	<i>The Second Law</i> . Oxford University Press, Nueva York, 1965.
BERGMANN, P. G.	<i>The Riddle of Gravitation</i> . Charles Scribner's Sons, Nueva York, 1968.
BLACK, N. H. y LITTLE, E. P.	<i>An Introductory Course in College Physics</i> . Macmillan Company, Nueva York, 1957.
EDINGTON, SIR ARTHUR S.	<i>The Nature of the Physical World</i> . Cambridge University Press, Nueva York, 1953.
EINSTEIN, ALERT, e INFELD, LEOPOLD	<i>The Evolution of Physics</i> . Simon & Schuster, Nueva York, 1938.
FREEMAN, IRA M.	<i>Physics Made Simple</i> . Made Simple Books, Nueva York, 1954.
GARDNER. MARTIN	<i>Relativity for the Million</i> . Macmillan Company, Nueva York, 1962.
HOFFMAN, BANESH	<i>The Strange Story of the Quantum</i> . Dover Publications, Nueva York, 1959.
ROSSI, BRUNO	<i>Cosmic rays</i> . McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1964.
SHAMOS, MORRIS H.	<i>Great Experiments in Physics</i> . Henry Holt & Company, Nueva York, 1959.
<b>CAPÍTULO 8. LA MÁQUINA</b>	
BITTER, FRANCIS	<i>Magnets</i> . Doubleday & Company, Nueva York, 1959.
DE CAMP, L. SPRAGUE	<i>The Ancient Engineers</i> . Doubleday & Co. Nueva York, 1963.
KOCK, W. E.	<i>Lasers and Holography</i> . Doubleday & Company, Nueva York, 1969.
LARSEN, EGON	<i>Transport</i> . Roy Publishers, Nueva York, 1959.
LEE, E. W.	<i>Magnetism</i> . Penguin Books, Baltimore, 1963.
LENGYEL, BELA.	<i>Lasers</i> . John Wiley & Sons, Nueva York, 1962.
NEAL, HARRY EDWARD	<i>Communication</i> . Julius Messner, Nueva York, 1960.
PIERCE, JOHN R.	<i>Electrons, Waves and Messages</i> . Doubleday & Company, Nueva York, 1956.
PIERCE, JOHN R.	<i>Symbols, Signals and Noise</i> . Harper Brothers, Nueva York, 1961.
SINGER, CHARLES, HOLMYARD, E. J. y HALL, A. R. (editores)	<i>A History of Technology</i> (5 vols.). Oxford University Press, Nueva York, 1954.

TAYLOR, F. SHERWOOD	<i>A. History of Industrial Chemistry.</i> Abelard Schuman, Nueva York, 1957.
UPTON, MONROE	<i>Electronics for Everyone</i> (2 <sup>da</sup> . ed. rev.). New American Library, Nueva York, 1959.
USHER, ABBOT PAYSON	<i>A History of Mechanical Inventions.</i> Beacon Press, Boston, 1959.
WARSCHAUER, DOUGLAS M.	<i>Semiconductors and Transistors.</i> McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1959.
<b>CAPÍTULO 9. EL REACTOR</b>	
ALEXANDER, PETER	<i>Atomic Radiation and Life.</i> Penguin Books, Nueva York, 1957.
BISHOP, AMASA S.	<i>Project Sherwood.</i> Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass. 1958.
FOWLER, JOHN M.	<i>Fallout. A Study of Superbombs, Strontium 90, and Survival.</i> Basic Books. Nueva York, 1960.
JUKES, JOHN	<i>Man-Made Sun.</i> Abelard-Schuman, Nueva York, 1959.
JUNGK, ROBERT	<i>Brighter Than a Thousand Suns.</i> Harcourt, Brace & Company, Nueva York, 1958.
PURCELL, JOHN	<i>The Best-Kept Secret.</i> Vanguard Press, Nueva York, 1963.
RIEDMAN, SARAH R.	<i>Men and Women behind the Atom.</i> Abelard-Schuman, Nueva York, 1958.
SCIENTIFIC AMERICAN (editores)	<i>Atomic Power.</i> Simon & Schuster, Nueva York, 1955.
WILSON, ROBERT R. y LITTAUER, R.	<i>Accelerators.</i> Doubleday & Company, Nueva York. 1960.
<b>APÉNDICE. LAS MATEMÁTICAS EN LA CIENCIA</b>	
COURANT, RICHARD y ROBBINS, HERBERT	<i>What Is Mathematics?</i> Oxford University Press, Nueva York, 1941.
DANTZIG, TOBIAS	<i>Number, the language of Science.</i> Macmillan Company, Nueva York, 1954.
FELIX, LUCIENNE	<i>The Modern Aspect of Mathematics.</i> Basic Books, Nueva York, 1960.
FREUND, JOHN E.	<i>A Modern Introduction to Mathematics.</i> Prentice Hall, Nueva York, 1956.
KLINE, MORRIS	<i>Mathematics and the Physical World.</i> Thomas Y. Crowell Company, Nueva York, 1959.
KLINE, MORRIS	<i>Mathematics In Western Culture.</i> Oxford University Press, Nueva York. 1953.
NEWMAN, JAMES, R.	<i>The World of Mathematics</i> (4 vols.). Simon & Schuster, Nueva York, 1956.
STEIN, SHERMAN K.	<i>Mathematics, the Man-Made Universe.</i> W. H. Freeman & Company, San Francisco, 1963.
VALENS. EVANS G.	<i>The Number of Things.</i> Dutton & Co. Nueva York, 1964.
GENERALIDADES	
ASIMOV, ISAAC	<i>Asimov's Biographical Encyclopedia of Science and Technology.</i> Doubleday & Company Nueva York, 1964.
ASIMOV, ISAAC	<i>Life and Energy.</i> Doubleday & Company, Nueva York, 1962.
ASIMOV, ISAAC	<i>The Words of Science.</i> Houghton Mifflin Company, Boston, 1959.
CABLE, E. J. y col.	<i>The Physical Sciences.</i> Prentice-Hall, Nueva York, 1959.
GAMOV, GEORGE	<i>Matter, Earth, and Sky.</i> Prentice-Hall, Nueva York, 1958.
HUTCHINGS, EDWARD, JR.	(director), <i>Frontiers in Science,</i> Basic Books, Nueva York, 1958.
SHAPLEV, HARLOW, RAPPORTE,	<i>A Treasury of Science</i> (4 <sup>ta</sup> . ed.). Harper & Brothers, Nueva York, 1958.

SAMUEL, y WRIGHT, HELEN (directores)	
SLABAUGH, W. H. y BUTLER, A. B.	<i>College Physical Science.</i> Prentice-Hall, Nueva York, 1958.
WATSON, JANE WERNER	<i>The World of Science.</i> Simon & Schuster, Nueva York, 1958.



## Capítulo 9

### EL REACTOR

#### **Fisión Nuclear**

Los rápidos avances tecnológicos del siglo XX han sido posibles a costa de un formidable incremento en nuestro consumo de la energía que producen las fuentes terrestres. Cuando las naciones subdesarrolladas, con sus miles de millones de habitantes, se incorporen a los países industrializados y compartan su alto nivel de vida, el combustible se consumirá en proporciones aún más sensacionales. ¿Dónde encontrará el género humano las reservas de energía requeridas para sustentar semejante civilización?

Ya hemos visto desaparecer una gran parte de los bosques que cubren la superficie terrestre. La madera fue el primer combustible del hombre. A principios de la Era cristiana, casi toda Grecia, África del Norte y el Oriente Próximo fueron despojados inexorablemente de sus florestas, en parte para obtener combustible, y, en parte, para roturar la tierra con objeto de dedicarla a las tareas agropecuarias. La tala indiscriminada de bosques fue un desastre de doble alcance. No sólo destruyó las reservas de madera; el desmonte drástico de la tierra entrañó también la destrucción más o menos permanente de toda fertilidad. Casi todas esas regiones antiguas, que antaño sustentaron las más prósperas culturas humanas, son hoy día estériles e improductivas y están pobladas por gentes incultas, míseras.

La Edad Media presenció la progresiva despoblación forestal de Europa Occidental, y los tiempos modernos han visto una despoblación aún más rápida del continente norteamericano. Apenas quedan ya grandes masas de madera virgen en las zonas templadas del mundo, si se exceptúan Canadá y Siberia.

Parece improbable que el hombre pueda seguir adelante sin madera. Este material será siempre necesario para fabricar papel, muebles y maderaje.

En cuanto al combustible, el carbón y el petróleo han ocupado el lugar de la madera. El botánico griego Teofrasto ya mencionó el carbón nada menos que en el año 200 antes de J.C., pero los primeros informes sobre minería carbonífera en Europa datan del siglo XII. Durante el siglo XVII, Inglaterra, desprovista de bosques y con necesidades muy urgentes de madera para su Armada, optó por el consumo

en gran escala de carbón, un cambio que echó los cimientos para la Revolución Industrial.

Esta evolución fue muy lenta en otras partes. Incluso hacia 1800 la madera proporcionaba el 94 % del combustible en los jóvenes Estados Unidos, con sus densos bosques. En 1885, la madera cubrió todavía el 50 % de esas necesidades y en 1900 sólo el 3 %. El equilibrio derivó, por añadidura, más allá del carbón, el petróleo y el gas natural. En 1900, la energía suministrada por el carbón a los Estados Unidos fue diez veces mayor que la del petróleo y gas juntos. Medio siglo después, el carbón aportó solamente una tercera parte de la energía proporcionada por el petróleo y el gas. Carbón, petróleo, y gas son «combustibles fósiles», reliquias de la vida vegetal, viejos eones... y una vez se consumen no es posible remplazarlos. Respecto al carbón y el petróleo, el hombre vive de su capital dilapidándolo a un ritmo extravagante.

Particularmente, el petróleo, se está agotando muy aprisa. Hoy día el mundo quema un millón de barriles por hora, y el índice de consumo se eleva sin cesar. Aunque la Tierra conserva todavía mil billones de barriles aproximadamente, se calcula que la producción petrolífera alcanzará su punto culminante en 1980 y después empezará a declinar. Desde luego, se puede fabricar petróleo artificial combinando el carbón más común con hidrógeno bajo presión. Este proceso fue ideado en 1920 por el químico alemán Friedrich Bergius, quien, por ello, compartió (con Bosch) el premio Nobel de Química el año 1931. Por otra parte, las reservas carboníferas son grandes sin duda, tal vez rondan los 7 mil billones de toneladas, pero, no todo ese carbón es accesible a la minería. En el siglo XXV o quizás antes, el carbón puede llegar a ser un artículo muy costoso.

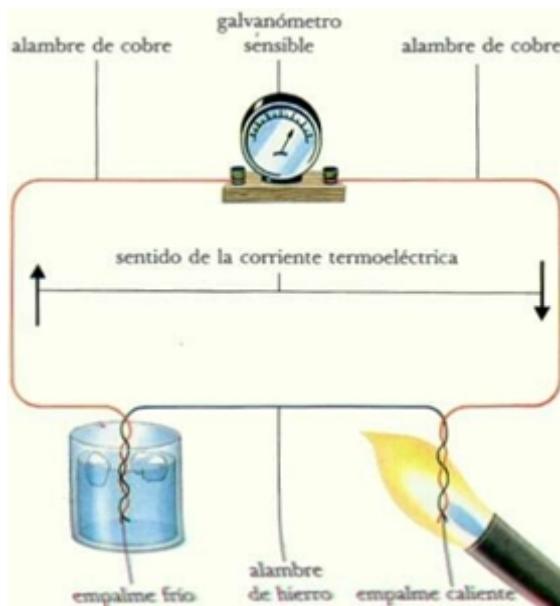
Hay esperanzas de nuevos hallazgos. Tal vez nos aguarden algunas sorpresas a juzgar por los indicios de carbón y petróleo en Australia, el Sahara y las regiones antárticas. Además, los adelantos tecnológicos pueden abaratar la explotación de cuencas carboníferas cada vez más profundas, horadar la tierra progresivamente en busca de petróleo y extraer este combustible de las reservas submarinas.

Sin duda encontraremos los medios de usar nuestro combustible con más eficacia. El proceso de quemar combustible para producir calor, convertir el agua en vapor, mover un generador o crear electricidad, desperdicia grandes cantidades de energía

en el camino. Se podrían evitar muchas pérdidas si se transformase directamente el calor en electricidad. La posibilidad de hacer tal cosa se presentó el año 1823, cuando un físico alemán, Thomas Johann Seebeck, observó que si se unen dos metales diferentes en un circuito cerrado y se calienta la divisoria entre ambos elementos, se mueve la aguja de un compás situado en sus inmediaciones. Ello significa que el calor produce una corriente eléctrica en el circuito («termoelectricidad»); pero Seebeck interpretó erróneamente su propio trabajo y el descubrimiento no tuvo consecuencias provechosas.

Sin embargo, con la llegada del semiconductor y sus técnicas, renació el antiguo «efecto Seebeck». Los aparatos termoeléctricos requieren semiconductores. Calentando el extremo de un semiconductor se crea un potencial eléctrico en la materia; cuando el semiconductor es del tipo *p*, el extremo frío se hace negativo; y si es del tipo *n*, positivo. Ahora bien, incorporando una estructura en forma de U a ambos tipos de semiconductores, con la juntura *n-p* bajo el fondo de la U, este fondo caldeado ocasionará que el extremo superior de la rama *p* gane una carga negativa y el extremo superior de la rama *n*, una positiva. De este modo, la corriente fluirá desde un extremo hasta el otro, y seguirá haciéndolo mientras se mantenga la diferencia de temperaturas. (E, inversamente, el uso de una corriente puede causar un descenso de temperatura, de modo que el aparato termoeléctrico tiene también aplicación como refrigerador.)

La célula termoeléctrica no requiere generadores costosos ni macizas máquinas de vapor, es portátil y se la puede instalar en zonas aisladas como suministradora en pequeña escala de electricidad. Todo cuanto necesita como fuente energética es un calentador de queroseno. Según se informa, la Unión Soviética emplea usualmente tales artificios en las zonas rurales.



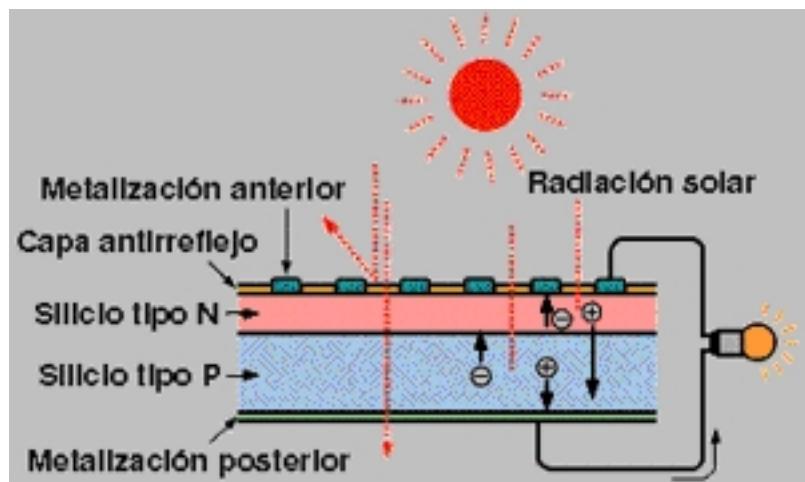
*La célula termoeléctrica. El conductor calorífico origina el flujo de electrones hacia el extremo frío del conductor tipo n, y desde la región fría a la caliente del tipo p. Si forma un circuito, la corriente fluye en la dirección que marcan las flechas. Así se convierte el calor en energía eléctrica.*

No obstante, los posibles perfeccionamientos de los métodos para usar combustible y la probabilidad de nuevos hallazgos carboníferos y petrolíferos, estas fuentes de energía son definitivamente limitadas. Llegará un día, tal vez no muy lejano, en que ni el carbón ni el petróleo sirvan como fuentes importantes y pletóricas de energía. Sin embargo, el hombre seguirá necesitando energía e incluso mayores cantidades que las requeridas hasta ahora. ¿Cómo proceder entonces?

Una posibilidad es hacer creciente uso de las fuentes cuya energía sea renovable: aprovechar la energía terrestre viviendo de las rentas, no del capital. La madera podría ser ese recurso si se dejara crecer el bosque y se recogiera la cosecha, aunque el bosque por sí solo no bastará ni mucho menos para satisfacer todas nuestras necesidades de energía. También podríamos dar mayor aplicación al poder del viento y el agua, si bien estos elementos tampoco podrán ser nunca algo más que fuentes subsidiarias de energía. Lo mismo cabe decir de otras fuentes potenciales de energía en la tierra tales como la búsqueda de calor interno (por ejemplo, fuentes termales) o el aprovechamiento de las mareas oceánicas.

Mucho más trascendental a largo plazo es la posibilidad de encauzar directamente parte de la vasta energía vertida sobre la Tierra por el Sol. Esta «insolación»

produce energía a un ritmo 50.000 veces mayor que toda la energía consumida en nuestro planeta. A este respecto, la «batería solar» es un artificio particularmente prometedor, pues hace uso también de semiconductores.



*Célula de una batería solar. Los rayos solares inciden sobre la termo-oblea y liberan los electrones, formando así pares de vacíos-electrones. La divisoria p-n actúa como una barrera, o campo eléctrico, separando los electrones de los vacíos. Por tanto se desarrolla una diferencia de potencial a través de la divisoria, y entonces fluye la corriente por el circuito alámbrico.*

Según la han diseñado los «Bell Telephone Laboratories» en 1954, es un «emparedado» plano de semiconductores tipo *n* y tipo *p*. La luz solar cayendo sobre la placa desaloja de su lugar a algunos electrones. La transferencia se conecta, como lo haría una batería ordinaria, con un circuito eléctrico. Los electrones liberados se mueven hacia el polo positivo y los vacíos marchan hacia el polo negativo, constituyéndose así una corriente. La batería solar puede desarrollar potenciales eléctricos de medio voltio y hasta 9 W de fuerza por cada centímetro cuadrado expuesto al sol. Esto no es mucho, pero lo más espléndido de la batería solar es que no tiene líquidos, ni productos químicos corrosivos ni partes móviles..., se limita a generar electricidad indefinidamente mientras le dé el sol.

El satélite artificial *Vanguard I*, lanzado por los Estados Unidos el 17 de marzo de 1958, fue el primero equipado con una batería solar para emitir sus señales radioeléctricas. Estas señales se siguen oyendo todavía al cabo de tanto tiempo, y seguirán dejándose oír durante muchos años.

La cantidad de energía que cae sobre un área de terreno en cualquier lugar soleado de la Tierra es de 9,4 millones de kilovatios-hora por año. Si algunas zonas especialmente favorecidas bajo ese aspecto, es decir, regiones desérticas como el Valle de la Muerte y el Sahara, estuviesen cubiertas con baterías solares y acumuladores eléctricos, podrían proveer al mundo con la electricidad necesaria por tiempo indefinido..., concretamente tanto como viva la raza humana, si no se suicida antes.

Pero, según parece, ni la presente generación ni la siguiente siquiera harán factible el encauzamiento de la energía solar. Por fortuna, tenemos una inmensa fuente de energía aquí, en la Tierra, que puede proveernos durante centenares de años cuando nos quedemos sin el económico carbón y el petróleo. Es la energía almacenada en el núcleo atómico.

Usualmente se denomina «energía atómica» a la energía nuclear, pero eso es un craso yerro. Hablando estrictamente, la energía es aquélla liberada por reacciones químicas tales como la combustión de carbón y petróleo, porque éstas representan el comportamiento del átomo en su conjunto. La energía generada por los cambios dentro del núcleo es de especie totalmente distinta y de magnitud mucho más vasta.

Apenas descubierto el neutrón por Chadwick en 1932 los físicos comprendieron que ahí se les ofrecía una maravillosa clave para desentrañar el núcleo atómico. Puesto que el neutrón no tenía carga eléctrica, podría penetrar fácilmente en el núcleo cargado. Los físicos empezaron inmediatamente a bombardear diversos núcleos con neutrones para observar las posibles reacciones nucleares resultantes; entre los más apasionados investigadores de esa nueva herramienta figuró el italiano Enrico Fermi.

Fermi y sus colaboradores descubrieron que se obtenían mejores resultados cuando se frenaba a los neutrones haciéndoles pasar primero por agua o parafina. Proyectando protones contra el agua o la parafina, los neutrones moderan su marcha tal como lo haría una bola de billar al recibir los golpes de otras. Cuando un neutrón se traslada a la velocidad «termal» (velocidad normal en el movimiento de los átomos), tiene mayores probabilidades de ser absorbido por el núcleo, porque permanece más tiempo en la vecindad de éste. Hay otra forma de enfocarlo si se

considera que la longitud de onda asociada al neutrón es mayor, porque la longitud de onda es inversamente proporcional al momento de la partícula. Cuando el neutrón reduce la marcha, su longitud de onda aumenta. Para emplear una metáfora, el neutrón se hace más perezoso y adquiere más volumen. Por consiguiente, golpea el núcleo con mayor facilidad, tal como una bola de bolera tiene más probabilidades de hacer un derribo total que una pelota de golf.

Esa probabilidad assignable a ciertas especies de núcleos para la captura de un neutrón se denomina su «sección transversal». Este término define metafóricamente el núcleo cual un blanco de tamaño concreto. Es más fácil lanzar una pelota de béisbol contra la pared de una granja que hacer puntería en una tabla de 30 cm a la misma distancia. Las secciones transversales del núcleo bajo el bombardeo de neutrones se calculan en mil millonésimas partes de millón de un centímetro cuadrado ( $10^{-24}$  de  $\text{cm}^2$ ). En 1942 los físicos americanos M. G. Holloway y C. P. Baker llamaron *barn* a esa unidad.

Cuando un núcleo absorbe un neutrón, su número atómico permanece invariable (porque la carga del núcleo sigue siendo la misma), pero su número másico asciende una unidad. El hidrógeno 1 se hace hidrógeno 2, el oxígeno 17 se hace oxígeno 18, y así sucesivamente. La energía que recibe el núcleo del neutrón cuando éste penetra en su masa, puede «excitar» al núcleo, es decir, acrecentar su contenido de energía. Entonces se emite esa energía adicional en forma de rayos gamma.

El nuevo núcleo es a menudo inestable. Por ejemplo, cuando el aluminio 27 capta un neutrón y se hace aluminio 28, uno de los neutrones en el nuevo núcleo pasa a ser rápidamente un protón (emitiendo un electrón). Este aumento en la carga positiva del núcleo ocasiona una transformación: el aluminio (número atómico 13) se hace silicio (número atómico 14).

Como el bombardeo de neutrones parecía un excelente recurso para transformar un elemento en el siguiente de la escala, Fermi decidió bombardear el uranio para ver si podía crear un elemento artificial: el número 93. Analizando los productos tras el bombardeo del uranio, él y sus colaboradores encontraron indicios de nuevas sustancias radiactivas. Creyeron tener ya el elemento 93, y lo llamaron «uranio X».

Pero, ¿cómo identificar positivamente el nuevo elemento? ¿Cuáles deberían ser sus propiedades químicas?

Pues bien, se pensó- el elemento 93 debería estar bajo el renio en la tabla periódica y, por tanto, sería similar químicamente el renio. (En realidad, y aunque nadie lo comprendiera por aquellas fechas, el elemento 93 pertenecía a una nueva y rara serie, lo cual significaba que se asemejaría al uranio, no al renio [véase capítulo V]; así, pues, se partió con el pie izquierdo en la búsqueda de su identificación.) Si fuera como el renio, tal vez se pudiera identificar la ínfima cantidad creada de «elemento 93» mezclando los productos del bombardeo de neutrones con renio y separando después el renio mediante procedimientos químicos. El renio actuaría como un «vehículo», transportando consigo el «elemento 93», químicamente similar. Si el renio demostrara poseer radiactividad, ello traicionaría la presencia del elemento 93.

El físico alemán Otto Hahn y la científica austriaca Lise Meitner, trabajando juntos en Berlín, siguieron esa línea de experimentación. El elemento 93 no se mostró con el renio. Entonces Hahn y Meitner se preguntaron si el bombardeo de neutrones no habría transformado el uranio en otros elementos cercanos a él en la tabla periódica, y se propusieron averiguarlo. Por aquellas fechas, 1938- Alemania ocupó Austria, y Fräulein Meitner, que como súbdita austriaca, se había sentido segura hasta entonces a pesar de ser judía, se vio obligada a huir de la Alemania hitleriana y buscar refugio en Estocolmo. Hahn prosiguió su trabajo con el físico alemán Fritz Strassman.

Varios meses después, Hahn y Strassman descubrieron que el bario adquiría cierta radiactividad cuando se le agregaba el uranio bombardeado. Ambos supusieron que esa radiactividad debería pertenecer al radio, el elemento situado inmediatamente debajo del bario en la tabla periódica. La conclusión fue que el bombardeo del uranio con neutrones cambiaba una parte de aquél en radio.

Pero este radio resultó ser una materia muy peculiar. Pese a sus impropios esfuerzos, Hahn no pudo separarlo del bario. Mientras tanto, en Francia, Irène Joliot-Curie y su colaborador P. Savitch emprendieron una tarea similar y fracasaron igualmente.

Entonces Meitner, la refugiada en Escandinavia, abordó audazmente el enigma y divulgó una conjetura que Hahn había expresado en sus círculos íntimos aunque sin atreverse a darle publicidad. En una carta abierta publicada por la revista británica *Nature* en enero de 1939, la doctora manifestó que si no se podía separar el bario del radio era porque allí no había ningún radio. El presunto radio sólo tenía un nombre: bario radiactivo. Fue bario lo que se había formado mediante el bombardeo del uranio con neutrones. Ese bario radiactivo decaía emitiendo una partícula beta y formando lantano. (Hahn y Strassman habían averiguado que si se agregaba a los resultados el lantano ordinario, éste mostraba cierta radiactividad que ellos asignaban al actinio; realmente se trataba de lantano radiactivo.)

Pero, ¿cómo se podía formar el bario del uranio? El bario era solamente un átomo de peso medio. Ningún proceso conocido de decadencia radiactiva podía transformar un elemento pesado en otro cuyo peso fuera sólo la mitad. Meitner tuvo la audacia de afirmar que el núcleo de uranio se había dividido en dos. La absorción de un neutrón había ocasionado lo que ella denominaba «fisión». Según ella, los dos elementos resultantes de esa división eran el bario y el elemento 43 situado a continuación del renio en la tabla periódica. Un núcleo del bario y otro del elemento 43 (llamado más tarde tecnecio) deberían formar juntos un núcleo de uranio. Esta sugerencia revistió singular audacia por la siguiente razón: se dijo que el bombardeo con neutrones consumiría solamente seis millones de electronvoltos cuando la idea generalizada por aquellas fechas respecto a la energía nuclear hacía suponer que ello requeriría centenares de millones.

El sobrino de Meitner, Otto Robert Frisch, partió presurosamente hacia Dinamarca para exponer la nueva teoría a Bohr antes de su publicación. Bohr hubo de reconocer que por ese medio resultaría sorprendentemente fácil dividir el núcleo, pero, por fortuna, él estaba elaborando entonces el modelo de gota líquida sobre la estructura nuclear, y le pareció que aquello serviría para elucidarlo. (Pocos años después, la teoría de la gota líquida, en la que se tenía presente el tema de las envolturas nucleares- explicaría la fisión nuclear hasta sus más recónditos detalles así como la causa que el núcleo se dividiera en dos mitades desiguales.)

Sea como fuere, con teoría o sin ella, Bohr captó instantáneamente el posible corolario. Cuando le dieron aquella noticia estaba preparando las maletas para

asistir a una conferencia de física teórica en Washington. Allí hizo saber a los físicos lo que se le había sugerido en Dinamarca sobre la fisión nuclear. Aquello causó una gran commoción. Los congresistas regresaron inmediatamente a sus laboratorios para comprobar la hipótesis y, al cabo de un mes, se anunciaron media docena de confirmaciones experimentales. Como resultado de aquello se otorgó a Hahn el premio Nobel de Química en 1944, y así se inició el trabajo que culminó con el arma destructiva más terrible que jamás se ideara.

### **La Bomba Atómica**

La reacción por fisión liberó cantidades desusadas de energía, superando largamente a la radiactividad ordinaria. Pero no fue sólo esa energía adicional lo que hizo de la fisión un fenómeno tan portentoso. Aún revistió más importancia el hecho que liberara dos o tres neutrones. Dos meses después de la carta abierta publicada por Meitner, numerosos físicos pensaron en la estremecedora posibilidad de una «reacción nuclear en cadena».

La expresión «reacción en cadena» ha adquirido un significado exótico aún cuando, realmente, es un fenómeno muy común. El quemar un simple trozo de papel es una reacción en cadena. Una cerilla proporciona el calor requerido para desencadenar la acción; una vez iniciada la combustión, ésta proporciona el verdadero agente, calor-imprescindible para mantener y extender la llama. La combustión suscita más combustión en proporciones siempre crecientes.

Eso es exactamente lo que sucede con la reacción nuclear en cadena. Un neutrón desintegra un átomo de uranio; éste libera dos neutrones que pueden ocasionar dos nuevas fisiones de las cuales se desprenderán cuatro neutrones que ocasionarán a su vez cuatro fisiones, y así sucesivamente. El primer átomo desintegrado suministra una energía de 200 MeV, el siguiente, 400 MeV, el otro 800 MeV, el siguiente 1.600 MeV, etc. Puesto que los intervalos entre las fases consecutivas equivalen aproximadamente a una mil billonésima de segundo se desprenden cantidades aterradoras de energía. La fisión de una onza de uranio produce tanta energía como la combustión de 90 t de carbón o 7.500 l de petróleo. Si se empleara con fines pacíficos, la fisión del uranio podría solventar todas nuestras

preocupaciones inmediatas sobre esos combustibles fósiles evanescentes y ese creciente consumo de energía.

Pero, infortunadamente, el descubrimiento de la fisión hizo su aparición poco antes que el mundo se sumiera en una guerra universal. Según calcularon los físicos, la desintegración de una onza de uranio rendiría tanta potencia explosiva como 600 t de TNT. Fue realmente horrible imaginar las consecuencias de una guerra librada con tales armas, pero aún fue más horripilante concebir un mundo donde la Alemania nazi monopolizara esos explosivos antes que los aliados.

El físico estadounidense de origen húngaro Leo Szilard, que había estado cavilando durante largos años sobre las reacciones nucleares en cadena, vislumbró claramente el inmediato futuro. Él y otros dos físicos húngaro-americanos, Eugene Wigner y Edward Teller, se entrevistaron con el afable y pacífico Einstein en el verano de 1939 y le hicieron escribir una carta al presidente Franklin Delano Roosevelt en la que se revelaba la potencialidad de la fisión del uranio y se recomendaba el desarrollo de tal arma con todos los medios posibles para adelantarse a los nazis.

Se redactó esa misiva el 2 de agosto de 1939, y su entrega al presidente se efectuó el 1 de octubre de 1939. Entre ambas fechas estalló la Segunda Guerra Mundial en Europa. Los físicos de la Universidad de Columbia, bajo la supervisión de Fermi, quien había partido de Italia hacia América el año anterior, trabajaron afanosamente para producir la fisión constante del uranio en grandes cantidades.

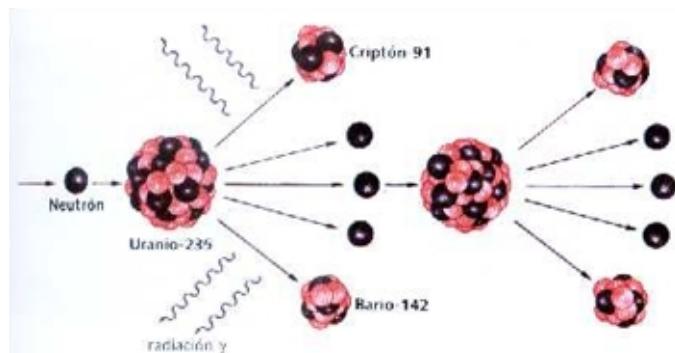
Inducido por la carta de Einstein, el Gobierno estadounidense intervino a su debido tiempo. El 6 de diciembre de 1941, el presidente Roosevelt autorizó (arriesgándose a un inmenso fracaso político en caso de malogro) la organización de un gigantesco proyecto, titulado con deliberada circunspección «Manhattan Engineer District», para construir una bomba atómica. Al día siguiente, los japoneses atacaron Pearl Harbor y los Estados Unidos entraron en la guerra.

Como era de esperar, la práctica no respondió fiel ni fácilmente a la teoría. Se requirieron no pocos experimentos para provocar la reacción en cadena del uranio. Primeramente fue preciso poseer una cantidad sustancial de uranio refinado hasta un grado de extrema pureza para no desperdiciar neutrones con la absorción ejercida por las impurezas. El uranio es un elemento bastante común sobre la

corteza terrestre; se le encuentra en la proporción de 2 g por cada tonelada de roca; así, pues, es cuatrocientas veces más común que el oro. Pero su dispersión es también considerable, y hay muy pocos lugares del mundo donde aparezca formando ricas venas o siquiera una concentración aceptable. Por añadidura, el uranio era una materia casi inservible antes de 1939 Y, por tanto, no se había ideado ningún método para purificarlo. En los Estados Unidos se había producido hasta entonces una onza de uranio a lo sumo.

Los laboratorios del «Iowa State College», bajo la dirección de Spedding..., abordaron el problema de la purificación mediante el intercambio de iones resinosos (véase capítulo V). Y en 1942 comenzó la producción de uranio razonablemente puro.

Ahora bien, eso fue tan sólo un primer paso. Llegados a ese punto fue preciso desmenuzar el uranio para separar sus fracciones más fisionables. El isótopo uranio 238 (U-238) tenía un número par de protones (92) y un número par de neutrones (146). Los núcleos con números pares de nucleones son más estables que los de números impares. El otro isótopo en el uranio natural, uranio 235- tenía un número impar de neutrones (143), y por consiguiente, según había predicho Bohr, sería más fisionable que el uranio 238.



*Reacción nuclear en cadena del uranio. Los círculos rosado-negros son núcleos de uranio; los puntos negros, neutrones; las flechas onduladas, rayos gamma; los pequeños rosados-negros, fragmentos de la fisión.*

En 1940, un equipo investigador bajo la supervisión del físico norteamericano John Ray Dunning, consiguió aislar una pequeña cantidad de uranio 235 y demostró que la conjectura de Bohr era cierta. El U-238 se desintegra solamente cuando lo golpean

neutrones rápidos de una energía determinada, pero el U-235 se somete a la fisión cuando absorbe neutrones de cualquier energía, hasta los simples neutrones termales.

El problema fue que en el uranio natural purificado sólo un átomo de cada 140 era U-235; los restantes pertenecían al U-238. Ello significaba que casi todos los neutrones liberados tras la fisión del U-235 serían captados por los átomos U-238 sin producir fisión alguna. Aún cuando se bombardease el uranio con neutrones suficientemente rápidos para desintegrar el U-238, los neutrones liberados por este U-238 no tendrían bastante energía para desatar una reacción en cadena entre los átomos remanentes de este isótopo más común. En otras palabras, la presencia del U-238 atenuaría y neutralizaría la reacción en cadena. Sería algo así como intentar quemar hojas húmedas.

Por entonces no hubo solución, salvo la de probar una disociación a gran escala entre el U-235 y el U-238, o al menos eliminar suficiente cantidad de U-238 para enriquecer sustancialmente el contenido de U-235 en la mezcla. Los físicos abordaron el problema con diversos procedimientos pero todos ellos ofrecieron escasas perspectivas de éxito. El único que pareció algo prometedor fue la «difusión gaseosa». Éste fue el método preferido, aunque enormemente costoso, hasta 1960. Entonces un científico alemán occidental ideó una técnica mucho más económica: si se aislara el U-235 mediante centrifugación, las moléculas más pesadas saldrían proyectadas hacia el exterior, y las más ligeras, conteniendo U-235, se rezagarían. Sin embargo, tal proceso abarataría la fabricación de bombas nucleares hasta un punto en que las potencias menores podrían emprenderla, lo cual no era deseable.

El átomo del uranio 235 es un 1,3 % menos masivo que el del uranio 238. Consecuentemente, si los átomos adquiriesen la forma gaseosa, los del U-235 se moverían con más rapidez que los del U-238. Por tanto, y en virtud de su mayor difusión, se los podría separar mediante una serie de barreras filtradoras. Pero primero sería preciso convertir el uranio en gas. El único medio de darle esa forma era combinarlo con flúor para hacer sexafluoruro de uranio, líquido volátil compuesto por un átomo de uranio y seis átomos de flúor. En esta combinación, la molécula conteniendo U-235 sería un 1 % escaso más ligera que la del U-238; pero esta diferencia pareció ser suficiente para demostrar la eficacia del método.

Se hizo pasar bajo presión por barreras de protones al hexafluoruro de uranio. En cada barrera, las moléculas conteniendo U-235 pasaron algo más aprisa por término medio, y esa ventaja a favor del U-235 se acrecentó con los pasos consecutivos. Se requirieron miles de barreras para obtener cantidades apreciables de hexafluoruro casi puro de uranio 235; ahora bien, las concentraciones enriquecidas con U-235 exigieron muchas menos barreras.

En 1942 hubo razones suficientemente fundadas para suponer que el método de la difusión gaseosa (y uno o dos más) podría producir bastante cantidad de «uranio enriquecido». Entonces se construyeron plantas de separación (cada una costó mil millones de dólares y consumió tanta electricidad como la ciudad de Nueva York) en la ciudad secreta de Oak Ridge, Tennessee, lugar denominado inicialmente «Dogpatch» por los irreverentes científicos, recordando la ciudad mítica de Al Capp, Li'l Abner.

Entretanto, los físicos calculaban el «tamaño crítico» requerido para mantener la reacción en cadena con un trozo de uranio enriquecido. Si el trozo era pequeño, escaparían demasiados neutrones de su superficie sin dar tiempo a que los absorbieran los átomos U-235. Si se quería reducir esas fugas, el volumen del trozo debería ser considerable en proporción con su superficie. Una vez alcanzado el «tamaño crítico», los neutrones interceptarían suficientes átomos U-235 para dar continuidad a la reacción en cadena.

Los físicos encontraron también el medio de emplear eficazmente los neutrones disponibles. Como ya he mencionado, los neutrones «termales» (es decir, lentos) se someten con más presteza a la absorción por el uranio 235 que los rápidos. Así, pues, los experimentadores utilizaron un «moderador» para frenar a los neutrones, cuyas velocidades eran relativamente elevadas cuando emergían de la reacción por fisión. El agua ordinaria hubiera sido un excelente agente retardativo, pero desgraciadamente los núcleos del hidrógeno ordinario apresaban con gran voracidad los neutrones. El deuterio (hidrógeno 2) cumplía mucho mejor esa misión; prácticamente no mostraba ninguna tendencia a absorber neutrones. Por consiguiente... los experimentadores de la fisión procuraron crear suficientes reservas de agua pesada.

Hasta 1943, recurrieron casi siempre a la electrólisis: el agua ordinaria se dividía en oxígeno e hidrógeno mucho más fácilmente que el agua pesada y, por tanto, si se electrolizaban grandes cantidades de agua, el residuo final era rico en agua pesada y, además, se conservaba bien. Sin embargo, desde 1945 se prefirió el método de la destilación fraccionada: el agua ordinaria alcanzaba el punto ínfimo de ebullición, y entonces el residuo de agua no hervida era rico en agua pesada.

Sin duda, el agua pesada fue muy valiosa a principios de la década de 1940. Hay una historia emocionante sobre las andanzas de Joliot-Curie para llevarse consigo las reservas de ese líquido en Francia anticipándose a la invasión nazi el año 1940. Los alemanes nazis apresaron solamente un millar de litros que habían sido preparados en Noruega. Pero un comando británico de asalto los destruyó el año 1942.

No obstante, el agua pesada tuvo sus altibajos; solía hervir cuando la reacción en cadena producía demasiado calor, y entonces corroía el uranio. Los científicos, cuya misión era crear un sistema de reacción en cadena para el proyecto *Manhattan*, decidieron emplear carbono en la forma más pura del grafito como moderador.

Otro moderador posible fue el berilio, aunque su toxicidad representaba una gran desventaja. Por cierto, se descubrió esa enfermedad, la berilirosis, hacia principios de 1940 en uno de los físicos que trabajaban con la bomba atómica.

Imaginemos ahora una reacción en cadena. Comenzamos por proyectar un chorro de neutrones contra el conjunto de moderador y uranio enriquecido. Cierto número de átomos de uranio 235 sufren la fisión, liberando neutrones que golpean a otros átomos de uranio 235. Éstos se desintegran a su vez y desprenden más neutrones. Algunos neutrones serán absorbidos por átomos ajenos al uranio 235; otros escaparán simplemente de la pila atómica. Pero si un neutrón de cada fisión, basta exactamente con uno- consigue producir otra fisión, entonces se mantendrá la reacción en cadena. Si el «factor multiplicador» es superior a 1, aunque sólo sea por una fracción mínima (por ejemplo, 1,001), la reacción en cadena progresará hasta provocar la explosión. Esto era beneficioso para fines bélicos, pero no para fines experimentales. Se hizo necesario idear algún dispositivo que controlara el promedio de fisiones. Ello sería posible introduciendo barras de ciertas sustancias como el cadmio, que tiene una amplia sección transversal, para la captura de

neutrones. Ahora bien, la reacción en cadena se desarrollaba tan rápidamente que no habría habido tiempo para introducir las barras moderadoras de cadmio si no hubiese sido por la afortunada circunstancia que los átomos de uranio 235 no emitían instantáneamente todos sus neutrones al desintegrarse. Un neutrón de cada ciento cincuenta, más o menos, es un «neutrón rezagado» que se emite pocos minutos después de la fisión pues este neutrón no emerge directamente de los átomos desintegrados sino de otros más pequeños formados con la fisión. Cuando el factor multiplicador sobrepasa ligeramente la unidad, este retraso es suficiente para aplicar los controles.

En 1941 se realizaron experimentos con mezclas de uranio-grafito, y la información acumulada bastó para orientar a los físicos, quienes acordaron que era posible desatar una reacción en cadena, incluso sin uranio enriquecido, si se empleaba un trozo de uranio suficientemente voluminoso.

Los físicos empezaron a construir en la Universidad de Chicago un reactor de tamaño crítico para tratar el uranio. Por aquellas fechas tenían ya a su disposición 6 t de uranio puro; y se les había añadido como complemento óxido de uranio. Entonces se colocaron capas alternas de uranio y grafito, una sobre otra hasta un total de cincuenta y siete y con un orificio a través de ellas para insertar las barras moderadoras de cadmio. Se llamó «pila» a esa estructura, designación anodina y convencional que no traicionaba su función. (Durante la Primera Guerra Mundial se denominó «tanques» a los nuevos vehículos acorazados con el mismo propósito de enmascaramiento. La palabra «tanque» subsistió, pero, afortunadamente, la expresión «pila atómica» ha dado paso a otra más descriptiva: «reactor nuclear».)

La pila de Chicago, construida bajo el estadio de rugby, medía 9 m de anchura, 9,6 m de longitud y 6,5 m de altura. Pesaba 1.400 t y contenía 52 t de uranio en forma de metal y óxido. El 2 de diciembre de 1942 se trajeron lentamente las barras moderadoras de cadmio. A las 3:45 horas, el factor multiplicador alcanzó la cifra uno: la reacción por fisión empezó a funcionar de manera autónoma. Justamente cuando ocurría eso, el género humano entró, sin saberlo- en la «Era atómica».

El físico a cargo de aquella operación fue Enrico Fermi. Inmediatamente se despachó a Washington un telegrama anunciando el éxito con estas palabras: «El navegante italiano ha penetrado en el nuevo mundo.» La Office of Scientific

Research and Development telegrafió de vuelta: « ¿Cómo se portaron los nativos?» Y la respuesta le llegó en seguida: «Se mostraron muy amistosos.» Es curioso que el primer navegante italiano descubriera un mundo nuevo en 1492, y el segundo descubriera otro en 1942; aquellos que se interesan por los trastrueques místicos de los números, atribuyen gran importancia a esa coincidencia.

Mientras tanto había aparecido otro combustible fisionable. El uranio 238 forma, al absorber un neutrón termal, el uranio 239, que se desintegra rápidamente para constituir el neptuno 239, el cual se desintegra a su vez con casi idéntica rapidez y forma el plutonio 239.

Ahora bien, el núcleo del plutonio 239 tiene un número impar de neutrones (145) y es más complejo que el uranio 235; por tanto debería ser altamente inestable. Parecía razonable suponer que el plutonio, tal como el uranio 235, se sometería a la fisión con neutrones termales. En 1941 se confirmó así por vía experimental.

No sabiendo todavía a ciencia cierta si la preparación del uranio 235 sería práctica, los físicos decidieron arriesgarse a fabricar plutonio en grandes cantidades.

Se construyeron reactores especiales en Oak Ridge y Hanford, Estado de Washington, el año 1943 con la finalidad de producir plutonio. Aquellos reactores representaron un gran avance comparados con la primera pila de Chicago. Por una parte los nuevos reactores estaban diseñados de tal forma que se podía extraer el uranio periódicamente de la pila, se separaba el plutonio del uranio mediante procedimientos químicos y se podían aprovechar los productos de la fisión, entre los cuales había algunos absorbentes muy poderosos de neutrones. Por añadidura, los nuevos reactores tenían refrigeración de agua para evitar el calentamiento excesivo. (La pila de Chicago sólo podía funcionar durante breves períodos porque se la enfriaba meramente con aire.)

En 1945 se tuvo ya suficiente uranio 235 y plutonio 239 purificado para construir bombas. Esta parte del programa se emprendió en una tercera ciudad secreta, Los Álamos, Nuevo México, bajo la supervisión del físico norteamericano, J. Robert Oppenheimer.

Para los propósitos bélicos era conveniente que la reacción nuclear en cadena se desarrollara con la mayor rapidez posible. Ello requeriría la intervención de neutrones rápidos que acortasen los intervalos entre fisiones.

Así, pues, se omitió el moderador. Asimismo se encerró la bomba en una envoltura masiva para mantener la integridad del uranio el mayor tiempo posible, a fin que se fisionara una gran proporción.

Puesto que una masa crítica de materia fisionable explotaría espontáneamente (salpicada por los neutrones erráticos del aire), se dividió el combustible de la bomba en dos o más secciones. El mecanismo detonador estuvo constituido por un explosivo ordinario (¿TNT?) que agrupaba esas secciones cuando debiera explotar la bomba. Un dispositivo llamado «el hombre flaco» consistía en un tubo con dos porciones de uranio en sus dos extremos. Otro, el «hombre gordo», fue una esfera donde una granada compuesta de materia fisionable se incrustaba por «implosión» en el núcleo central formando una densa masa crítica que mantenía momentáneamente su integridad gracias a la fuerza de la implosión y a una funda maciza llamada el «pisón». El pisón sirvió también para reflejar los neutrones hacia la masa fisionable, y reducir, por tanto, el tamaño crítico.

Fue imposible ensayar tal artefacto a escala menor. Si la bomba no sobrepasaba el tamaño crítico, todo sería inútil. Consecuentemente, la primera prueba consistió en hacer explotar una bomba de fisión a gran escala, denominada «bomba atómica» o «bomba A». El 16 de julio de 1945, a las 5.30 horas, estalló una bomba en Alamogordo, Nuevo México, con efectos verdaderamente horripilantes; tuvo la fuerza explosiva de 20.000 t de TNT. Cuando se interrogó más tarde al físico I. I. Rabi, testigo visual del ensayo, éste respondió con tono lúgubre, según se ha dicho: «No puedo explicárselo..., pero no espere morir de causas naturales.» (Es justo agregar aquí que el caballero a quien dio Rabi tal contestación, falleció de muerte natural algunos años después.)

Se prepararon otras dos bombas de fisión. La primera, una bomba de uranio llamada *Little Boy* con 3 m de longitud, 0,60 m de anchura y peso de 4,5 Tm, se dejó caer sobre Hiroshima, el 6 de agosto de 1945; se la hizo detonar mediante el eco radar. Pocos días después, la segunda, una bomba de plutonio, 3,3 m y 1,5 de longitud y anchura respectivamente, peso de 5 t llamada *Fat Man* se dejó caer sobre Nagasaki. Las dos bombas juntas tuvieron una fuerza explosiva de 35.000 t de TNT. Con el bombardeo de Hiroshima, la Era atómica, iniciada ya casi tres años antes, irrumpió en la conciencia del mundo.

Cuatro años después de aquello, los norteamericanos vivieron bajo la impresión engañosa que existía un secreto denominado «bomba atómica» y que lo podrían mantener oculto para siempre a otras naciones, si se adoptaban rigurosas medidas de seguridad. A decir verdad, los hechos y las teorías de la fisión habían sido temas del dominio público desde 1939, y la Unión Soviética había emprendido seriamente la investigación del asunto en 1940; si la Segunda Guerra Mundial no hubiera demandado sus modestos recursos en una medida tan superior a la que demandara los inmensos recursos de unos Estados Unidos libres de toda invasión, la URSS podría haber tenido una bomba atómica en 1945, tal como Estados Unidos. De cualquier forma la Unión Soviética hizo explotar su primera bomba atómica el 22 de septiembre de 1949, ante el desaliento y la incomprensible estupefacción de casi todos los norteamericanos. Aquel artefacto sextuplicó el poder de la bomba lanzada sobre Hiroshima y tuvo un efecto explosivo equivalente a 210.000 t de TNT.

El 3 de octubre de 1952, Gran Bretaña se constituyó en tercera potencia atómica, haciendo explotar su propia bomba de ensayo; el 13 de febrero de 1960. Francia se unió al «club atómico» como cuarto miembro de pleno derecho, pues hizo estallar una bomba de plutonio en el Sahara, y el 16 de octubre de 1964, la República Popular de China (China comunista) anunció la explosión de una bomba atómica que la convirtió en quinto miembro.

Además la bomba adquirió más diversidad. En 1953, los Estados Unidos dispararon por primera vez una bomba de fisión con un cañón, en lugar de lanzarla desde el aire. Así se inició el desarrollo de la «artillería atómica» (o «arma atómica táctica»). Entretanto, la bomba de fisión quedó reducida a una mera bagatela. El hombre había conseguido desencadenar otra reacción nuclear energética que hacía posible la superbomba.

En la fisión del uranio sólo se transforma en energía un 0,1 % de la masa del átomo uranio. Pero cuando se fusionan los átomos de hidrógeno para formar helio, un 0,5 completo de su masa se convierte en energía, como lo indicara por primera vez el químico estadounidense William Draper Harkins el año 1915. Bajo temperaturas de millones de grados, la energía de los protones es suficientemente alta para permitirles la fusión. Así se pueden unir dos protones y, después de emitir un positrón y un neutrino (proceso que transforma uno de los protones en neutrón),

formar un núcleo de deuterio. Entonces el núcleo de deuterio se funde con un protón para constituir un núcleo de tritio que se puede fundir todavía con otro protón para formar helio 4. O bien los núcleos de deuterio y tritio se combinan de diversas formas para formar helio 4.

Como tales reacciones nucleares tienen lugar solamente bajo el estímulo de muy elevadas temperaturas, se las conoce por el nombre de «reacciones termonucleares». Durante la década de los 30 se creía que el único lugar donde existían las temperaturas requeridas era el centro de las estrellas. En 1938, el físico de origen alemán Hans Albrecht Bethe (quien había abandonado la Alemania hitleriana para establecerse en los Estados Unidos el año 1935) manifestó que las reacciones de fusión originaban la energía irradiada por las estrellas. Aquella fue la primera explicación totalmente satisfactoria de la energía estelar desde que Helmholtz planteara la cuestión casi un siglo antes.

Pero entonces la fisión del uranio proporcionó las temperaturas necesarias en la Tierra. Su bomba podría servir como una cerilla suficientemente caliente para desatar una reacción en cadena y provocar la fusión del hidrógeno. Durante algún tiempo se dudó mucho sobre la posibilidad de hacer trabajar esa reacción en forma de bomba. Por lo pronto iba a ser preciso condensar el combustible hidrógeno hasta constituir una densa masa bajo la forma de mezcla entre deuterio y tritio, lo cual significaba que se le debería licuar y mantenerlo a temperaturas que sobrepasaran en muy pocos grados el cero absoluto. Dicho de otra forma, lo que se haría explotar sería un refrigerador masivo. Y suponiendo, por añadidura, que se pudiera construir una bomba de hidrógeno, ¿cuál sería realmente su finalidad? La bomba de fisión era ya bastante destructora para hacer desaparecer las ciudades; una bomba de hidrógeno sólo acrecentaría incommensurablemente la destrucción y barrería naciones enteras con todos sus habitantes.

No obstante, y pese a las desconsoladoras perspectivas, los Estados Unidos y la Unión Soviética se creyeron obligados a llevar adelante el proyecto. La Comisión de Energía Atómica estadounidense inició los preparativos: produjo combustible de tritio, colocó un artefacto «fisión-fusión» de 65 t en un atolón coralífero del Pacífico y, el 1 de noviembre de 1952 provocó la primera explosión termonuclear (una «bomba de hidrógeno» o «bomba H») sobre nuestro planeta. Se cumplieron todas

las ominosas predicciones: la explosión equivalió a 10 millones de toneladas de TNT (10 «megatones»), es decir, desarrolló una energía 500 veces mayor que la modesta bomba de Hiroshima con sus 20 «kilotones». La explosión destruyó el atolón.

Pero los rusos no se rezagaron mucho; el 12 de agosto de 1953 produjeron con éxito una explosión nuclear mediante un artificio suficientemente ligero para su transporte en avión. Estados Unidos no fabricó ese artefacto portátil hasta principios de 1954.

Entretanto se había concebido un esquema mucho más simple para generar una reacción termonuclear en cadena dentro de una bomba portátil. La clave de esta reacción fue el elemento litio. Cuando el isótopo del litio 6 absorbe un neutrón, se desintegra en núcleos de helio y tritio, liberando 4,8 MeV de energía en el proceso. Supongamos, pues, que se utiliza como combustible un compuesto de litio e hidrógeno (bajo la forma del isótopo pesado de deuterio). Este compuesto es sólido, no se requiere refrigeración para condensar el combustible. Un detonador de fisión proveería los neutrones necesarios para desintegrar el litio. Y el calor desarrollado por la explosión ocasionaría la fusión del deuterio existente en el compuesto y del tritio producido por la desintegración del litio. En otras palabras, se producirían varias reacciones productoras de energía: desintegración del litio, fusión del deuterio con deuterio y fusión del deuterio con tritio.

Ahora bien, además de liberar una energía formidable, esas reacciones producirían también un gran número de neutrones adicionales. Y entonces, los constructores de la bomba tuvieron esta ocurrencia: ¿Por qué no emplear esos neutrones para fisionar una masa de uranio? Se podría fisionar incluso el uranio ordinario 238 con neutrones rápidos (aunque no fuera tan expedito como el U-235). La violenta explosión de los neutrones rápidos provocada por las reacciones de fusión, podría fisionar un número muy considerable de átomos U-238. Supongamos que se construye una bomba con un núcleo de U-235 (el detonador) rodeado por una carga explosiva de litio-deuterio, y envolviendo ese conjunto una capa de uranio 238 que sirviera también como explosivo. Así resultaría una bomba realmente poderosa. La capa de U-238 podría ser casi tan gruesa como se quisiera, pues el uranio 238 no

tiene ningún tamaño crítico que provoque la reacción espontánea en cadena. Se suele llamar a ese resultado «bomba-U».

Por fin se construyó esa bomba; y se la hizo estallar en Bikini, una isla del archipiélago Marshall, el 1 de marzo de 1954; su eco retumbó por el mundo entero. La energía liberada fue de 15 megatones aproximadamente. Aún fue más dramática la lluvia de partículas radiactivas que cayó sobre veintitrés pescadores japoneses, tripulantes de un pesquero llamado *El dragón afortunado*. Su radiactividad destruyó el cargamento de pesca e hizo enfermar a aquellos pescadores de los cuales murió más tarde uno. En fin, no puede decirse que contribuyera a mejorar la salud del mundo.

Desde 1954, las bombas de fisión-fusión-fisión vienen siendo elementos integrantes del armamento general en los Estados Unidos, la Unión Soviética y Gran Bretaña. La Unión Soviética ha hecho explotar bombas de hidrógeno cuya potencia oscila entre los 50 y 100 megatones mientras los Estados Unidos se muestran perfectamente capaces de construir tales bombas, e incluso otras mayores, a corto plazo.

Asimismo se entrevé la posibilidad de diseñar una bomba de hidrógeno que libere un chorro altamente concentrado de neutrones sustituyendo al calor. Ello destruiría vidas sin causar grandes perjuicios a los inmuebles. Esta «bomba de neutrones» o «bomba-N» parece aconsejable para aquellos que estimen la propiedad y no asignen un gran precio a la vida.

## Energía Nuclear

El empleo dramático de la energía nuclear, representada por bombas increíblemente destructivas, ha hecho más que ningún otro acontecimiento desde los comienzos de la Ciencia para presentar al científico en el papel de ogro.

Esa representación gráfica es justificable hasta cierto punto, pues ningún argumento ni raciocinación puede alterar el hecho que fueron realmente los científicos quienes construyeron la bomba atómica conociendo desde el primer instante su enorme poder destructivo y su posible aplicación práctica.

Si se quiere hacer estricta justicia, es preciso añadir que obraron así bajo la presión de una gran guerra contra enemigos inexorables y ante la espantosa posibilidad que un ser tan maníaco como Adolf Hitler pudiera adelantarse y fabricar la bomba para

sus propios fines. Se debe agregar también que, por regla general, los científicos atareados con la construcción de tales bombas evidenciaron una profunda consternación y que muchos se opusieron a su empleo, mientras otros abandonaban más tarde el campo de la física nuclear, inducidos por lo que sólo cabe describir como remordimiento. Ciertamente se observaron menos remordimientos de conciencia entre los jefes políticos y militares a quienes cupo la decisión de emplear semejantes bombas.

Por otra parte, no podemos ni debemos descartar el hecho de que, cuando los científicos liberaron la energía contenida en el núcleo atómico, pusieron a disposición del hombre una fuerza que se puede emplear con fines constructivos tanto como destructivos. Es importante hacerlo constar así en un mundo y una época en los que la amenaza de una hecatombe nuclear hace adoptar a la Ciencia y los científicos una tímida actitud defensiva, especialmente en un país como los Estados Unidos con una tradición «rousseauniana» algo excesiva contra la enseñanza mediante el libro por considerársela corruptora de la integridad original del hombre en su estado natural.

Cabe decir incluso que la explosión de una bomba atómica no tiene por qué ser exclusivamente destructiva. A semejanza de los explosivos químicos menores usados desde antiguo en la minería o la construcción de diques y carreteras, los explosivos nucleares podrían representar una enorme aportación en los proyectos de ingeniería. Ya se han propuesto toda clase de fantásticos designios al respecto: dragado de bahías y canales, voladura de estratos rocosos subyacentes, almacenamiento de calor para producir energía e incluso propulsión a distancia de las naves espaciales. Sin embargo, en los años sesenta decreció el furioso entusiasmo que habían despertado esas esperanzas a largo plazo. La peligrosa probabilidad de contaminación radiactiva, de un gasto adicional inadecuado o ambas cosas a un tiempo, sirvieron de amortiguadores.

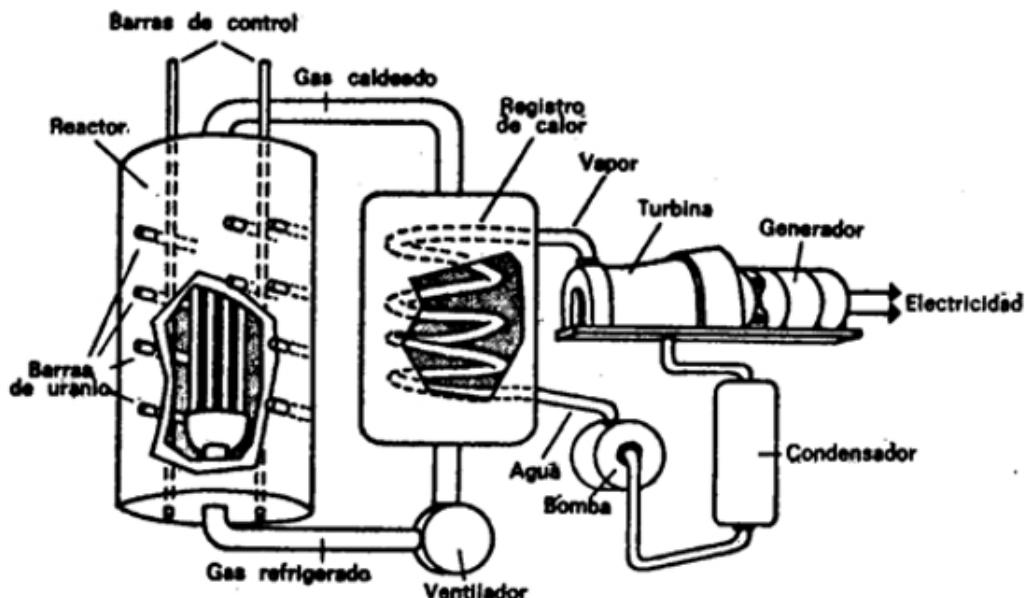
No obstante, la aplicación constructiva del poder nuclear quedó simbolizada por una especie de reacción en cadena que se instaló bajo el estadio de rugby en la Universidad de Chicago. Un reactor nuclear controlado puede generar inmensas cantidades de calor que, desde luego, se prestan al encauzamiento, mediante un

«refrigerante» tal como el agua o el metal fundido, para producir electricidad o caldear un edificio.

Pocos años después de la guerra se construyeron en Gran Bretaña y Estados Unidos reactores nucleares experimentales que produjeron electricidad. Hoy día, los Estados Unidos poseen una flota de submarinos movidos por energía nuclear, el primero de los cuales (el *Nautilus*, cuyo coste se elevó a 50 millones de dólares) fue botado en enero de 1954. Esta nave, tan importante hoy día como lo fuera la *Clermont* de Fulton en sus tiempos, posee motores con fuentes energéticas virtualmente inagotables que le permiten sumergirse durante períodos indefinidos, mientras que los submarinos ordinarios deben subir frecuentemente a la superficie para cargar sus baterías mediante generadores diesel, cuyo funcionamiento requiere aire. Por añadidura, esos submarinos alcanzan una velocidad máxima de ocho nudos, mientras el submarino nuclear se desplaza a veinte nudos o más.

El primer reactor del *Nautilus* duró para un recorrido de 100.500 km; ese itinerario incluyó una demostración espectacular. El *Nautilus* atravesó el océano Ártico en 1958 sinemerger ni una sola vez. Aquel viaje submarino demostró que la profundidad oceánica en el Polo Norte era de 4.023 m, es decir, mucho mayor de lo que se había pensado. Un segundo submarino nuclear bastante mayor, el *Triton*... circunnavegó el Globo en ochenta y cuatro días entre febrero y mayo de 1960 siguiendo la ruta magallánica.

La Unión Soviética posee también submarinos nucleares, y en diciembre de 1957 botó el primer barco de superficie movido por fuerza nuclear, el *Lenin*, un rompehielos. Poco antes los Estados Unidos habían puesto la quilla a su primer barco nuclear de superficie, y en julio de 1959 se botaron el *Long Beach* (un crucero) y el *Savannah* (un buque mercante). El *Long Beach* está provisto con dos reactores nucleares.



*Planta de energía nuclear del tipo «gas refrigerado» en forma esquemática. Aquí el calor del reactor se transfiere a un gas que puede ser un metal vaporizado circulando por él. Entonces se aprovecha el calor para transformar el agua en vapor.*

Apenas transcurridos diez años desde la botadura de los primeros barcos nucleares, los Estados Unidos tenían ya sesenta y un submarinos nucleares y cuatro buques nucleares de superficie, unos navegando y otros en construcción o en proyecto autorizado para futura construcción. Sin embargo, el entusiasmo por la propulsión nuclear se extinguió también, exceptuando si acaso los submarinos. En 1967 se retiraba el *Savannah* cuando cumplía los dos años de vida. Su mantenimiento costaba tres millones de dólares cada año, cifra que se estimaba excesiva.

Pero no debería ser solamente el elemento militar quien se aprovechara de esa innovación. En junio de 1954, la Unión Soviética hizo construir el primer reactor nuclear para uso civil: producción de energía eléctrica. Fue uno pequeño todavía, su capacidad no rebasó los 5.000 kW. Allá por octubre de 1956, Gran Bretaña puso en funcionamiento su planta atómica «Calder Hall» con una capacidad superior a los 50.000 kW. Los Estados Unidos llegaron a ese campo en tercer lugar. El 26 de mayo de 1958, la «Westinghouse» dio fin a un pequeño reactor con una capacidad de 60.000 kW para la producción de energía eléctrica en la localidad de Shippingport (Pennsylvania). Les siguieron rápidamente muchos reactores en Estados Unidos y otras partes del mundo.

Al cabo de una década o poco más, doce países poseían ya reactores nucleares y el 50 % de la electricidad suministrada en los Estados Unidos para usos civiles procedía de la fisión nuclear. Se invadió incluso el espacio exterior, pues el 3 de abril de 1965 se lanzó un satélite propulsado por un pequeño reactor. Y, no obstante, el problema de la contaminación radiactiva seguía revistiendo gravedad. Cuando comenzó la década de 1970, se hizo cada vez más audible la oposición pública contra esa incansable proliferación de centrales nucleares.

Si la fisión remplazara algún día al carbón y petróleo como principal fuente mundial de energía, ¿cuánto duraría ese nuevo combustible? No mucho si dependiéramos totalmente del escaso material fisionable, el uranio 235. Pero, por fortuna, el hombre puede crear otros combustibles fisionables partiendo del uranio 235.

Ya hemos visto que el plutonio es uno de esos combustibles creados por el hombre. Supongamos que construimos un pequeño reactor con uranio enriquecido como combustible y omitimos el moderador de modo que los neutrones rápidos fluyan dentro de una envoltura circundante de uranio natural. Esos neutrones convertirán el uranio 238 de la funda en plutonio. Si hacemos lo necesario para reducir a un mínimo el desperdicio de neutrones, obtendremos con cada fisión de un átomo de uranio 235 en el núcleo, varios átomos de plutonio cuya creación ha tenido lugar dentro de la envoltura. Es decir, produciremos más combustible del que consumimos.

El primer «reactor generador» se construyó bajo la dirección del físico canadiense Walter H. Zinn en Arco (Idaho) el año 1951. Se le llamó «EBR-1» (Experimental Breeder Reactor-1). El aparato no demostró solamente la solvencia del principio generador, sino que también produjo electricidad.

Ese sistema generador podría multiplicar muchas veces las reservas de combustibles tomando como base el uranio, porque todos los isótopos ordinarios del uranio, el uranio 238- serían combustibles potenciales.

El elemento torio, integrado totalmente por torio 232, es otro combustible fisionable en potencia. Tras la absorción de neutrones rápidos viene a ser el isótopo artificial torio 233 que decae velozmente para transformarse en uranio 233. Ahora bien, el uranio 233 es fisionable bajo los neutrones lentos y mantiene una reacción en cadena autogenética. Así, pues, se puede agregar el torio a las reservas de

combustible, precisamente un elemento cinco veces más abundante que el uranio en la Tierra. Según se ha calculado, la primera capa de 90 m en la corteza terrestre contiene como promedio 12.000 t de uranio y torio por kilómetro cuadrado. Aunque, claro está, no todos esos yacimientos están por el momento a nuestro alcance. Para recapitular: la cantidad total de energía concebible y disponible en las reservas terrestres de uranio y torio es veinte veces mayor que los depósitos de carbón y petróleo existentes hoy día a nuestra disposición.

### Radiactividad

La iniciación de la Era Atómica amenazó al hombre con un riesgo casi inédito en su campo de experiencia. Al quedar descubierto, el núcleo emitió torrentes de radiaciones nucleares. Sin duda alguna, la vida sobre esta tierra ha estado siempre expuesta a la radiactividad natural y los rayos cósmicos. Pero la concentración suscitada por el hombre de sustancias naturalmente radiactivas como el radio, cuya existencia ordinaria se disemina considerablemente sobre la superficie terrestre, acrecentó no poco el peligro. Algunos manipuladores primitivos de los rayos X y el radio absorbieron incluso dosis letales: Marie Curie y su hija Irène Joliot-Curie murieron de leucemia ocasionada por esa exposición. Y ahí está ese famoso caso: los pintores de esferas de reloj que murieron en 1920 por haber chupado sus pinceles impregnados con radio.

Los casos clínicos de leucemia se han duplicado en las dos últimas décadas, y esta circunstancia puede deberse en parte al creciente empleo de los rayos X con finalidades muy diversas. Los síntomas leucémicos entre médicos, quienes tienen más probabilidades de quedar expuestos a sus efectos- se presentan dos veces más que en el público general. Entre los radiólogos, especialistas de los rayos X y su empleo, la incidencia es diez veces mayor. No puede extrañarnos, pues, que se hagan múltiples intentos para sustituir los rayos X por otras técnicas tales como aquellas que aprovechan el sonido ultrasónico. Entretanto la fisión ha acrecentado con su aparición ese peligro. Todos esos mecanismos, tanto si son bombas como reactores, desatan radiactividad a una escala que podría contaminar la atmósfera, los océanos, y todo cuanto comemos, bebemos o respiramos, hasta el punto de hacerlos peligrosos para la vida humana. La fisión ha implantado una especie de

contaminación que pondrá a prueba el ingenio humano para dominarla.

Cuando se desintegra el átomo de uranio o plutonio, sus productos de fisión adoptan diversas formas. Entre esos fragmentos pueden figurar isótopos del bario o tecnecio o cualquiera de otras numerosas posibilidades. En total se ha conseguido identificar a unos doscientos productos radiactivos de la fisión. Éstos representan una complicación para la tecnología nuclear, pues algunos absorben vorazmente los neutrones y obstaculizan la reacción por fisión. De ahí que sea necesario extraer y purificar periódicamente el combustible de un reactor.

Por añadidura esos fragmentos de la fisión son, sin excepción, peligrosos para la vida en diversos grados según la energía y naturaleza de su radiación. Por ejemplo, las partículas alfa introducidas en el cuerpo son más peligrosas que las partículas beta. También es importante el ritmo de decadencia: un nucleido que se desintegre rápidamente bombardeará al receptor con más radiaciones por segundo o por hora que otro cuya desintegración sea lenta.

El ritmo de desintegración es algo de lo cual sólo se puede hablar cuando el número de nucleidos implicados sea muy alto. Un núcleo aislado puede desintegrarse en cualquier momento, es decir, al instante, o mil millones de años después o en un período intermedio entre esos dos extremos- y no existe ningún medio para predecir cuándo ocurrirá. Sin embargo, cada especie radiactiva tiene su ritmo promedio de desintegración y, por tanto, si el número de átomos implicados es muy alto resulta posible predecir con gran exactitud en qué proporción se desintegrarán durante cualquier unidad de tiempo. Veamos un ejemplo.

La experimentación demuestra que en una agrupación determinada de átomos, a los cuales llamaremos X- éstos se desintegran al ritmo del 50 % cada año. Al finalizar el primer año, 500 de cada 1.000 átomos X de la agrupación inicial conservarán su identidad de átomos X; al cabo de dos años, serán 250; tres años después, 125, y así sucesivamente. El tiempo requerido por la mitad de los átomos originales para desintegrarse se denomina «vida media» del átomo en cuestión (expresión sugerida por Rutherford el año 1904); consecuentemente, la vida media del átomo X es un año. Cada nucleido radiactivo tiene su característica vida media que jamás cambia en condiciones ordinarias. (El único tipo de influencia externa que puede cambiarla es el bombardeo del núcleo con una partícula o la temperatura

extremadamente alta en el interior de una estrella. Para expresarlo con otras palabras, un suceso violento capaz de atacar al núcleo *per se.*)

La vida media del uranio 238 es 4,5 miles de millones de años. No nos sorprende, por tanto, que subsista todavía el uranio 238 en el Universo pese a la decadencia de sus átomos. Un cálculo muy simple nos demostrará que se requiere un período seis veces mayor que la vida media para reducir una cantidad determinada de nucleidos radiactivos hasta el 1 % del total original. Cuando hayan transcurrido 30 mil millones de años desde estas fechas, quedará todavía 1 kg de uranio por cada tonelada existente hoy día en la corteza terrestre.

Aunque los isótopos de un elemento sean químicamente idénticos, sus propiedades nucleares pueden diferir en gran medida. El uranio 235, por ejemplo, se desintegra seis veces más aprisa que el uranio 238; su vida media es sólo de 710 millones de años. Así, pues, cabe suponer que en los eones ya desaparecidos, el uranio contenía mucho más uranio 235 que el de nuestros días. Hace 6 mil millones de años, el uranio 235 representaría el 70 % aproximadamente del uranio natural. Sin embargo, el género humano no está consumiendo los residuos del uranio 235. Aunque se hubiese retrasado un millón de años el descubrimiento de la fisión, la Tierra poseería todavía un 99,9 % del uranio 235 existente en la actualidad.

Evidentemente, cualquier nucleido con una vida media inferior a los cien millones de años habría declinado hasta desvanecerse en la dilatada vida del Universo. Así se explica que hoy sólo encontremos algunos vestigios de plutonio. El isótopo de plutonio más longevo, el plutonio 244, tiene una vida media de 70 millones de años solamente.

El uranio, el torio y otros elementos radiactivos de larga vida dispersos entre rocas y tierra, emiten pequeñas cantidades de radiación que están siempre presentes en el aire circundante de nuestro medio. El propio hombre es ligeramente radiactivo, pues todos los tejidos orgánicos contienen trazas de un isótopo relativamente raro e inestable de potasio (potasio 40) que tiene una vida media de 1.300 millones de años. (Al desintegrarse, el potasio 40 produce algún argón 40 y, probablemente, eso aclara la circunstancia que sea el nucleido más común entre los gases inertes de la Tierra. Los promedios potasio-argón han servido para verificar la edad de los meteoritos.)

Los diversos nucleidos radiactivos de origen natural constituyen lo que se suele llamar «radiación de fondo» (a la cual contribuyen también los rayos cósmicos). La exposición constante a la radiación natural ha representado probablemente un importante papel en la evolución ocasionando mutaciones y, tal vez, sea parcialmente responsable de las afecciones cancerosas. Pero los organismos vivientes han convivido con ella durante millones de años. La radiación nuclear sólo ha llegado a implicar graves riesgos en nuestros tiempos, es decir, cuando el hombre empezó a experimentar por primera vez con el radio, a lo cual se sumó luego la llegada de la fisión y los reactores nucleares. Cuando se inició el proyecto de la energía atómica, los físicos habían aprendido ya a su costa cuán peligrosa era la radiación nuclear. Por consiguiente, los artífices del proyecto procuraron rodearse con elaboradas medidas de seguridad. Los productos «temibles» de la fisión y otras materias radiactivas estuvieron almacenados detrás de sólidas paredes protectoras, y sus observadores los examinaron a través de vidrio de plomo. Se idearon instrumentos para manipular las materias por control remoto. Se exigió a cada persona que llevara trozos de película fotográfica u otros artificios detectores para «supervisar» su exposición acumulativa. (Los mamíferos son más sensativos a la radiación que cualquier otra forma de vida, pero el hombre, como término medio, es extraordinariamente resistente para ser un mamífero.)

Pese a todo, han ocurrido accidentes, y unos cuantos físicos nucleares padecieron la «enfermedad radiactiva» y murieron por haber absorbido dosis masivas. Sin embargo, toda ocupación tiene sus riesgos aún cuando sea de las más seguras; a decir verdad, los trabajadores de la energía nuclear salen mejor librados que muchos otros, pues cada vez se conoce mejor el riesgo y se procura neutralizarlo. Pero un mundo repleto de reactores nucleares, diseminando por toneladas productos de la fisión, sería otro cantar. ¿Cómo desembarazarse de todo ese material mortífero?

Una gran proporción de tales desperdicios tiene una radiactividad efímera que se desvanece hasta ser inofensiva en cuestión de semanas o meses; por tanto, se la puede almacenar durante ese período para llevarla después a los vertederos. Mucho más peligrosos son los nucleidos con vidas medias de uno a treinta años. Su vida es suficientemente corta para producir intensa radiación, y suficientemente larga para

acarrear graves riesgos a varias generaciones. Un nucleido con una vida media de treinta años requerirá dos siglos para perder el 99 % de su actividad.

Sin embargo, se podría dar una aplicación provechosa a los productos de la fisión. Como fuentes energéticas tiene capacidad para proveer con fuerza motriz a pequeños mecanismos o instrumentos. Las partículas emitidas por el isótopo radiactivo resultan absorbidas y su energía se convierte en calor. Éste produce a su vez electricidad en pares termoeléctricos. Las baterías productoras de electricidad bajo esa forma son generadores radioisotópicos a los cuales se les denomina usualmente SNAP (*Systems for Nuclear Auxiliary Power*), Sistemas de energía nuclear auxiliar, o, con más espectacularidad, «baterías atómicas». Suelen tener poco peso, apenas 2 kg, generan 60 W y duran varios años. Los satélites han llevado baterías SNAP; por ejemplo el *Transit 4A* y el *Transit 4B*, puestos en órbita por los Estados Unidos en 1961, con la finalidad de auxiliar a la navegación.

El isótopo de uso más común en las baterías SNAP es el estroncio 90, al cual nos referiremos más adelante en otro aspecto. También se emplean en ciertas variedades los isótopos del plutonio y el curio.

Los radionucleidos tienen asimismo una utilidad potencial en Medicina (por ejemplo, para el tratamiento del cáncer), pues eliminan las bacterias y preservan los alimentos; también son aplicables a muchos campos de la industria, incluyendo la fabricación de productos químicos.

Para citar un ejemplo entre muchos, la «Hercules Powder Company» ha diseñado un reactor cuya radiación se emplea en la producción de etilenglicol anticongelante.

No obstante, y una vez mencionadas esas excepciones, es imposible imaginar una aplicación para los ingentes residuos de la fisión que expulsan los reactores nucleares. Ello representa generalmente un riesgo en relación con la energía nuclear. El peligro más evidente es la explosión ocasionada por una reacción súbita e insospechada de la fisión (una «excursión nuclear», como suele llamársele) y ha estado siempre presente en la mente de los proyectistas. Debe decirse en honor suyo que eso ha ocurrido muy pocas veces, si bien un accidente semejante mató a tres hombres en Idaho el año 1961 y difundió la contaminación radiactiva por toda la central. Mucho más difícil es manipular los residuos de la fisión. Se calcula que cada 200.000 kW de electricidad generada por la fuerza nuclear producen 0,70 kg

diarios de residuos de la fisión. ¿Qué hacer con ellos? En los Estados Unidos se han almacenado ya bajo tierra millones de litros de líquido radiactivo, y, según se calcula, hacia el año 2000 será preciso eliminar cada día alrededor de dos millones de litros de líquido radiactivo. Tanto los Estados Unidos como la Gran Bretaña han sepultado en el mar recipientes de cemento conteniendo residuos radiactivos. Se han hecho propuestas para depositarlos en las simas oceánicas, o las antiguas minas de sal, o incinerarlos con vidrio derretido para enterrar después la materia solidificada. Pero siempre surge el inquietante pensamiento que la radiactividad consiga escapar de un modo u otro y contamine el fondo marino. Una pesadilla particularmente estremecedora es la posibilidad que naufrague un barco movido por energía nuclear y disemine sus residuos acumulados de la fisión por el océano. El hundimiento del submarino nuclear estadounidense *Tresher* en el Atlántico Norte el 10 de abril de 1963 prestó nuevo acicate a tal temor, aunque en aquel caso no se produjo, aparentemente, la contaminación.

Aunque la contaminación radiactiva ocasionada por la energía nuclear pacífica represente un peligro potencial, se la podrá controlar por lo menos con todos los medios posibles y, probablemente, se tendrá éxito. Pero hay otra contaminación que se ha extendido ya a todo el mundo y que, con seguridad, sería objeto de propagación deliberada en una guerra nuclear. Me refiero a la lluvia radiactiva procedente de bombas atómicas.

La lluvia radiactiva es un producto de toda bomba nuclear, incluso de aquéllas lanzadas sin intención aviesa. Como los vientos acarrean la lluvia radiactiva alrededor del mundo y las precipitaciones de agua la arrastran hacia tierra, resulta virtualmente imposible para cualquier nación el hacer explotar una bomba nuclear en la atmósfera sin la correspondiente detección. En el caso de una guerra nuclear, la lluvia radiactiva podría producir a largo plazo más víctimas y más daños a los seres vivientes del mundo entero que los estallidos incendiarios de las propias bombas sobre los países atacados.

La lluvia radiactiva se divide en tres tipos: «local», «toposférico» y «estratosférico». La lluvia radiactiva local resulta de las grandes explosiones cuando las partículas de polvo absorben a los isótopos radiactivos y se depositan rápidamente a centenares de kilómetros. Las explosiones aéreas de bombas nucleares de la magnitud kilotón,

envían residuos de la fisión a la troposfera. Éstos quedan en suspensión al cabo de un mes, y durante ese intervalo los vientos los arrastran hacia el Este, haciéndoles recorrer millares de kilómetros.

Las superbombas termonucleares producen cantidades tremendas de residuos cuya masa, impulsada por las corrientes, se traslada hacia la estratosfera. Esta lluvia radiactiva estratosférica requiere un año o más para asentarse y entonces se distribuye por todo el hemisferio, cayendo ocasionalmente sin distinción alguna sobre atacantes y atacados.

La intensidad de la lluvia radiactiva desatada por la primera superbomba, cuya explosión tuvo lugar en el Pacífico el 1 de marzo de 1954, cogió por sorpresa a los científicos. Ninguno había esperado que la lluvia radiactiva producida por una bomba de fusión fuese tan «perniciosa». La contaminación afectó seriamente a 22.000 km<sup>2</sup>, un área casi equivalente a la superficie de Massachusetts. Pero todos ellos vieron claramente las razones cuando supieron que se había reforzado el núcleo de fusión con una capa de uranio 238 sobre la cual actuaron los neutrones para fisionarla. Ello no multiplicó solamente la fuerza de la explosión, sino que también originó una nube de residuos radiactivos mucho más voluminosa que la producida por una simple bomba de fisión del tipo Hiroshima.

Hasta estas fechas la lluvia radiactiva de los ensayos nucleares ha agregado solamente una pequeña cantidad de radiactividad a la radiación terrestre de fondo. Pero incluso un aumento ínfimo sobre el nivel natural acrecentaría la incidencia del cáncer, causaría trastornos genéticos y acortaría ligeramente el término medio de la longevidad. Los analistas más circunspectos de esos riesgos, conceden que si se incrementara el ritmo de mutación (véase en el capítulo XII la discusión sobre mutaciones), la lluvia radiactiva entrañaría ciertas complicaciones para futuras generaciones.

Un producto determinado de la fisión es particularmente peligroso para la vida humana. Nos referimos al estroncio 90 (vida media: veintiocho años), un isótopo muy útil en los generadores SNAP. Cuando el estroncio 90 se precipita sobre tierras y aguas, las plantas lo asimilan .Y después lo incorporan a los cuerpos de aquellos animales (incluido el hombre) que se alimenten directa o indirectamente de ellas. El estroncio tiene gran similitud química con el calcio, y por ello se dirige a los huesos

para alojarse en ellos durante largo tiempo. Ahí reside su peculiar peligro. Los minerales alojados en los huesos tienen una lenta «evolución»; es decir, no se les remplaza tan rápidamente como a las sustancias de los tejidos blandos. Por tal razón, el estroncio 90, una vez absorbido, puede permanecer en el cuerpo de la persona afectada durante el resto de su vida.

El estroncio 90 es una sustancia insólita en nuestro medio ambiente; no existía sobre la tierra en cantidades apreciables hasta que el hombre fisionó el átomo de uranio. Pero, hoy día, al cabo de una generación escasamente, el estroncio 90 se ha incorporado a los huesos de todo ser humano sobre la tierra y, sin duda, de todos los vertebrados. En la estratosfera flotan todavía cantidades considerables de este elemento y, tarde o temprano, reforzarán la concentración ya existente en nuestros huesos.

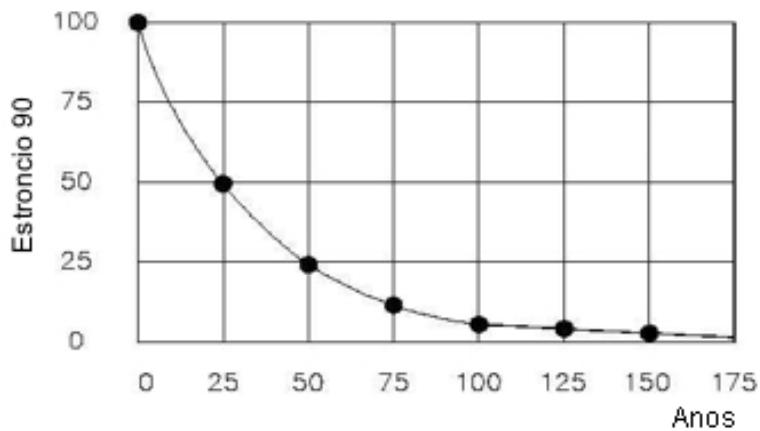
Las «unidades estroncio» (UE) miden la concentración de estroncio 90. Una UE es un micromicrocurie de estroncio 90 por cada gramo de calcio en el cuerpo. Un «curie» es una unidad de radiación (naturalmente llamada así en memoria de los Curie) que equivalía inicialmente a la radiación producida por un gramo de radio equilibrado con el producto de su desintegración, el radón. Hoy se la conceptúa generalmente como el equivalente de 37 mil millones de desintegraciones por segundo. Un micromicrocurie es una trillonésima de curie, o bien 2,12 desintegraciones por minuto. Por consiguiente, una «unidad estroncio» representa 2,12 desintegraciones por minuto y por cada gramo de calcio existente en el cuerpo.

La concentración de estroncio 90 en el esqueleto humano varía considerablemente según los lugares y los individuos. Se ha comprobado que algunas personas contienen una cantidad setenta y cinco veces mayor que el promedio. Los niños, cuadriplican como término medio la concentración de los adultos debido a la más intensa evolución de la materia en sus huesos incipientes. El cálculo del promedio varía según los casos, pues su base fundamental es la porción de estroncio 90 en las dietas. (Por cierto que la leche no es un alimento especialmente peligroso en este sentido, aunque el calcio asimilado de los vegetales vaya asociado con bastante más estroncio 90. El «sistema filtrador» de la vaca elimina parte del estroncio que ingiere con el pienso vegetal.) Se calcula que el promedio de concentración del

estroncio 90 en los huesos de los ciudadanos estadounidenses en 1959 oscilaba entre una unidad estroncio y cinco unidades estroncio largas. (La Comisión Internacional de Radiación estableció el «máximo permisible» en 67 UE.) Pero los promedios significan muy poca cosa, máxime cuando el estroncio 90 puede concentrarse en «lugares críticos» de los huesos y alcanzar suficiente nivel para producir leucemia o cáncer.

Los efectos de la radiación ocasionaron por su importancia, entre otras cosas, la adopción de diversas unidades específicas con objeto de apreciar su amplitud. Una, por ejemplo, el «roentgen» (llamada así para recordar al descubridor de los rayos X) se basa en el número de iones originados por los rayos X o los rayos gamma bajo estudio. Más recientemente se ha implantado el «rad» (abreviatura de «radiación»). Representa la absorción de 100 ergios por gramo de cualquier tipo de radiación.

La naturaleza de la radiación tiene su importancia. Un «rad» de partículas masivas es mucho más efectivo que un «rad» de partículas ligeras respecto a la inducción de cambios químicos en los tejidos; por tanto, la energía bajo la forma de partículas alfa es más peligrosa que esa misma energía bajo la forma de electrones.



*Decadencia del estroncio 90 al cumplirse aproximadamente 200 años.*

Los estragos químicos causados por la radiación obedecen principalmente a la desintegración de las moléculas del agua (que integran la mayor parte de los tejidos vivos) en fragmentos excepcionalmente activos («radicales libres») que reaccionan a su vez con las complejas moléculas del tejido. Las lesiones medulares,

interceptando la producción de células sanguíneas, son una manifestación particularmente grave de la «enfermedad radiactiva» que conduce sin remedio a la muerte cuando se desarrolla lo suficiente.

Muchos científicos eminentes creen firmemente que la lluvia radiactiva representa un importante riesgo para la raza humana. El químico norteamericano Linus Pauling asegura que la lluvia radiactiva de una sola superbomba puede ocasionar 100.000 muertes por leucemia y otras enfermedades en el mundo entero, e indica que el carbono radiactivo 14, producido por los neutrones de una explosión nuclear, constituye un grave peligro genético. Así, pues, Pauling ha abogado apasionadamente por el cese de las pruebas nucleares; hoy respalda todos los movimientos encaminados a atajar el peligro de una guerra y promover el desarme. Por otra parte, algunos científicos, incluido el físico estadounidense de origen húngaro Edward Teller, quitan importancia a los riesgos implícitos en la lluvia radiactiva.

Por regla general, el mundo simpatiza con Pauling, como lo revela el hecho que se le concediera el premio Nobel de la Paz en 1962. (Ocho años antes, Pauling había ganado el premio Nobel de Química; así, pues, él y Marie Curie son los únicos miembros de esa agrupación selecta a quienes se han otorgado dos premios Nobel.) En el otoño de 1958, los Estados Unidos, la URSS y Gran Bretaña suspendieron los ensayos nucleares con arreglo a un «acuerdo entre caballeros» (lo cual no impidió que Francia hiciera explotar su primera bomba atómica en la primavera de 1960). Durante tres años todo pareció de color rosa; la concentración de estroncio 90 llegó a un punto culminante hacia 1960 y luego se equilibró muy por debajo de un nivel que, según se estima, es la cantidad máxima compatible con la seguridad. Así y todo, en los trece años de pruebas nucleares totalizando la explosión de 150 bombas muy diversas, se ha contaminado la atmósfera con 25 millones de curies de estroncio 90 y cesio 137 (otro producto peligroso de la fisión). Solamente dos de esos artefactos explotaron con intenciones homicidas, pero el resultado de las restantes explosiones fue también bastante funesto.

En 1961, la Unión Soviética puso fin a la moratoria sin el menor aviso y reanudó sus ensayos. Como quiera que la URSS hiciera explotar bombas termonucleares de un poder sin precedentes, los Estados Unidos se creyeron obligados a renovar sus

experimentos. La opinión pública mundial, despabilada por el alivio de la moratoria, reaccionó con suma indignación.

Por consiguiente, el 10 de octubre de 1963, las tres potencias nucleares más representativas firmaron un tratado acordando suspender las pruebas nucleares (ya no fue un mero acuerdo entre caballeros), es decir, la explosión de bombas nucleares en la atmósfera, el espacio y el fondo marino. Sólo se permitieron las explosiones subterráneas porque no producían lluvia radiactiva. Ésta fue la iniciativa más esperanzadora respecto a la supervivencia humana desde el comienzo de la Era atómica. Ahora el principal peligro, suponiendo que todas las potencias signatarias del tratado se sometan a lo convenido, es que Francia y la República Popular China (los miembros más recientes del club atómico) se sigan negando a firmar el susodicho tratado.

## Fusión Nuclear

Durante veinte años largos, los físicos nucleares han cultivado en el fondo de sus mentes un sueño aún más atractivo que la fisión destinada a fines constructivos. Sueñan con dominar la energía de fusión. Al fin y al cabo, la fusión es el motor que hace girar nuestro mundo: las reacciones generadas por la fusión en el Sol son la fuente esencial de todas nuestras formas energéticas y de la propia vida. Si pudiéramos reproducir y controlar de algún modo dichas reacciones sobre la Tierra, resolveríamos todos nuestros problemas de energía. Nuestras reservas de combustible serían tan inmensas como el océano, pues ese combustible sería justamente el hidrógeno.

Y, aunque parezca extraño, no sería la primera vez que se utilizase como combustible el hidrógeno. No mucho después de su descubrimiento y el estudio de sus propiedades, el hidrógeno ocupó un lugar importante como combustible químico. El científico norteamericano Robert Hare ideó una antorcha de hidrógeno oxhídrico en 1861, y desde entonces la industria viene aprovechando esa brillante llama oxhídrica. Pero hoy día ofrece, como combustible nuclear, posibilidades mucho más prometedoras.

La energía de fusión podría ser muy superior a la energía de fisión. Un reactor de fusión proporcionaría entre cinco y diez veces más energía que un reactor de fisión.

Una libra de hidrógeno en fusión produciría 35 millones de kilovatios/hora. Por añadidura, la fusión no desprende cenizas radiactivas. Finalmente, una reacción por fusión sólo se interrumpirá en el caso de cualquier avería concebible mientras que la reacción por fisión se sustrae a todo control (aunque esto no sea lo corriente) y provoca la explosión total.

El hidrógeno 1 es el más corriente entre los tres isótopos del hidrógeno, pero también el que resiste más a la fusión. Es también el combustible privado del Sol; ahora bien, el Sol lo posee por billones de kilómetros cúbicos y, además, tiene un inmenso campo gravitatorio para mantenerlo unido así como una temperatura central de muchos millones de grados. Sólo un ínfimo porcentaje del hidrógeno existente dentro del Sol se funde en un momento dado, pero, teniendo presente su formidable masa, ese minúsculo porcentaje es suficiente.

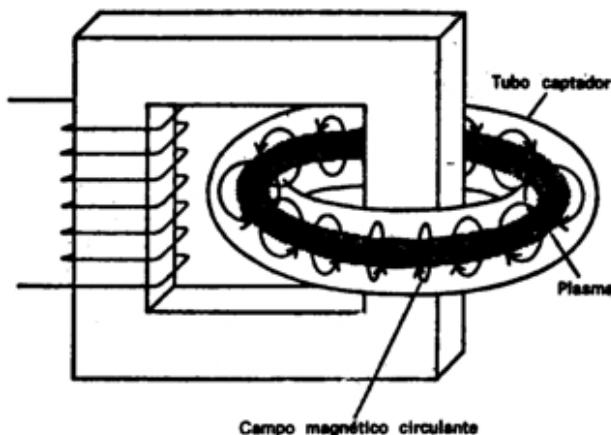
El hidrógeno 3 se presta mucho mejor a la fusión pero es tan escaso y requiere tal consumo de energía que no vale la pena pensar en él como combustible práctico por sí solo.

Así, pues, nos queda solamente el hidrógeno 2, más manejable que el hidrógeno 1 y mucho más abundante que el hidrógeno 3. En todo el hidrógeno del mundo únicamente un átomo de cada 6.000 es deuterio, pero eso basta y sobra. El océano contiene deuterio, 35 billones de toneladas nada menos, lo suficiente para proveer al hombre con grandes cantidades de energía durante todo el futuro previsible.

Sin embargo, se plantean algunos problemas. Esto pudiera parecer sorprendente, puesto que existen las bombas de fusión. Si ahí hemos logrado fundir el hidrógeno, ¿por qué no podemos hacer un reactor tal como hemos hecho una bomba? ¡Ah, pero para fabricar una bomba de fusión es preciso utilizar como cebo una bomba de fisión... y ahí queda eso! Para fabricar un reactor de fusión necesitamos evidentemente un cebo más benigno, es decir, debemos mantener la reacción a un ritmo constante, controlado... y no explosivo.

El primer problema es el menos engorroso. Las potentes corrientes eléctricas, las ondas supersónicas, los rayos láser y todo el resto pueden producir temperaturas que alcanzan en un instante 100 millones de grados. Sin duda alguna será posible procurar la temperatura adecuada.

Pero el mantener esa temperatura mientras se mete en cintura (según se espera) al hidrógeno fusible, es otro cantar. Evidentemente ningún recipiente conocido puede contener un gas cuya temperatura rebase los 100 millones de grados. Una de dos, el recipiente se vaporizará o el gas se enfriará. El primer paso hacia una solución es reducir la densidad del gas hasta un punto muy inferior a la presión normal; ello rebaja el contenido de fuerza calorífica, si bien la energía de las partículas seguirá siendo elevada. El segundo paso representa un concepto sumamente ingenioso. Un gas a temperatura muy elevada ofrece la particularidad que todos sus átomos se ven desprovistos de los electrones; es un «plasma» (término propuesto por Irving Langmuir a principios de los años 30) compuesto de electrones y núcleos desnudos. Y si lo integran totalmente partículas cargadas, ¿por qué no retenerlo utilizando un potente campo magnético en lugar del recipiente? Desde 1907 se sabe que los campos magnéticos pueden refrenar a las partículas cargadas y «captar» una corriente de ellas, lo cual se llamaba por entonces «efecto de captación». Así, pues, se hizo un ensayo con la «botella magnética» y dio resultado... pero sólo durante un lapso muy breve. Los jirones de plasma, captados instantáneamente por la botella, se retorcieron como serpientes, se disgregaron y, acto seguido, se extinguieron. Otro planteamiento consiste en instalar un campo magnético más potente al final del tubo para contener el plasma, rechazarlo y evitar las fugas. Esto se considera igualmente defectuoso, aunque no parece que el defecto sea excesivo. Si se pudiera retener el plasma a 100 millones de grados durante un segundo solamente, se desencadenaría la reacción de fusión y la energía fluiría del sistema. Esa energía podría servir para consolidar y fortalecer el campo magnético así como mantener la temperatura al nivel apropiado, es decir, funcionaría con la energía generada por ella misma. Pero el evitar las fugas de plasma durante un simple segundo era algo inalcanzable todavía.



*Botella magnética cuya misión consiste en retener un gas caliente de los núcleos de hidrógeno (el plasma). El anillo se denomina torus.*

Ahora bien, puesto que las fugas se producían con especial facilidad en el extremo del tubo, ¿por qué no eliminar ese extremo dando al tubo una forma de rosquilla? Efectivamente, un diseño de evidente utilidad fue el tubo con forma de rosquilla («torus») similar a un ocho. En 1951, Spitzer diseñó ese artefacto en forma de ocho y lo denominó «stellarator». Aún fue más prometedor otro artilugio ideado por el físico soviético Lev Andreievich Artsímovich. Se le llamó «Toroidal Kamera Magnetic» (cámara magnética toroide), y, como abreviatura. «Tokamak».

El Tokamak trabaja únicamente con gases muy rarefactos, pero los soviéticos han logrado alcanzar una temperatura de 100 millones de grados y mantenerla durante una centésima de segundo empleando hidrógeno cuya densidad atmosférica es de una millonésima. Desde luego, un hidrógeno tan rarefacto debe contenerse fijo durante más de un segundo, pero si los soviéticos consiguieran decuplicar la densidad del hidrógeno 2 y luego mantenerlo fijo durante un segundo, tal vez harían baza.

Los físicos norteamericanos están trabajando también con el Tokamak y, por añadidura, utilizan un artefacto denominado «Scyllac», que habiendo sido diseñado para contener gas más denso requerirá un período más corto de fijación.

Durante casi veinte años, los físicos vienen orientándose hacia la energía generada por la fusión. Aún cuando el progreso haya sido lento, no se ven todavía indicios de un callejón sin salida definitivo.

Entretanto, la investigación de la fusión ha proporcionado ya diversas aplicaciones prácticas. Los sopletes de plasma disparando chorros a temperaturas de 50.000º C en absoluto silencio superan largamente a los sopletes químicos ordinarios. Se ha sugerido que el soplete de plasma podría ser la última palabra en unidades incineradoras de desperdicios. Su llama desintegraría todo, *absolutamente todo*, en sus elementos constitutivos, y cada uno de esos elementos quedaría disponible para su regeneración y conversión en material nuevamente aprovechable.

## Capítulo 10

### LA MOLÉCULA

#### **Materia Orgánica**

El término molécula (de la palabra latina que significa «masa pequeña») originalmente se aplicó a la última unidad indivisible de una sustancia. Y, en cierto sentido, es una partícula simple, debido a que no puede desintegrarse sin perder su identidad. En efecto, una molécula de azúcar o de agua puede dividirse en átomos o grupos simples, pero en este caso deja de ser azúcar o agua. Incluso una molécula de hidrógeno pierde sus características propiedades químicas cuando se escinde en sus dos átomos de hidrógeno constituyentes.

Del mismo modo como el átomo ha sido motivo de gran excitación en la Física del siglo xx, así la molécula fue el sujeto de descubrimientos igualmente excitantes en la Química. Los químicos han sido capaces de desarrollar imágenes detalladas de la estructura de moléculas incluso muy complejas, de identificar el papel desempeñado por moléculas específicas en los sistemas vivos, de crear elaboradas moléculas nuevas, y de predecir el comportamiento de la molécula de una estructura dada con sorprendente exactitud.

Hacia mediados de este siglo, las complejas moléculas que forman las unidades clave de los tejidos vivos, las proteínas o los ácidos nucleicos, fueron estudiadas con todas las técnicas puestas a disposición por una Química y una Física avanzadas. Las dos Ciencias, «Bioquímica» (el estudio de las reacciones químicas que tienen lugar en el tejido vivo) y «Biofísica» (el estudio de las fuerzas y fenómenos físicos implicados en los procesos vivos), confluyeron para formar una nueva disciplina: la «Biología molecular». A través de los hallazgos de la Biología molecular, la Ciencia moderna ha logrado, en una sola generación de esfuerzos, todo salvo definir exactamente dónde se halla la frontera entre lo vivo y lo inanimado.

Pero, hace menos de un siglo y medio, no se comprendía siquiera la estructura de la molécula más sencilla.

Casi todo lo que los químicos de comienzos del siglo XIX podían hacer era dividir la materia en dos grandes categorías. Desde hacía tiempo se habían percatado (incluso en los días de los alquimistas) de que las sustancias pertenecían a dos

clases claramente distintas, por lo que se refería a su respuesta al calor. Un grupo - por ejemplo, sal, plomo, agua- permanecía básicamente inalterado después de ser calentado. La sal podía volverse incandescente cuando se calentaba, el plomo se fundía, el agua se evaporaba -pero al enfriarse de nuevo a la temperatura de partida volvían a adquirir su forma original, nada peor, aparentemente, para su experiencia-. Por otra parte, el segundo grupo de sustancias -por ejemplo, el azúcar, el aceite de oliva- cambiaban de forma permanente, por la acción del calor. El azúcar se acaramelaba al calentarse y permanecía carbonizado después de enfriarse; el aceite de oliva se evaporaba y este vapor no se condensaba al enfriarse. Eventualmente, los científicos notaron que las sustancias resistentes al calor procedían por lo general del mundo inanimado del aire, océano, y suelo, mientras que las sustancias combustibles procedían del mundo vivo, bien directamente de la materia viva o de sus restos muertos. En 1807, el químico sueco Jöns Jakob Berzelius denominó «orgánicas» a las sustancias combustibles (debido a que derivaban, directa o indirectamente, de los organismos vivos) y a todas las demás «inorgánicas».

Inicialmente, la Química centró su atención sobre las sustancias inorgánicas. El estudio del comportamiento de los, gases inorgánicos condujo al desarrollo de la teoría atómica. Una vez se estableció tal teoría, se aclaró pronto la naturaleza de las moléculas inorgánicas. El análisis mostró que las moléculas inorgánicas consistían, por lo general, en un pequeño número de átomos diferentes en proporciones definidas. La molécula de agua contenía dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno; la molécula de sal contenía un átomo de sodio y uno de cloro; el ácido sulfúrico contenía dos átomos de hidrógeno, uno de azufre. Y cuatro de oxígeno, etc.

Cuando los químicos comenzaron a analizar las sustancias orgánicas, el cuadro que se les ofreció parecía ser totalmente distinto. Las sustancias podían tener exactamente la misma composición y, no obstante, mostrar propiedades muy distintas. (Por ejemplo, el alcohol etílico está compuesto de 2 átomos de carbono, 1 átomo de oxígeno y 6 átomos de hidrógeno; también está compuesto así el éter dimetílico. No obstante, uno es un líquido a la temperatura ambiente, mientras que el otro es un gas.)

Las moléculas orgánicas contenían muchos más átomos que las inorgánicas simples, y parecían combinadas sin demasiada lógica. Simplemente, los compuestos orgánicos no podían explicarse por las sencillas leyes de la Química, a las que tan maravillosamente se adaptaban las sustancias inorgánicas. Berzelius decidió que la química de la vida era algo distinto, algo que obedecía a su propia serie de sutiles reglas. Sólo el tejido vivo -afirmó-. Podría crear un compuesto orgánico. Su punto de vista es un ejemplo del «vitalismo».

¡Luego, en 1828, el químico alemán Friedrich Wöhler, un discípulo de Berzelius, produjo una sustancia orgánica en el laboratorio! La obtuvo al calentar un compuesto denominado cianato amónico, que era considerado en general como inorgánico. Wöhler se quedó estupefacto al descubrir que, al ser calentado, ese material se convertía en una sustancia blanca idéntica en sus propiedades a la «urea», un compuesto de la orina. Según las teorías de Berzelius, sólo el riñón vivo podía formar la urea, y Wöhler la acababa de producir a partir de una sustancia inorgánica, simplemente al aplicarle algo de calor. Wöhler repitió la experiencia muchas veces, antes de atreverse a publicar su descubrimiento. Cuando finalmente lo hizo, Berzelius y otros, al principio, rehusaron creerlo. Pero otros químicos confirmaron los resultados. Además de eso, lograron sintetizar muchos otros compuestos orgánicos a partir de precursores inorgánicos. El primero en lograr la producción de un compuesto orgánico a partir de sus elementos fue el químico alemán Adolf Wilhelm Hermann Kolbe, quien, en 1845, produjo ácido acético de esta forma. Fue realmente esto lo que puso punto final a la versión vitalista de Berzelius. Cada vez se hizo más y más evidente que las mismas leyes químicas se aplicaban por igual a las moléculas inorgánicas. Eventualmente, se ofreció una sencilla definición para distinguir entre las sustancias orgánicas y las inorgánicas: todas las sustancias que contenían carbono (con la posible excepción de unos pocos compuestos sencillos, tales como el dióxido de carbono) se denominaron orgánicas; las restantes eran inorgánicas.

Para poder enfrentarse con éxito a la compleja Química nueva, los químicos precisaban un simple método de abreviatura para representar los compuestos, y, afortunadamente, ya Berzelius había sugerido un sistema de símbolos conveniente y racional. Los elementos fueron designados mediante las abreviaturas de sus

nombres latinos. Así C sería el símbolo para el carbono, O para el oxígeno, H para el hidrógeno, N para el nitrógeno, S para el azufre, P para el fósforo, etc... Cuando dos elementos comenzaban con la misma letra, se utilizaba una segunda letra para distinguirlos entre sí: por ejemplo, Ca para el Calcio, Cl para el cloro, Cd para el cadmio, Co para cobalto, Cr para el cromo, etc. Sólo en unos pocos casos, los nombres latinos o latinizados (y las iniciales) son distintos de las españolas, así: el hierro (*ferrum*) tiene el Fe; la plata (*argentum*), el Ag; el oro (*aurum*), el Au; el cobre (*cuprum*), el Cu; el estaño (*stannum*), el Sn; el mercurio (*hydragyrum*), el Hg; el antimonio (*stibium*), el Sb; el sodio (*natrium*), el Na; y el potasio (*kalium*), el K. Con este sistema es fácil simbolizar la composición de una molécula. El agua se escribe  $H_2O$  (indicando así que la molécula consiste de dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno); la sal, NaCl; el ácido sulfúrico,  $H_2SO_4$ , etc. A ésta se la denomina la «fórmula empírica» de un compuesto; indica de qué está formado el compuesto pero no dice nada acerca de su estructura, es decir, la forma en que los átomos de la molécula se hallan unidos entre sí.

El barón Justus von Liebig, un colaborador de Wöhler, se dedicó al estudio de la composición de una serie de sustancias orgánicas, aplicando el «análisis químico» al campo de la Química orgánica. Calentaba una pequeña cantidad de una sustancia orgánica y retenía los gases formados (principalmente  $CO_2$  y vapor de agua,  $H_2O$ ) con sustancias químicas apropiadas. Luego pesaba las sustancias químicas utilizadas para captar los productos de combustión, al objeto de ver cómo había aumentado su peso a causa de los productos captados. A partir del peso podía determinar la cantidad de carbono, hidrógeno y oxígeno existentes en la sustancia original. Luego era fácil calcular, a partir de los pesos atómicos, el número de cada tipo de átomo en la molécula. De esta forma, por ejemplo, estableció que la molécula del alcohol etílico tenía la fórmula  $C_2H_6O$ .

El método de Liebig no podía medir el nitrógeno presente en los compuestos orgánicos, pero el químico francés Jean-Baptiste-André Dumas ideó un método de combustión que recogía el nitrógeno gaseoso liberado a partir de las sustancias. Hizo uso de este método para analizar los gases de la atmósfera, con una exactitud sin precedentes, en 1841.

Los métodos del «análisis orgánico» se hicieron cada vez más y más precisos hasta alcanzar verdaderos prodigios de exactitud con los «métodos microanalíticos» del químico austriaco Fritz Pregl. Éste ideó técnicas, a principios de 1900, para el análisis exacto de cantidades de compuestos orgánicos que apenas se podían distinguir a simple vista, y, a consecuencia de ello, recibió el premio Nobel de Química en 1923.

Desgraciadamente, la simple determinación de las fórmulas empíricas de los compuestos orgánicos no permitía dilucidar fácilmente su química. Al contrario que los compuestos inorgánicos, que usualmente consistían de 2 ó 3, o, a lo sumo, de una docena de átomos, las moléculas orgánicas eran con frecuencia enormes. Liebig halló que la fórmula de la morfina era  $C_{17}H_{19}O_3N$  y la de la estricnina  $C_{21}H_{22}O_2N_2$ .

Los químicos apenas sabían qué hacer con moléculas tan grandes, ni cómo iniciar o acabar sus fórmulas. Wöhler y Liebig intentaron agrupar los átomos en agregados más pequeños denominados «radicales», al tiempo que elaboraron teorías para demostrar que diversos compuestos estaban formados por radicales específicos en cantidades y combinaciones diferentes. Algunos de los sistemas fueron sumamente ingeniosos, pero en realidad ninguno aportaba suficiente explicación. Fue particularmente difícil explicar por qué compuestos con la misma fórmula empírica, tales como el alcohol etílico y el dimetil éter, poseían diferentes propiedades.

Este fenómeno fue dilucidado por vez primera hacia 1820 por Liebig y Wöhler. El primero estudiaba un grupo de compuestos llamados «fulminatos», mientras que Wöhler examinaba un grupo denominado «isocianatos»; ambos grupos resultaron tener las mismas fórmulas empíricas: por así decirlo, los elementos se hallaban presentes en proporciones iguales. Berzelius, el dictador químico en aquella época, fue informado de esta particularidad, pero rechazó aceptar tal creencia hasta que, en 1830, él mismo descubrió algunos ejemplos. Denominó a tales compuestos, de diferentes propiedades pero con elementos presentes en las mismas proporciones, «isómeros» (a partir de las palabras griegas que significan «partes iguales»). La estructura de las moléculas orgánicas era realmente un verdadero rompecabezas en aquellos días.

Los químicos, perdidos en esta jungla de la Química orgánica, comenzaron a ver un rayo de luz, en 1850, al descubrir que un determinado átomo se podía combinar

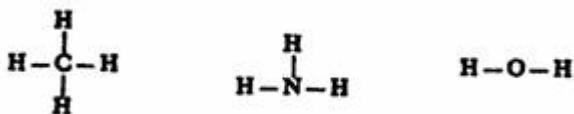
solamente con un cierto número de otros átomos. Por ejemplo, el átomo de hidrógeno aparentemente se podía unir sólo a un único átomo de otro elemento: formaría ácido clorhídrico, HCl, pero nunca HCl<sub>2</sub>. De manera similar, el cloro y el sodio solamente podrían unirse a otro átomo, formando en este caso el NaCl. Por otra parte, un átomo de oxígeno podría unirse a dos átomos de otro elemento: por ejemplo, H<sub>2</sub>O. El nitrógeno podría unirse a tres: por ejemplo, NH<sub>3</sub> (amoníaco). Y el carbono podía combinarse hasta con cuatro: por ejemplo, Cl<sub>4</sub>C (tetracloruro de carbono).

En resumen, parecía como si cada tipo de átomo tuviera un cierto número de ganchos mediante los cuales pudiera unirse a otros átomos. El químico inglés Edward Frankland denominó a estos ganchos enlaces de «valencia», a partir de una palabra latina que significa «poder», para significar los poderes de combinación de los elementos.

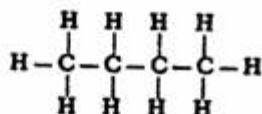
El químico alemán Friedrich August Kekulé von Stradonitz, verificó que, si se asignaba al carbono una valencia de 4 y si se suponía que los átomos de carbono podían utilizar aquellas valencias, al menos en parte, para unirse en cadenas, en este caso podría dibujarse un mapa a través de aquella jungla orgánica. Su técnica fue perfeccionada haciéndola más visual gracias a la sugerencia de un químico escocés, Archibald Scott Couper, según la que estas fuerzas de combinación de los átomos («enlaces», tal como generalmente se las denomina) se representan en la forma de pequeños guiones. De esta manera, las moléculas orgánicas podrían edificarse al igual que muchos juegos de estructuras «engarzables».

En 1861, Kekulé publicó un texto con muchos ejemplos de este sistema, que demostró su conveniencia y valor. La «fórmula estructural» se convirtió en el sello del químico orgánico.

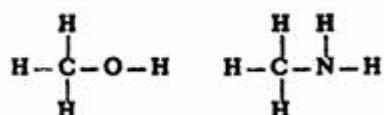
Por ejemplo, las moléculas del metano (CH<sub>4</sub>), el amoniaco (NH<sub>3</sub>), y el agua (H<sub>2</sub>O), respectivamente, podían ser representadas de esta forma:



Las moléculas orgánicas podían representarse como cadenas de átomos de carbono con átomos de hidrógeno unidos a los lados. Así el butano ( $C_4H_{10}$ ) tendría la estructura:



El oxígeno o el nitrógeno podían entrar a formar parte de la cadena de la siguiente manera, representando a los compuestos alcohol metílico ( $CH_4O$ ) y metilamina ( $CH_5N$ ) respectivamente, de la forma siguiente:



Un átomo que poseyera más de un gancho, tal como el carbono, con cuatro de ellos, no precisaba utilizar cada uno para un átomo distinto: podía formar un enlace doble o triple con uno de sus vecinos, como en el etileno ( $C_2H_4$ ) o el acetileno ( $C_2H_2$ ):



Entonces podía apreciarse fácilmente cómo dos moléculas podían tener el mismo número de átomos de cada elemento y, no obstante, diferir en sus propiedades. Los dos isómeros debían diferir en la disposición de los átomos. Por ejemplo, las fórmulas estructurales del alcohol etílico y el dimetil éter, respectivamente, podían escribirse:



Cuanto mayor es el número de átomos en una molécula, tanto mayor es el número de disposiciones posibles y por tanto el número de isómeros. Por ejemplo, el heptano, una molécula constituida por 7 átomos de carbono y 15 átomos de hidrógeno, puede ser dispuesta en nueve formas distintas; en otras palabras, pueden existir nueve diferentes heptanos, cada uno con sus particulares propiedades. Estos nueve isómeros se asemejan considerablemente entre sí, pero es sólo una semejanza aparente. Los químicos han preparado la totalidad de estos nueve isómeros, pero nunca han conseguido hallar un décimo isómero, lo que constituye una buena demostración en favor del sistema de Kekulé.

Un compuesto que contenga 40 átomos de carbono y 82 átomos de hidrógeno podrá mostrar 62.5 billones de disposiciones distintas o isómeros. Y una molécula orgánica de este tamaño no es en modo alguno infrecuente.

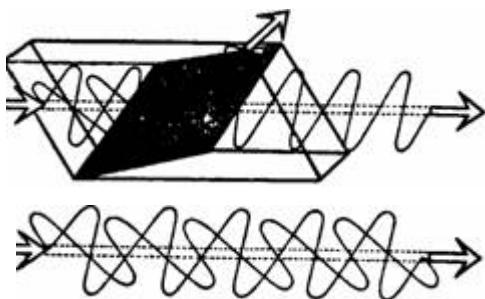
Sólo los átomos de carbono pueden unirse entre sí para formar largas cadenas. Otros átomos pueden formar una cadena a lo sumo de una docena y media de unidades. Este es el motivo por el cual las moléculas inorgánicas son en general sencillas, y por qué raras veces tienen isómeros. La mayor complejidad de la molécula orgánica introduce tantas posibilidades de isomería, que casi se conocen dos millones de compuestos orgánicos, formándose diariamente otros nuevos, mientras que se espera descubrir un número virtualmente ilimitado de ellos.

En la actualidad, las fórmulas estructurales son utilizadas universalmente como guías visuales indispensables de la naturaleza de las moléculas orgánicas. Como abreviatura, a menudo los químicos escriben la fórmula de la molécula en términos de los grupos de átomos («radicales») que la constituyen, tales como los radicales metilo ( $\text{CH}_3$ ) y metileno ( $\text{CH}_2$ ). Así la fórmula del butano puede escribirse como  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$ .

### **Los Detalles De La Estructura**

En la segunda mitad del siglo XIX, los químicos descubrieron un tipo de isomerismo particularmente sutil que demostró tener una gran importancia en la química de los seres vivos. El descubrimiento surgió del singular efecto asimétrico que ciertos compuestos orgánicos tenían sobre los rayos de luz que pasaban a su través.

Una sección transversal de un rayo de luz ordinaria mostraría que las ondas de las que consiste vibran en todos los planos: hacia arriba y abajo, de lado a lado, y oblicuamente. A esta luz se la denomina «no polarizada». Pero cuando la luz pasa a través de un cristal de la sustancia transparente llamada espato de Islandia, por ejemplo, es refractada de tal forma que la luz emerge «polarizada». Es como si la disposición de los átomos en el cristal permitiera que pasaran a su través sólo ciertos planos de vibración (del mismo modo como los barrotes de una valla pueden permitir el paso a su través de una persona que se deslice entre ellos de lado, mientras no dejarán pasar a una que intente hacerlo de frente). Existen dispositivos, tales como el «prisma de Nicol», inventado por el físico escocés William Nicol en 1829, que permite el paso de la luz en sólo un plano. Ahora ha sido remplazado éste, para la mayoría de sus usos, por materiales tales como el Polaroid (cristales de un complejo de sulfato de quinina y yodo, alineados con los ejes paralelos y embebidos en nitrocelulosa), producido por vez primera hacia 1930 por Edwin Land.



*La polarización de la luz. Las ondas de luz vibran normalmente en todos los planos (arriba). El prisma de Nicol (abajo) permite que las vibraciones se produzcan sólo en un plano, reflejando las otras. La luz transmitida se halla polarizada en un plano.*

La luz reflejada, a menudo está parcialmente polarizada en un plano, tal como fue descubierto por vez primera en 1808 por el físico francés Étienne-Louis Malus. (Él inventó el término «polarización», al aplicar la observación de Newton acerca de los polos de las partículas de luz, una ocasión en la que Newton se equivocó, aunque de todas formas el nombre persistió.) El resplandor de la luz reflejada por las ventanas de los edificios y automóviles, y aún de las autopistas pavimentadas, puede, por tanto, ser reducido hasta niveles tolerables mediante el empleo de gafas de sol con cristales «Polaroid».

A principios del siglo XIX, el físico francés Jean-Baptiste Biot había descubierto que, cuando la luz polarizada en un plano pasaba a través de cristales de cuarzo, el plano de polarización giraba. Es decir, la luz que penetraba vibrando en un plano emergía vibrando en un plano distinto. A una sustancia que muestra ese efecto se dice que es «ópticamente activa». Algunos cristales de cuarzo giraban el plano en el sentido de las agujas del reloj («rotación dextrógira») y algunos en sentido contrario al del giro de las agujas del reloj («rotación levógira»).

Biot halló que ciertos compuestos orgánicos, tales como el alcanfor y el ácido tartárico, hacían lo mismo. Pensó, asimismo, que algún tipo de asimetría en la disposición de los átomos en las moléculas era responsable de la rotación experimentada por la luz. Pero, durante varios decenios, esta sugerencia siguió siendo una simple especulación.

En 1844, Louis Pasteur (que entonces tenía sólo veintidós años de edad) estudió esta interesante cuestión.

Investigó dos sustancias: el ácido tartárico y el «ácido racémico». Ambos tenían la misma composición química, pero el ácido tartárico giraba al plano de la luz polarizada, mientras que el racémico no lo hacía. Pasteur sospechó que los cristales de las sales del ácido tartárico eran asimétricos y los del racémico, simétricos. Al examinar al microscopio ambas series de cristales comprobó, con sorpresa, que ambas eran asimétricas. Pero los cristales de la sal del ácido racémico mostraban dos tipos de asimetría. La mitad de ellos eran de la misma forma que los de la sal del ácido tartárico (tartrato), y la otra mitad eran sus imágenes especulares. Por así decirlo, la mitad de los cristales de la sal del ácido racémico (racemato) eran zurdas, y la otra mitad, diestras.

Tediosamente, Pasteur separó ambas clases de cristales del racemato y luego disolvió separadamente cada una de ellas e hizo pasar la luz a través de cada solución. Ciertamente, la solución de los cristales que poseían la misma asimetría que los cristales de tartrato giraban el plano de la luz polarizada al igual que lo hacía el tartrato, manifestando la misma rotación específica. Aquellos cristales eran de tartrato. La otra serie de cristales giraban al plano de la luz polarizada en la dirección opuesta, con el mismo grado de rotación. El motivo por el cual el racemato

original no determinaba la rotación de la luz era, por lo tanto, que las dos tendencias opuestas se neutralizaban entre sí.

Seguidamente, Pasteur volvió a convertir los dos tipos distintos de sal racemato en ácido, por adición de iones de hidrógeno a las soluciones respectivas. (Una sal es un compuesto en el cual algunos iones de hidrógeno de la molécula del ácido son remplazados por otros iones cargados positivamente, tales como los de sodio o potasio.) Halló que cada uno de esos ácidos racémicos eran entonces ópticamente activos -girando uno la luz polarizada en la misma dirección que el ácido tartárico lo hacía- (pues era el ácido tartárico) y el otro en la dirección opuesta.

Se hallaron otros pares de tales compuestos especulares («enantiomorfos», dos palabras griegas que significan «formas opuestas»). En 1863, el químico alemán Johannes Wislicenus halló que el ácido láctico (el ácido de la leche agria) formaba un par del mismo tipo. Además, mostró que las propiedades de las dos formas eran idénticas, salvo por su acción sobre la luz polarizada. Esto ha resultado ser una propiedad general para las sustancias enantiomorfas.

Estupendo, pero, ¿en dónde radicaba la asimetría? ¿Qué ocurría en las dos moléculas que determinaba que cada una de ellas fuera la imagen specular de la otra? Pasteur no pudo decirlo, y aunque Biot, que había sugerido la existencia de la asimetría molecular, vivió hasta los 88 años, no lo hizo lo suficiente como para ver confirmada su intuición.

En 1874, doce años después de la muerte de Biot, se ofreció finalmente una respuesta. Dos jóvenes químicos, un holandés de veintidós años de edad, llamado Jacobus Hendricus Van't Hoff y un francés de treinta y siete años llamado Joseph-Achille le Bel, independientemente aportaron una nueva teoría de los enlaces de valencia del carbono, que explicaba cómo podían estar construidas las moléculas enantiomorfas. (Más tarde en su carrera, Van't Hoff estudió el comportamiento de las sustancias en solución y mostró cómo las leyes que gobernaban su comportamiento se asemejaban a las leyes que gobernaban el comportamiento de los gases. Por este logro fue el primer hombre al que, en 1901, se le concedió el premio Nobel de Química.)

Kekulé había dibujado los cuatro enlaces del átomo de carbono en el mismo plano, no necesariamente debido a que ésta fuera la forma como se hallaba realmente

dispuesto, sino porque aquél era el modo conveniente de dibujarlos sobre una lámina de papel. Entonces Van't Hoff y Le Bel sugirieron un modelo tridimensional, en el que los enlaces se hallaban dirigidos en dos planos perpendiculares entre sí, dos en un plano y dos en el otro. Una buena forma de obtener una imagen de esto es suponer que el átomo de carbono se halla apoyado en tres cualesquiera de sus enlaces como si fueran piernas, en cuyo caso el cuarto enlace se dirigía verticalmente hacia arriba (ver el dibujo más adelante). Si supone usted que el átomo de carbono se halla en el centro de un tetraedro (una figura geométrica con cuatro caras triangulares), entonces los cuatro enlaces se dirigirán hacia los cuatro vértices de la figura, motivo por el cual el modelo se denomina el «átomo de carbono tetraédrico».

Ahora, permítasenos unir a estos cuatro enlaces dos átomos de hidrógeno, un átomo de cloro y un átomo de bromo. Independientemente de cuál es el átomo que unimos a un enlace, siempre obtenemos la misma disposición. Inténtelo y véalo. Se podrían representar los cuatro enlaces con cuatro palillos de los dientes insertados en un malvavisco (el átomo de carbono), en los ángulos adecuados. Ahora suponga que pincha dos olivas negras (los átomos de hidrógeno), una oliva verde (el cloro) y una cereza (bromo) en los extremos de los palillos, en cualquier orden. Digamos que, ahora, cuando se hace descansar esta estructura sobre tres patas, con una oliva negra en la cuarta, dirigida hacia arriba, el orden de las tres patas en la dirección de giro de las agujas de un reloj es oliva negra, oliva verde, cereza. Ahora puede girar la oliva verde y la cereza, de tal modo que el orden sea oliva negra, cereza, oliva verde. Pero, entonces, todo lo que necesita hacer para ver el mismo orden es girar la estructura de tal modo que la oliva negra que se hallaba en una de las patas se dirija hacia arriba en el aire, y aquella que se hallaba en el aire descanse sobre la mesa. Ahora el orden de las patas volverá a ser oliva negra, oliva verde, cereza.

En otras palabras, cuando por lo menos dos de los cuatro átomos (o grupos de átomos) unidos a los cuatro enlaces de carbono son idénticos, sólo es posible una disposición estructural. (Evidentemente esto es también así cuando son idénticos tres de ellos o la totalidad de los cuatro elementos unidos.)

Pero cuando la totalidad de los cuatro átomos (o grupos de átomos) unidos son distintos, la situación es diferente. En semejante caso son posibles dos disposiciones estructurales distintas, siendo una la imagen especular de la otra. Por ejemplo, supongamos que pincha una cereza en la pata dirigida hacia arriba y una oliva negra, una oliva verde y una cebollita para cóctel en las tres patas.

Si ahora gira la oliva negra y la oliva verde de tal modo que el orden en el sentido de giro de las agujas de reloj sea oliva verde, oliva negra, cebollita; no hay forma de que pueda girar la estructura para obtener el orden de oliva negra, oliva verde, cebollita, tal como la que existía antes que realizara el giro. Así, con cuatro elementos distintos unidos, siempre podrá formar dos estructuras distintas, siendo una de ellas la imagen especular de la otra. Inténtelo y lo comprobará.

De este modo, Van't Hoff y Le Bel resolvieron el misterio de la asimetría de las sustancias ópticamente activas. Las sustancias enantiomorfas, que giran la luz en direcciones opuestas, son sustancias que contienen átomos de carbono con cuatro átomos o grupos de átomos distintos unidos a los enlaces. Una de las dos posibles disposiciones de estos cuatro elementos enlazados gira la luz polarizada hacia la derecha; la otra la gira hacia la izquierda.

Más y más pruebas confirmaron maravillosamente el modelo tetraédrico del átomo de carbono de Van't Hoff y Le Bel y, hacia 1885 su teoría fue universalmente aceptada (gracias, en parte, al entusiasta apoyo del respetado Wislicenus).



*El átomo tetraédrico de carbono*

La noción de la estructura tridimensional también fue aplicada a átomos distintos del carbono. El químico alemán Viktor Meyer aplicó satisfactoriamente dicha idea al nitrógeno, mientras que el químico inglés William Jackson Pope la aplicó al azufre, selenio y estaño. El químico suizo-alemán Alfred Werner añadió otros elementos, y, además, empezando en los años 90 del siglo XIX, elaboró una «teoría de la coordinación», en la que se explicaba la estructura de las sustancias inorgánicas

complejas, al considerar cuidadosamente la distribución de los átomos y grupos atómicos en torno a algún átomo central. Por esta labor se le concedió a Werner el premio Nobel de Química, en 1913.

Los dos ácidos racémicos que Pasteur había aislado fueron denominados el ácido *d*-tartárico (de «dextrorrotación») y ácido *l*-tartárico (por «levorrotación»), y se escribieron fórmulas estructurales enantiomorfas para ellos. Pero, ¿cuál era cuál? ¿Cuál era realmente el compuesto dextrógiro y cuál el levógiro? En aquel entonces no había manera de decirlo.

Al objeto de proporcionar a los químicos un patrón modelo de comparación, para poder distinguir las distancias dextrógiros de las levógiros, el químico alemán Emil Fischer eligió un compuesto sencillo denominado «gliceraldehído», relacionado con los azúcares, que se encontraba entre los compuestos ópticamente activos estudiados con mayor amplitud. Arbitriariamente, asignó el carácter levorrotatorio a una forma que él denominó L-gliceraldehído, y el carácter dextrorrotatorio a su imagen especular, denominada el D-gliceraldehído. Sus fórmulas estructurales fueron:



Cualquier compuesto que mostrara por métodos químicos apropiados (más bien cuidadosos) que tenía una estructura relacionada con el L-gliceraldehído se consideraría que pertenecería a «la serie L» y tendría el prefijo «L» unido a su nombre, independientemente de si era levorrotatorio o dextrorrotatorio, por lo que a la luz polarizada se refería. Así resultó que la forma levorrotatoria del ácido tartárico pertenecía a la serie D en vez de a la serie L. (No obstante, un compuesto que pertenezca estructuralmente a la serie D, pero haga girar, la luz hacia la izquierda, tiene su nombre ampliado con los prefijos «D (-)». De forma semejante tenemos «D (+)», «L (-)» y «L (+)».)

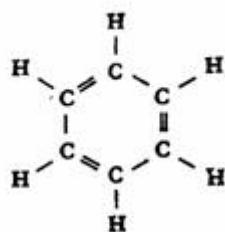
Esta preocupación con las minucias de la actividad óptica ha resultado ser algo más que una cuestión de curiosidad malsana. Ocurre que casi la totalidad de los

compuestos que existen en los organismos vivos contienen átomos de carbono asimétrico. Y, en cada caso, el organismo sólo utiliza una de las dos formas enantiomorfas del compuesto. Además, compuestos similares pertenecen por lo general a la misma serie. Por ejemplo, virtualmente la totalidad de los azúcares simples hallados en los tejidos vivos pertenecen a la serie D, mientras que virtualmente todos los aminoácidos, «los sillares de las proteínas», pertenecen a la serie L.

En 1955, un químico llamado J. M. Bijvoet determinó finalmente qué estructura tendía a hacer girar la luz polarizada a la izquierda y viceversa. Se puso de manifiesto que Fischer había, por casualidad, acertado en la denominación de las formas levorrotatoria y dextrorrotatoria.

Algunos años después del establecimiento seguro del sistema de Kekulé de las formas estructurales, se resistió a la formación un compuesto con una molécula relativamente simple. Este compuesto era el benceno (descubierto en 1825 por Faraday). Las pruebas químicas mostraban que consistía de 6 átomos de carbono y 6 átomos de hidrógeno. ¿Qué ocurría con los restantes enlaces de carbono? (Seis átomos de carbono unidos unos a otros por enlaces simples podrían unir catorce átomos de hidrógeno, y lo hacen en el compuesto bien conocido denominado hexano, C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>). Evidentemente, los átomos de carbono del benceno se hallaban unidos entre sí por enlaces dobles o triples. Así, el benceno podría tener una estructura tal como  $CH \equiv C - CH = CH - CH = CH_2$ . Pero el problema era que los compuestos conocidos con tal tipo de estructura tenían propiedades totalmente distintas a las del benceno. Además, todas las pruebas químicas parecían indicar que la molécula de benceno era muy simétrica, y 6 carbonos y 6 hidrógenos no podían disponerse en una cadena en una forma razonablemente simétrica. En 1865, el propio Kekulé aportó la respuesta. Refirió algunos años más tarde que la visión de la molécula del benceno le vino mientras se hallaba en un coche y soñaba medio dormido. En su sueño, las cadenas de átomos de carbono parecían adquirir vida y danzar ante sus ojos, y luego, bruscamente, uno se enroscó sobre sí, mismo como una serpiente. Kekulé se despertó de su sueño al ponerse en marcha el vehículo, y podría haber gritado « ieureka! ». Tenía la solución: la molécula de benceno era un

anillo. Kekulé sugirió que los 6 átomos de carbono de la molécula se hallaban dispuestos de la manera siguiente:

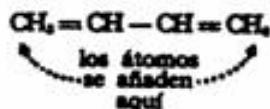


Aquí, al menos, se hallaba la simetría requerida. Explicaba, entre otras cosas, por qué la sustitución por otro átomo de uno de los átomos de hidrógeno del benceno siempre daba lugar a un mismo producto. Ya que todos los carbonos en el anillo eran indistinguibles entre sí en términos estructurales, era independiente que se realizara la sustitución en uno u otro de los átomos de hidrógeno sobre el anillo, ya que siempre se obtendría el mismo producto. En segundo lugar, la estructura anular mostraba que existían justamente tres formas en las que podrían remplazarse dos átomos de hidrógeno sobre el anillo: podrían realizarse sustituciones sobre dos átomos de carbono adyacentes en el anillo, sobre dos separados por un único átomo de carbono, o sobre dos separados por dos átomos de carbono. Evidentemente, se halló que podían obtenerse exactamente 3 isómeros disustituídos del benceno.

Sin embargo, la fórmula asignada por Kekulé a la molécula de benceno presentaba un espinoso problema. En general, los compuestos con dobles enlaces son más reactivos, es decir, más inestables, que aquellos con sólo enlaces sencillos. Es como si el enlace extra estuviera dispuesto y tendiera particularmente a desligarse del átomo de carbono y formar un nuevo enlace. Los compuestos con dobles enlaces adicionan fácilmente hidrógeno u otros átomos e incluso pueden ser degradados sin mucha dificultad. Pero el anillo de benceno es extraordinariamente estable: más estable que las cadenas de carbono con sólo enlaces simples. (En realidad, es tan estable y común en la materia orgánica que las moléculas que contienen anillos de benceno constituyen toda una clase de compuestos orgánicos, denominados «aromáticos», siendo incluidos todos los restantes dentro del grupo de los compuestos «alifáticos».) La molécula de benceno se resiste a la incorporación de más átomos de hidrógeno y es difícil lograr escindirla.

Los químicos orgánicos del siglo XIX no pudieron hallar una explicación para esta extraña estabilidad de los dobles enlaces en la molécula de benceno, y este hecho los trastornó considerablemente. Este problema puede parecer de escasa importancia, pero todo el sistema de Kekulé de las formas estructurales se hallaba en peligro por la recalcitrante actitud de la molécula de benceno. La imposibilidad de explicar esta paradoja ponía en tela de juicio todo lo demás.

El planteamiento más próximo a una solución, antes del siglo xx, fue el del químico alemán Johannes Thiele. En 1899, sugirió que, cuando los enlaces dobles y los enlaces simples aparecen alternados, los extremos más próximos de un par de enlaces dobles se neutralizan entre sí de algún modo y se neutralizan recíprocamente su naturaleza reactiva. Consideremos, como ejemplo, el compuesto «butadieno», que contiene, en su forma más simple, dos enlaces dobles separados por un enlace simple («dobles enlaces conjugados»). Ahora, si se añaden dos átomos al compuesto, éstos se añaden en los carbonos de los extremos, tal como se muestra en la fórmula abajo representada. Tal punto de vista explicaba la no-reactividad del benceno, ya que los tres dobles enlaces de los anillos de benceno, al hallarse dispuestos en un anillo, se neutralizaban recíprocamente de forma absoluta.



Unos cuarenta años más tarde se halló una explicación mejor, al aplicar una nueva teoría de los enlaces químicos, que representaba a los átomos como unidos entre sí por electrones compartidos.

El enlace químico, que Kekulé había dibujado como un guión entre los átomos, aparecía ya representado por un par de electrones compartidos (véase capítulo V). Cada átomo que formaba una combinación con su vecino compartía uno de sus electrones con éste, y el vecino recíprocamente donaba uno de sus electrones al enlace. El carbono, con cuatro electrones en su capa más extensa, podía formar cuatro enlaces; el hidrógeno podía donar su electrón para formar un enlace con otro átomo, etc. Ahora se planteaba la cuestión: ¿Cómo eran compartidos los electrones? Evidentemente, dos átomos de carbono comparten el par de electrones

entre ellos de forma igual, debido a que cada átomo ejerce una atracción similar sobre los electrones. Por otra parte, en una combinación tal como el H<sub>2</sub>O, el átomo de oxígeno, que ejerce una mayor atracción sobre los electrones que el átomo de hidrógeno, toma posesión de la mayor parte del par de electrones compartidos con cada átomo de hidrógeno. Esto significa que el átomo de oxígeno, debido a su excesiva riqueza en electrones, tiene un ligero exceso de carga negativa. Del mismo modo, el átomo de hidrógeno, que sufre de la deficiencia relativa de un electrón, tiene un ligero exceso de carga positiva. Una molécula que contenga un par oxígeno-hidrógeno, tal como el agua o el alcohol etílico, posee una pequeña concentración de cargas negativas en una parte de la molécula y una pequeña concentración de cargas positivas en otra. Posee dos polos de carga, por así decirlo, y por ello se la denomina una «molécula polar».

Este punto de vista sobre la estructura molecular fue propuesto por vez primera en 1912 por el químico holandés Peter Joseph Wilhelm Debye, quien más tarde prosiguió sus investigaciones en los Estados Unidos. Utilizó un campo eléctrico para medir el grado en que estaban separados los polos de carga eléctrica en una molécula. En tal campo, las moléculas polares se alinean con los extremos negativos dirigidos hacia el polo positivo y los extremos positivos dirigidos hacia el polo negativo, y la facilidad con que esto se produce es la medida del «momento dipolar» de la molécula. Hacia principios de los años 30, las mediciones de los momentos dipolares se habían convertido en rutinarias, y en 1936, por éste y otros trabajos, Debye fue galardonado con el premio Nobel de Química.

La nueva imagen explicaba una serie de hechos que los puntos de vista anteriores sobre la estructura molecular no pudieron hacer. Por ejemplo, explicaba algunas anomalías de los puntos de ebullición de las sustancias. En general, cuanto mayor es el peso molecular, tanto mayor es el punto de ebullición. Pero esta regla muestra con frecuencia desviaciones. El agua, con un peso molecular de sólo 18, hiere a 100º C, mientras que el propano, con más de dos veces su peso molecular (44), hiere a una temperatura mucho menor, a saber, la de -42º C. ¿Cómo podía ser esto? La respuesta consiste en que el agua es una molécula polar con un elevado momento dipolar, mientras que el propano es «no polar» -es decir, no tiene polos de carga-. Las moléculas polares tienden a orientarse ellas mismas con el polo

negativo de una molécula adyacente al polo positivo de su vecina. La atracción electrostática resultante entre moléculas próximas hace más difícil separar a las moléculas entre sí y, de esta forma, tales sustancias tienen puntos de ebullición relativamente elevados. Esto explica el hecho de que el alcohol etílico tenga un punto de ebullición mucho más elevado ( $78^{\circ}\text{ C}$ ) que su isómero, el dimetil éter, que hierve a los  $-24^{\circ}\text{ C}$ , aunque ambas sustancias tienen el mismo peso molecular (46). El alcohol etílico tiene un elevado momento dipolar y el dimetil éter sólo uno pequeño. El agua tiene un momento dipolar aún más grande que el del alcohol etílico.

Mientras que De Broglie y Schrödinger formulaban el nuevo punto de vista de que los electrones no eran partículas claramente definidas, sino haces de ondas (véase capítulo VII), la idea del enlace químico experimentó un nuevo cambio. En 1939, el químico norteamericano Linus Pauling presentó un concepto mecánico-cuántico del enlace molecular en un libro titulado *La naturaleza del enlace químico*. Su teoría explicaba finalmente, entre otras cosas, la paradoja de la estabilidad de la molécula de benceno.

Pauling representó los electrones que formaban un enlace como «resonando» entre los átomos que unían. Mostró que, bajo ciertas condiciones, era necesario considerar a un electrón como ocupando una entre distintas posiciones (con diversa probabilidad). El electrón, con sus propiedades ondulatorias, puede, por tanto, ser mejor representado como dispersado en una especie de mancha, que representa el promedio de las probabilidades individuales de posición. Cuanto más homogéneamente se hallara dispersado el electrón, tanto más estable sería el compuesto. Tal «estabilización de resonancia» ocurría más probablemente cuando la molécula poseía enlaces conjugados en un plano y cuando la existencia de simetría permitía una serie de posiciones alternativas para el electrón considerado como una partícula. El anillo de benceno es plano y simétrico. Pauling mostró que los enlaces del anillo no eran en realidad alternadamente dobles y simples, sino que los electrones se hallaban extendidos, por así decirlo, en una distribución igual, que se traducía en que todos los enlaces eran iguales y todos eran más fuertes y menos reactivos que los enlaces simples ordinarios.

Las estructuras resonantes, aunque explican satisfactoriamente el comportamiento químico, son difíciles de representar en un simbolismo sencillo sobre el papel. Por tanto, todavía se utilizan de forma universal las antiguas estructuras de Kekulé, aunque ahora se entiende que sólo representan aproximaciones de la verdadera situación electrónica, y sin lugar a dudas seguirán siendo usadas en un futuro previsible.

## Síntesis Orgánica

Después de que Kolbe hubo producido ácido acético, surgió, hacia 1850, un químico que, sistemáticamente y de forma metódica, intentó sintetizar las sustancias orgánicas en el laboratorio. Este fue el francés Pierre-Eugène-Marcelin Berthelot. Preparó una serie de compuestos orgánicos sencillos a partir de compuestos inorgánicos aún más simples, tales como el monóxido de carbono. Berthelot creó sus compuestos orgánicos simples aumentando la complejidad hasta que, finalmente, obtuvo entre otros al alcohol etílico. Fue «alcohol etílico sintético», pero absolutamente indiferenciable del «real», por cuanto era realmente alcohol etílico. El alcohol etílico es un compuesto orgánico familiar a todos y, por lo general, muy apreciado por la mayoría. Sin duda, la idea de que el químico podía crear alcohol etílico a partir del carbono, aire y agua (carbón que aportaba el carbono, aire que aportaba el oxígeno y agua que proporcionaba el hidrógeno) sin necesidad de frutas o granos como punto de partida, debió de crear visiones seductoras y envolver al químico con una nueva clase de reputación como milagrero. De cualquier forma, puso a la síntesis orgánica sobre el tapete.

Sin embargo, para los químicos, Berthelot hizo algo más importante. Empezó a formar productos que no existían en la Naturaleza. Tomó el «glicerol», un compuesto descubierto por Scheele en 1778, obtenido por la desintegración de las grasas de los organismos vivos, y lo combinó con ácidos de los que se desconocía su existencia de forma natural en las grasas (aunque existían naturalmente en cualquier lugar). De esta forma obtuvo sustancias grasas que no eran idénticas a aquellas que existían en los organismos.

Así, Berthelot creó las bases para un nuevo tipo de química orgánica: la síntesis de las moléculas que la Naturaleza no podía aportar. Esto significaba la posible

formación de una clase de «sustancias sintéticas» que podían ser un sustituto - quizás un sustituto inferior- de algún compuesto natural que era difícil o imposible de obtener en la cantidad necesaria. Pero también significaba la posibilidad de «sustancias sintéticas» que mejoraran las existentes en la Naturaleza.

Esta idea de aventajar a la Naturaleza de una forma u otra, más que simplemente de suplementarla, ha crecido hasta proporciones colosales desde que Berthelot mostró el camino a seguir. Los primeros frutos en este nuevo campo se obtuvieron en el terreno de los colorantes.

Los comienzos de la química orgánica tuvieron lugar en Alemania. Wöhler y Liebig eran ambos alemanes, y otros hombres de gran capacidad los siguieron. Antes de mediados del siglo XIX, no existían químicos orgánicos en Inglaterra ni siquiera remotamente comparables a los de Alemania. En realidad, las escuelas inglesas tenían una opinión tan baja de la Química que hablaban sobre el tema sólo durante las horas de comida, no imaginando (o quizá deseando) que muchos estudiantes estuvieran interesados. Por lo tanto, es fruto del azar que la primera proeza en síntesis, con repercusiones universales, fuera realmente llevada a cabo en Inglaterra.

Se produjo de la siguiente forma. En 1845, cuando el *Royal College of Science*, en Londres, decidió finalmente dar un buen curso de Química, importó a un joven alemán para que enseñara, este era August Wilhelm von Hofmann, de sólo 27 años en aquel entonces, y fue elegido por sugerencia del esposo de la reina Victoria, el príncipe consorte Alberto (que era de origen alemán).

Hofmann estaba interesado en una serie de cuestiones, entre ellas el alquitrán, que había estudiado con motivo de su primer proyecto de investigación bajo la dirección de Liebig. El alquitrán es un material gomoso negro, obtenido a partir del carbón cuando éste se calienta intensamente en ausencia del aire. El alquitrán no es un material muy atractivo; pero constituye una valiosa fuente de sustancias químicas orgánicas. Por ejemplo, hacia 1840, sirvió como fuente de partida de grandes cantidades de benceno razonablemente puro y de un compuesto que contenía nitrógeno denominado «anilina», relacionado con el benceno, que Hofmann había sido el primero en obtener a partir del alquitrán.

Aproximadamente 10 años después de haber llegado a Inglaterra, Hofmann se tropezó con un muchacho de 17 años que estudiaba Química en el College. Su nombre era William Henry Perkin. Hofmann tenía buen ojo para el talento y conocía el entusiasmo cuando lo veía. Tomó al joven como ayudante y lo puso a trabajar en los compuestos del alquitrán. El entusiasmo de Perkin era inagotable. Construyó un laboratorio en su propio hogar y trabajó en él tanto como en el de la Escuela. Hofmann, que también estaba interesado en las aplicaciones médicas de la química, pensó en voz alta, un día en 1856, sobre la posibilidad de sintetizar la quinina, una sustancia natural utilizada en el tratamiento de la malaria. Por aquel tiempo, aún no habían llegado los días en que se escribieran fórmulas estructurales. Lo único que se sabía acerca de la quinina era su composición, y nadie en aquel entonces tenía la más remota idea de cuán compleja podía ser su estructura. (Hasta 1908 no se dedujo correctamente la estructura de la quinina.)

Totalmente ignorante de su complejidad, Perkin, a la edad de 18 años, se enfrentó con el problema de sintetizar la quinina. Comenzó con la aliltoluidina, uno de sus compuestos del alquitrán. Esta molécula parecía tener, aproximadamente, la mitad del número de los diversos tipos de átomos que poseía la quinina en su molécula. Unió dos de estas moléculas y añadió algunos de los átomos de oxígeno que faltaban (por adición de algo de dicromato potásico, que se sabía que adicionaba átomos de oxígeno a las sustancias químicas con las que entraba en contacto), dado que Perkin creía que de esta forma podría obtener una molécula de quinina.

Naturalmente, esto no condujo a Perkin a ningún lado. Terminó obteniendo una masa pegajosa, sucia y de color pardorrojizo. Luego intentó obtener la sustancia buscada con la anilina en vez de la aliltoluidina, y así consiguió una masa pegajosa de color negruzco. En esta ocasión, sin embargo, le pareció que contenía un cierto tinte purpúreo. Añadió alcohol al revoltijo y el líquido incoloro se convirtió en otro de un maravilloso color purpúreo. Enseguida, Perkin pensó en la posibilidad de que había descubierto algo que podía servir como colorante. Éstas siempre han sido sustancias muy admiradas y costosas. Sólo existían unos pocos colorantes buenos, colorantes que teñían los productos fabricados de forma permanente y brillante, sin desaparecer con el lavado. Éstos eran el índigo azul negruzco, de la planta índigo, y el íntimamente relacionado «gualda» por el que las Islas Británicas fueron famosas

ya en los antiguos tiempos romanos; existía la «púrpura de Tiro», procedente de un caracol (así denominada, debido a que la antigua Tiro se enriqueció fabricándola; en el Imperio romano que vino posteriormente, los niños de casa real nacían en una habitación con colgaduras coloreadas con la púrpura de Tiro, y de ahí la frase «nacido entre púrpura»); y existía la alizarina rojiza, de la planta rubia («alizarina» procede de las palabras árabes que significan «el jugo»). A estas herencias de los tiempos antiguos y medievales, los ulteriores tintoreros añadieron unos pocos colorantes tropicales y pigmentos orgánicos (utilizados hoy en día sobre todo en pinturas).

Esto explica la excitación de Perkin acerca de la posibilidad de que su sustancia púrpura pudiera ser un colorante. Por la sugerencia de un amigo, envió una muestra a una empresa en Escocia que estaba interesada en colorantes, y rápidamente recibió la respuesta de que el compuesto púrpura tenía buenas propiedades. ¿Podía proporcionarla a un precio módico? Seguidamente. Perkin procedió a patentar el colorante (existieron considerables controversias acerca de si un muchacho de 18 años podía obtener una patente, pero finalmente la obtuvo), dejar la escuela y entrar en los negocios.

Su proyecto no era fácil. Perkin tenía que empezar desde el principio, preparando sus propios materiales básicos a partir del alquitrán, con un equipo diseñado por él mismo. No obstante, en el curso de 6 meses estaba ya fabricando lo que él denominó «púrpura de anilina» un compuesto no hallado en la Naturaleza y superior a cualquier colorante natural en su gama de colores. Los tintoreros franceses, que adoptaron el nuevo colorante más rápidamente que los más conservadores ingleses, llamaron al color *mauve*, de la malva (del latín «malva»), y el colorante fue denominado la «mauveína». Rápidamente se inició la carrera (siendo denominado algunas veces este período como la «Década Mauve»), y Perkin se hizo rico. A la edad de 23 años, era la autoridad mundial en colorantes.

Se había roto el dique. Una serie de químicos orgánicos, inspirados en el sorprendente éxito de Perkin, se dedicaron a sintetizar colorantes y muchos obtuvieron resultados positivos. El propio Hofmann dirigió su atención hacia el nuevo campo, y, en 1858, sintetizó un colorante rojo púrpura que fue denominado posteriormente «magenta» por los tintoreros franceses (entonces como ahora, los

árbitros de las modas del mundo). El colorante recibió este nombre por la ciudad italiana donde los franceses vencieron a los austriacos en una batalla en 1859.

Hofmann volvió a Alemania en 1865, llevando con él su interés hacia los colorantes violetas, todavía conocidos como «violetas de Hofmann». Hacia mediados del siglo xx se hallaban en uso comercial no menos de 3.500 colorantes sintéticos.

Así pues, los químicos sintetizaban ya los colorantes naturales en el laboratorio. Karl Graebe, de Alemania, y Perkin sintetizaron la alizarina en 1869 (Graebe obtuvo la patente un día antes que Perkin) y, en 1880, el químico alemán Adolf von Baeyer elaboró un método de síntesis del índigo. (Por su trabajo sobre colorantes, Baeyer recibió el premio Nobel de Química en 1905.)

Perkin se retiró de los negocios en 1874, a la edad de 35 años, y regresó a su primitivo amor, la investigación. Hacia 1875, había conseguido sintetizar la cumarina (una sustancia existente en la Naturaleza que tenía un agradable olor de heno recién segado); constituyó el comienzo de la industria de los perfumes sintéticos.

Perkin solo no podía mantener la supremacía británica frente al gran desarrollo de la química orgánica alemana y, a finales de siglo, las «sustancias sintéticas» se convirtieron casi en un monopolio alemán. Fue un químico alemán, Otto Wallach, quien efectuó estudios sobre los perfumes sintéticos, que había iniciado Perkin. En 1910. Wallach fue galardonado con el premio Nobel de Química por sus investigaciones. El Químico croata Leopold Ruzicka, profesor en Suiza, sintetizó por vez primera el almizcle, un importante componente de los perfumes. Compartió el premio Nobel de Química en 1939 (con Bütendahl). Sin embargo, durante la Primera Guerra Mundial, Gran Bretaña y los Estados Unidos, desprovistos de los productos de los laboratorios químicos alemanes, se vieron forzados a desarrollar industrias químicas propias.

Los logros en la química orgánica sintética se habrían sucedido en el mejor de los casos a tropezones, si los químicos hubieran tenido que depender de accidentes afortunados tales como aquel que había sido convenientemente aprovechado por Perkin. Por suerte, las fórmulas estructurales de Kekulé, presentadas tres años después del descubrimiento de Perkin, hicieron posible preparar modelos, por así decirlo, de la molécula orgánica. Los químicos ya no precisaban preparar la quinina

basándose en simples conjeturas y la esperanza; tenían métodos para intentar escalar las alturas estructurales de la molécula, fase a fase, con previo conocimiento de hacia a dónde se dirigían y de lo que podían esperar.

Los químicos aprendieron a transformar un grupo de átomos en otro, mediante un proceso de alteración. A abrir anillos de átomos y formar anillos a partir de cadenas abiertas; a separar entre sí grupos de átomos; y a añadir átomos de carbono, uno a uno, a una cadena. El método específico de realizar una tarea arquitectónica particular dentro de la molécula orgánica todavía se califica con frecuencia con el nombre del químico que por primera vez ha descrito los detalles. Por ejemplo, Perkin descubrió un método de adición de un grupo de dos átomos de carbono, por calentamiento de ciertas sustancias con los reactivos químicos llamados anhídrido acético y acetato sódico. A ésta se la denomina «reacción de Perkin». El maestro de Perkin, Hofmann, descubrió que un anillo de átomos que incluía un nitrógeno podía ser tratado con una sustancia denominada yoduro de metilo en presencia de un compuesto de plata, de tal forma que el anillo se rompía y se eliminaba con ello el átomo de nitrógeno. Ésta es la «degradación de Hofmann». En 1877, el químico francés Charles Friedel, trabajando con el químico norteamericano James Mason Crafts, descubrió una forma de unir una cadena corta de átomos de carbono a un anillo de benceno, utilizando calor y el cloruro de aluminio. A ésta se le denomina ahora la «reacción de Friedel-Crafts».

En 1900, el químico francés Victor Grignard descubrió que el metal magnesio, apropiadamente utilizado, podía realizar una considerable variedad de diferentes adiciones de cadenas de carbono; presentó el descubrimiento en su tesis doctoral. Por el desarrollo de estas «reacciones de Grignard» compartió el premio Nobel de Química en 1912. El químico francés Paul Sabatier, que lo compartió con él, había descubierto (junto con J. B. Senderens) un método en el que se utilizaba níquel finamente dividido para determinar la adición de átomos de hidrógeno en aquellos lugares en los que una cadena de átomos de carbono poseía un doble enlace. Ésta es la «reducción de Sabatier-Senderens».

En 1928, los químicos alemanes Otto Diels y Kurt Alder descubrieron un método de adición de los dos extremos de una cadena de carbono a los extremos opuestos de un doble enlace en otra cadena de carbono, formando así un anillo de átomo. Por el

descubrimiento de esta «reacción Diels-Alder», compartieron en 1950 el premio Nobel de Química.

En otras palabras, anotando las variaciones en las fórmulas estructurales de sustancias sometidas a una serie de condiciones y reactivos químicos, los químicos orgánicos elaboraron una serie de reglas fundamentales, cuyo número crece lentamente, sobre cómo modificar un compuesto en otro a voluntad. Esto no era sencillo. Cada compuesto y cada cambio tenían sus propias peculiaridades y dificultades. Pero las vías principales habían sido abiertas, y el químico orgánico experimentado halló claros signos hacia el progreso en lo que anteriormente parecía una jungla.

Para aclarar la estructura de compuestos desconocidos también pudo ser utilizado el conocimiento de la forma en que se comportan los grupos particulares de átomos.

Por ejemplo, cuando los alcoholes sencillos reaccionan con el sodio metálico y liberan hidrógeno, sólo se libera el hidrógeno unido a un átomo de oxígeno, no los hidrógenos unidos a los átomos de carbono. Por otra parte, algunos compuestos orgánicos tomarán átomos de hidrógeno en condiciones apropiadas, mientras que otros no lo harán. Se pone de manifiesto que los compuestos que añaden hidrógeno generalmente poseen enlaces dobles o triples y añaden el hidrógeno a estos enlaces. A partir de tal información, se originó un tipo totalmente nuevo de análisis químico de los compuestos orgánicos; se determinó la naturaleza de los grupos de átomos, más que el número y los tipos de diversos átomos presentes. La liberación de hidrógeno por adición de sodio significa la presencia de un átomo de hidrógeno unido al oxígeno en el compuesto; la adición de hidrógeno significa la presencia de enlaces dobles o triples. Si la molécula era demasiado complicada para su análisis global, podía ser escindida en porciones más simples mediante métodos bien definidos; las estructuras de las porciones más simples podían ser aclaradas y a partir de ellas deducirse la molécula original.

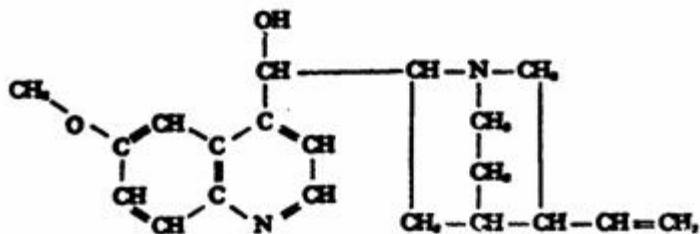
Utilizando la fórmula estructural como una herramienta y guía, los químicos pudieron deducir la estructura de algunos compuestos orgánicos de utilidad, existentes en la Naturaleza (análisis) y luego intentar duplicarlo o crear un compuesto algo similar en el laboratorio (síntesis). De todo ello resultó que lo raro, caro o difícil de obtener en la Naturaleza podía obtenerse a bajo precio y en

cantidad en el laboratorio. O, como en el caso de los colorantes de alquitrán, el laboratorio podía crear algo qué satisficiera la necesidad mejor que lo hacían otras sustancias similares halladas en la Naturaleza.

Un caso sorprendente de deliberada superación de la Naturaleza se refiere a la cocaína, hallada en las hojas de la planta coca, que es nativa de Bolivia y Perú, pero que en la actualidad crece sobre todo en Java. Al igual que los compuestos estricnina, morfina y quinina, todos ellos mencionados anteriormente, la cocaína es un ejemplo de «alcaloide», un producto vegetal que contiene nitrógeno y que, a pequeña concentración, ejerce profundos efectos fisiológicos sobre el ser humano. Según la dosis, los alcaloides pueden curar o matar. La más famosa de todas las muertes ocurridas por alcaloides ha sido la de Sócrates, que murió a causa de la «coniína», un alcaloide presente en la cicuta.

En algunos casos, la estructura molecular de los alcaloides es extraordinariamente compleja, pero precisamente esto suscitaba la curiosidad de los químicos. El químico inglés Robert Robinson estudió los alcaloides sistemáticamente. Desarrolló la estructura de la morfina (en su totalidad salvo en un átomo dudoso) en 1925, y la estructura de la estricnina en 1946. Recibió el premio Nobel de Química en 1947, como reconocimiento al valor de su trabajo.

Robinson simplemente había desarrollado la estructura de los alcaloides usando aquella estructura como guía para su síntesis. El químico norteamericano Robert Burns Woodward se percató de ello. Con su colega y compatriota William von Eggers Doering, sintetizó la quinina en 1944. Fue la azarosa búsqueda de este particular compuesto por parte de Perkin lo que había tenido como consecuencia tan tremendos resultados. Y, por si es usted curioso, ésta es la fórmula estructural de la quinina:



No es raro que Perkin tropezara en ella.

Si Woodward y Von Doering resolvieron el problema, no fue simplemente a causa de sus brillantes dotes. Tenían a su disposición las nuevas teorías electrónicas de la estructura y comportamiento molecular elaboradas por hombres tales como Pauling. Woodward se dedicó a sintetizar una serie de moléculas complicadas, que hasta entonces habían representado metas inalcanzables. Por ejemplo, en 1954, sintetizó la estricnina.

Sin embargo, mucho antes de que la estructura de los alcaloides fuera dilucidada, algunos de ellos, especialmente la cocaína, merecieron un profundo interés por parte de los médicos. Se había descubierto que los indios sudamericanos podían masticar hojas de coca, hallando en ello un antídoto contra la fatiga y una fuente de sensación de felicidad. El médico escocés Robert Christison introdujo la planta en Europa. (No es la única aportación a la Medicina por parte de los brujos y herboristas de las sociedades precientíficas. También lo son la quinina y la estricnina ya mencionadas, así como el opio, la digital, el curare, la atropina, la estrofantina y la reserpina. Además., el hábito de fumar tabaco, de masticar areca, de beber alcohol y de tomar drogas tales como la marihuana y el peyote son todos ellos hábitos heredados de sociedades primitivas.)

La cocaína no era simplemente un productor de felicidad general. Los médicos descubrieron que liberaba al cuerpo, temporal y localmente, de las sensaciones dolorosas. En 1884, el médico estadounidense Carl Koller descubrió que la cocaína podía ser utilizada como un analgésico local cuando se aplicaba a las membranas mucosas en torno al ojo. Las operaciones oculares pudieron efectuarse entonces sin dolor. La cocaína también pudo utilizarse en odontología, permitiendo que se extrajeran los dientes sin dolor.

Esto fascinó a los médicos, pues una de las grandes victorias médicas del siglo XIX había sido aquélla obtenida sobre el dolor. En 1799, Humphry Davy había preparado el gas «óxido nitroso» ( $ON_2$ ) y estudiado sus efectos. Halló que el inhalarlo eliminaba las inhibiciones de tal modo que las personas que lo habían respirado reían, lloraban o actuaban alocadamente. De ahí su nombre de «gas hilarante».

Hacia 1840, un científico norteamericano, Gardner Quincy Cotton, descubrió que el óxido nitroso hacía desaparecer la sensación de dolor y, en 1844, el dentista

también del mismo país, Horace Wells, lo utilizó en odontología. Por aquel entonces, algo mejor había entrado en escena.

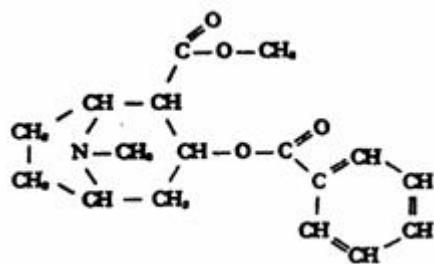
El cirujano estadounidense Crawford Williamson Long, en 1842, había utilizado el éter para hacer dormir a un paciente durante una extracción dental. En 1846, un compatriota de Long, el dentista William Thomas Green Morton, efectuó una operación quirúrgica utilizando éter, en el Hospital General de Massachusetts. Morton, por lo general, ha merecido los honores del descubrimiento, debido a que Long no describió su proeza en las revistas médicas hasta después de la demostración pública de Morton, y las demostraciones públicas anteriores de Wells con el óxido nitroso habían sido sólo éxitos vistos con indiferencia.

El poeta y médico norteamericano Oliver Wendell Holmes sugirió que a los compuestos que suprimían el dolor se los denominara «anestésicos» (de las palabras griegas que significan «sin sensación»). Algunas personas en aquel entonces creían que los anestésicos eran un intento sacrílego de evitar el dolor infligido a la Humanidad por Dios, pero, si alguna cosa se necesitaba para hacer a la anestesia respetable, fue su uso, por el médico escocés James Young Simpson, en la reina Victoria de Inglaterra, durante el parto.

Finalmente, la anestesia había elevado a la cirugía desde una carnicería realizada en una cámara de tortura hasta algo que, al menos, tenía una apariencia humana, y, con la adición de las condiciones antisépticas, hasta incluso como salvador de vidas. Por este motivo fue seguido con gran interés cualquier nuevo avance en la anestesia. La especial atención mostrada hacia la cocaína era debido a que se trataba de un «anestésico local», que suprimía el dolor, en una zona específica, sin producir una inconsciencia y falta de sensación general, como ocurría en el caso de «los anestésicos generales» tales como el éter.

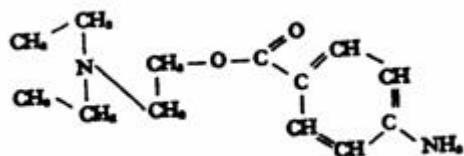
Sin embargo, la cocaína tiene varios inconvenientes. En primer lugar, puede provocar peligrosos efectos secundarios e incluso matar a los pacientes demasiado sensibles a ella. En segundo lugar, puede producir hábito; por lo que debe ser utilizada moderadamente y con precaución. (La cocaína es uno de los peligrosos «estupefacientes» o «narcóticos», que no sólo suprimen el dolor, sino también otras sensaciones no placenteras y proporcionan al que los experimenta la ilusión de euforia. El sujeto puede así acostumbrarse tanto a esto que puede requerir dosis

cada vez mayores y, a pesar del efecto perjudicial real que la droga produce sobre su organismo, llegar a depender tanto de las ilusiones que provoca, que no consigue prescindir de ella sin desarrollar dolorosos «síntomas de supresión». Tal «habitación» a la cocaína y otros fármacos de este tipo es un importante problema social. Anualmente, más de 20 toneladas de cocaína son producidas ilegalmente y vendidas con enormes beneficios para unos pocos y una tremenda miseria para muchos, a pesar de los esfuerzos mundiales realizados para evitar este tráfico.) En tercer lugar, la molécula de cocaína es frágil y, calentando la droga para esterilizarla de cualquier bacteria, se producen modificaciones en su molécula que interfieren con sus efectos anestésicos. La estructura de la molécula de cocaína es más bien complicada:



El anillo doble en el lado izquierdo es la porción frágil, y ahí radica la dificultad de sintetizarla. (La síntesis de la cocaína no se logró hasta el año 1923, en que la llevó a cabo el químico alemán Richard Willstätter.) Sin embargo, se les ocurrió a los químicos que podían sintetizar compuestos similares en los que el anillo doble no estuviera cerrado. Esto podría hacer que el compuesto fuera más fácil de obtenerse y más estable. La sustancia sintética podría poseer, quizás, las propiedades anestésicas de la cocaína, sin sus efectos colaterales indeseables.

Durante unos 20 años, los químicos alemanes estuvieron atacando el problema, creando docenas de compuestos, algunos de ellos francamente excelentes. La modificación más satisfactoria fue obtenida en 1909, al preparar un compuesto con la siguiente fórmula:



Compárese ésta con la fórmula para la cocaína y se verá la semejanza, junto con el importante hecho de que el anillo doble ya no existe. Esta molécula más simple, de naturaleza estable, fácil de sintetizar, con buenas propiedades anestésicas y muy escasos efectos secundarios no existe en la Naturaleza. Es un «derivado sintético», mucho mejor que la sustancia real. Se le denomina «procaína», pero el público lo conoce mucho mejor por su nombre comercial de «Novocaína».

Quizás, entre los anestésicos generales, el mejor conocido y más eficaz sea la morfina. Su nombre procede de la palabra griega para significar el «sueño». Es un derivado purificado del jugo de opio o «láudano», utilizado durante siglos por las gentes, tanto civilizadas como primitivas, para combatir los dolores y las tensiones del mundo cotidiano. Como remedio para el paciente sumido en el dolor, es una bendición de los cielos; pero también lleva con ella el mortal peligro de la habituación. Un intento realizado para hallar un sustituto de ella, fracasó estruendosamente. En 1898, un derivado sintético, la «diacetilmorfina», más conocida como «heroína», fue introducida, en la creencia de que podía ser más segura. Por el contrario, resultó la droga más peligrosa de todas.

«Sedantes» (inductores del sueño) menos peligrosos son el hidrato de cloral y, en particular, los barbitúricos. El primer ejemplo de este último grupo fue introducido en 1902, y ahora son los constituyentes más frecuentes de las «píldoras para dormir». Bastante innocuos cuando se utilizan apropiadamente, pueden, no obstante, crear hábito, y una dosis excesiva causa la muerte. En realidad, ya que la muerte llega suavemente, como el producto final de un sueño cada vez más profundo, la sobredosificación de barbitúricos es un método bastante popular de suicidio, o de intento de llevarlo a cabo.

El sedante más frecuente, y de mayor uso, es, por supuesto, el alcohol. Los métodos para fermentar los jugos de frutas y granos se conocían ya en tiempos prehistóricos, así como también la destilación para fabricar licores más fuertes de los que podían producirse naturalmente. El valor de los vinos suaves en aquellas regiones donde la provisión de agua no es más que un corto camino hacia la fiebre tifoidea y el cólera, y la aceptación social de la bebida con moderación, hizo difícil considerar el alcohol como fármaco que es, aunque induce al hábito con la misma

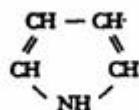
seguridad que la morfina y, cuando se consume en cantidad, produce muchos más daños. Sin embargo, la prohibición legal de la venta de licores parece ser una medida condenada al fracaso; ciertamente, la experiencia americana de la «Prohibición» (1920-1933) representó un fracaso desastroso. No obstante, el alcoholismo está siendo tratado cada vez más como una auténtica enfermedad y no como una desgracia moral. Los síntomas agudos del alcoholismo (*delirium tremens*) probablemente no se deben tanto al alcohol en sí mismo, como a las deficiencias vitamínicas producidas en aquellos que comen poco y beben mucho.

El ser humano dispone ahora de toda suerte de productos sintéticos de gran uso y abuso potencial. Un sinfín de explosivos, gases venenosos, insecticidas, germicidas, antisépticos, desinfectantes, detergentes, fármacos... Pero la síntesis no es simplemente la asistenta de las necesidades del consumidor. También puede colocarse al servicio de la investigación química pura.

A menudo ocurre que a un compuesto complejo, producido, bien por los tejidos vivos o por un químico orgánico, sólo se le puede asignar una estructura molecular probable, después de haberse efectuado todas las posibles deducciones a partir de la naturaleza de las reacciones que experimenta. En este caso, una forma de intentar resolver el problema es sintetizar un compuesto mediante las reacciones conocidas para producir una estructura similar a aquella que ha sido deducida. Si las propiedades del compuesto resultante son idénticas a las del compuesto que se está investigando, la estructura asignada se convierte en algo sobre lo que el químico puede basar su confianza. Un caso demostrativo a este respecto es el de la hemoglobina, el principal componente de los hematíes de la sangre y el pigmento que da a ésta su color rojo. En 1831, el químico francés L. R. LeCanu escindió la hemoglobina en dos partes, de las cuales la porción más pequeña, llamada «heme», constituía el 4 % de la masa de la hemoglobina. Se halló que el heme tenía la fórmula empírica  $C_{34}H_{32}O_4N_4Fe$ . Se sabía que compuestos tales como el heme existían en otras sustancias de importancia vital, tanto en el reino vegetal como en el animal y, por ello, la estructura de la molécula despertó sumo interés entre los bioquímicos. Sin embargo, durante casi un siglo después del aislamiento de LeCanu del heme, todo lo que podía hacerse era fragmentarlo en moléculas más pequeñas.

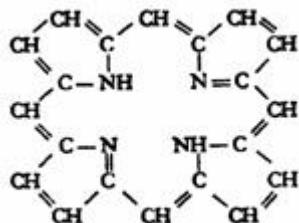
El átomo de hierro (Fe) podía eliminarse fácilmente, y lo que restaba se disgregaba luego en fragmentos que representaban aproximadamente la cuarta parte de la molécula original. Se halló que esos fragmentos eran «pirroles», moléculas constituidas por anillos de cinco átomos, de los cuales cuatro eran de carbono y uno de nitrógeno.

El propio pirrol tiene la siguiente estructura:



Los pirroles obtenidos a partir del heme poseen pequeños grupos de átomos que contienen uno o dos átomos de carbono unidos al anillo, en lugar de uno o más átomos de hidrógeno.

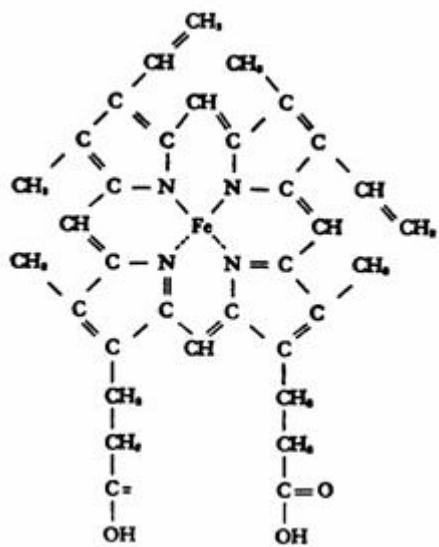
En la década de 1920-1930, el químico alemán Hans Fischer atacó el problema. Ya que los pirroles tenían unas dimensiones que eran aproximadamente la cuarta parte del heme original, decidió intentar combinar 4 pirroles para comprobar qué sucedía. Lo que finalmente obtuvo fue un compuesto con 4 anillos que denominó «porfina» (de la palabra griega que significa «púrpura», debido a su color púrpura). La porfina tiene una estructura similar a:



Sin embargo, los pirroles obtenidos a partir del heme, en primer lugar contenían pequeñas «cadenas laterales» unidas al anillo. Éstas permanecían unidas a ellos cuando los pirroles se unían para formar la porfina. La porfina con varias cadenas laterales unidas daba lugar a un familiar de compuestos denominados las «porfirinas». Al comparar las propiedades del heme con aquellas de las porfirinas que él había sintetizado, a Fischer le resultó evidente que el heme (menos su átomo de hierro) era una porfirina. Pero, ¿cuál? Según los razonamientos de Fischer, al menos podían formarse 15 compuestos a partir de los diversos pirroles obtenidos del heme, y cualquiera de esos 15 podía ser el propio heme.

Podría obtenerse una respuesta irrefutable sintetizando los 15 y estudiando las propiedades de cada uno de ellos. Fischer puso a sus discípulos al trabajo, preparando mediante tediosas reacciones químicas lo que permitía sólo que se formara una estructura particular, una de las 15 posibilidades. Una vez formada cada diferente porfirina, comparó sus propiedades con aquellas de la porfirina natural del heme.

En 1928, descubrió que la porfirina con el número IX en su serie era la que había estado buscando. La variedad natural de porfirina es desde entonces llamada la «porfirina IX». Fue un procedimiento simple convertir la porfirina IX en heme, añadiéndole hierro. Los químicos, al menos, tienen la confianza de que conocen la estructura de ese importante compuesto. Ésta es la estructura del heme, tal como la dilucidó Fischer:



Por su logro, se otorgó a Fischer el premio Nobel de Química en 1930.

Aún siendo muy notables los éxitos de la química orgánica sintética durante el siglo XIX y la primera mitad del XX, todos ellos se debieron al mismo proceso utilizado por los alquimistas de épocas pretéritas: mezcla y calentamiento de sustancias. El calor representó un medio seguro de injectar energía a las moléculas y hacerlas actuar entre sí, aunque tales interacciones fueron usualmente de naturaleza errática y se produjeron por conducto de agentes intermediarios, efímeros e inestables, cuya esencia sólo fue definible a base de conjeturas.

Lo que necesitaban los químicos era un método más alambicado y directo para producir moléculas energéticas; es decir, un sistema mediante el cual todas las moléculas se movieran aproximadamente a la misma velocidad y en la misma dirección. Esto eliminaría la naturaleza errática de las interacciones, pues entonces, todo cuanto hiciera una molécula lo harían también las demás. Un procedimiento aceptable podría consistir en acelerar los iones dentro de un campo eléctrico, tal como se aceleran las partículas subatómicas en los ciclotrones.

En 1964, el químico germano-americano Richard Leopold Wolfgang consiguió acelerar moléculas e iones hasta hacerlas adquirir energías muy elevadas y, por medio de lo que podríamos denominar un «acelerador químico» produjo velocidades iónicas solamente alcanzables mediante el calor a temperaturas comprendidas entre los  $10.000^{\circ}$  y  $100.000^{\circ}$  C. Por añadidura, todos los iones se trasladaron en la misma dirección.

Si se provee a los iones así acelerados con una carga de electrones que ellos puedan captar, se los convertirá en moléculas neutras cuyas velocidades de translación serán todavía muy considerables. Fue el químico norteamericano Leonard Wharton quien produjo esos rayos neutros el año 1969.

Respecto a las breves fases intermedias de la reacción química, las computadoras podrían ser de utilidad. Fue preciso elaborar las ecuaciones de mecánica cuántica que gobiernan el estado de los electrones en diferentes combinaciones atómicas, y prever los acontecimientos que sobrevendrían cuando se produjese la colisión. Por ejemplo, en 1968, una computadora manipulada por el químico estadounidense de origen italiano Enrico Clementi «hizo colisionar» amoníaco y ácido clorhídrico en circuito cerrado de televisión para formar cloruro amónico. Asimismo, la computadora anunció los consecutivos acontecimientos e indicó que el cloruro amónico resultante podría existir como gas de alta presión a  $700^{\circ}$  C. Ésta fue una información inédita, cuya verificación experimental se llevó a cabo pocos meses después.

En la última década., los químicos han forjado flamantes instrumentos, tanto de carácter teórico como experimental. Ahora se conocerán recónditos pormenores de las reacciones y se elaborarán nuevos productos inasequibles hasta el presente o, si

acaso, asequibles en porciones ínfimas. Tal vez nos hallemos en el umbral de un mundo prodigioso e insospechado.

### Polímeros y Plásticos

Cuando consideramos moléculas similares a las del heme y la quinina estamos alcanzando un grado tal de complejidad, que incluso el químico moderno experimenta grandes dificultades en dilucidarla. La síntesis de tales compuestos requiere tantas fases y una variedad tal de procedimientos, que difícilmente podemos esperar producirlo en cantidad, sin la colaboración de algún organismo vivo (excepto el propio químico). Sin embargo, esto no debe crear un complejo de inferioridad. El propio tejido vivo alcanza el límite de su capacidad a este nivel de complejidad. Pocas moléculas en la naturaleza son más complejas que las del heme y la quinina.

Realmente, existen sustancias naturales compuestas de cientos de miles e incluso de millones de átomos, pero no son moléculas individuales, por así decirlo, construidas de una pieza. Más bien estas moléculas están formadas por sillares unidos, al igual que las cuentas de un collar. Por lo general, el tejido vivo sintetiza algún compuesto pequeño, relativamente simple, y luego se limita a sujetar las unidades entre sí formando cadenas. Y esto, como veremos, también puede hacerlo el químico.

En el tejido, esta unión de moléculas pequeñas («condensación») se acompaña usualmente de la eliminación de dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno (que se combinan para formar una molécula de agua) en cada punto de unión. Invariablemente, el proceso puede ser reversible (tanto en el organismo como en el tubo de ensayo): por la adición de agua, las unidades de la cadena pueden soltarse y separarse. Esta inversión de la condensación se denomina «hidrólisis», de las palabras griegas que significan «separación por el agua». En el tubo de ensayo, la hidrólisis de estas largas cadenas puede ser acelerada por una serie de métodos, siendo el más común la adición de una cierta cantidad de ácido a la mezcla.

La primera investigación de la estructura química de una molécula grande se remonta al año 1812, cuando el químico ruso Gottlieb Sigismund Kirchhoff halló que, hirviendo el almidón con ácido, producía un azúcar idéntico en sus propiedades

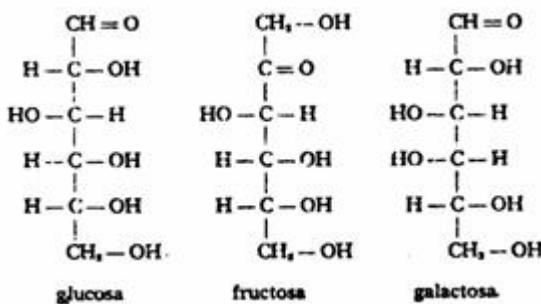
a la glucosa, azúcar éste obtenido a base de uvas. En 1819, el químico francés Henri Braconnot también obtuvo glucosa por ebullición de diversos productos vegetales tales como serrín, lino y cortezas, todos los cuales contienen un compuesto llamado «celulosa».

Fue fácil suponer que ambos, el almidón y la celulosa, estaban formados por unidades de glucosa, pero los detalles de la estructura molecular del almidón y la celulosa tuvieron que esperar al conocimiento de la estructura molecular de la glucosa. Al principio, antes de los días de las fórmulas estructurales, todo lo que se sabía de la glucosa era su fórmula empírica,  $C_6H_{12}O_6$ . Esta proporción sugería que existía una molécula de agua,  $H_2O$ , unida a cada uno de los átomos de carbono. Por lo tanto, la glucosa y los compuestos similares a ella en estructura fueron denominados «hidratos de carbono» («carbón hidratado»).

La fórmula estructural de la glucosa fue dilucidada en 1886 por el químico alemán Heinrich Kiliani. Mostró que su molécula estaba constituida por una cadena de 6 átomos de carbono, a la que se unían separadamente átomos de hidrógeno y grupos de oxígeno-hidrógeno. No existían combinaciones de agua propiamente dichas en ningún lado de la molécula.

En la siguiente década, el químico alemán Emil Fischer estudió detalladamente la glucosa y estableció la disposición exacta de los grupos de oxígeno-hidrógeno en torno a los átomos de carbono, cuatro de los cuales eran asimétricos. Existen 16 posibles disposiciones de estos grupos y, por tanto, 16 isómeros ópticos posibles, cada uno con sus propiedades características. Los químicos, por supuesto, han elaborado los dieciséis, de los cuales sólo unos pocos existen realmente en la Naturaleza. Como consecuencia de su labor sobre la actividad óptica de estos azúcares, Fischer sugirió la existencia de las series -L y -D de compuestos. Por haber proporcionado unas sólidas bases estructurales a la química de los hidratos de carbono. Fischer recibió el premio Nobel de Química en 1902.

Éstas son las fórmulas estructurales de la glucosa y de otros dos azúcares corrientes, a saber, la fructosa y la galactosa:



Una vez los químicos conocieron la estructura de los azúcares simples, fue relativamente fácil desarrollar la forma en que se unían para dar lugar a compuestos más complejos. Por ejemplo, una molécula de glucosa y una de fructosa pueden condensarse para formar el disacárido sacarosa: el azúcar que utilizamos en la mesa. La glucosa y la galactosa se combinan para formar la lactosa, que existe en la Naturaleza sólo en la leche.

No existe razón alguna por la que tales condensaciones no pueden continuar indefinidamente, y esto es lo que ocurre en el almidón y la celulosa. Cada uno de ellos consiste en largas cadenas de unidades de glucosa condensadas según un determinado modelo.

Los detalles de este modelo son importantes, debido a que, aún cuando ambos compuestos son formados por la misma unidad, difieren profundamente entre sí. El almidón, en una u otra forma, constituye la mayor parte de la alimentación de la Humanidad, mientras que la celulosa no es asimilable en absoluto. Tras laboriosas investigaciones, los químicos llegaron a la conclusión de que la diferencia en el tipo de condensación es del modo siguiente: supongamos una molécula de glucosa vista de lado (en cuyo caso se la simbolizará por «u») o vista de arriba abajo (simbolizándola en tal caso por «n»). La molécula de almidón puede entonces considerarse que está formada por una serie de moléculas de glucosa dispuestas de la siguiente manera «...uuuuuuuu...», mientras que la celulosa consiste en «...ununununun...». Los jugos digestivos del organismo poseen la capacidad de hidrolizar el enlace «uu» del almidón, liberando a partir de él la glucosa, que luego puede ser absorbida para obtener energía. Aquellos mismos jugos no pueden en cambio romper el enlace «un» de la celulosa, y toda la celulosa que ingerimos pasa a través del tubo digestivo y es seguidamente excretada.

Existen ciertos microorganismos que pueden digerir la celulosa, pero no lo puede conseguir ninguno de los animales superiores. Algunos de estos microorganismos viven en el tubo digestivo de los rumiantes y termitas, por ejemplo. Gracias a estos pequeños ayudantes, las vacas pueden vivir de la hierba y las termitas de la madera. Los microorganismos forman, a partir de la celulosa, glucosa en cantidad, y luego utilizan la que precisan, mientras que el huésped usa el sobrante. Los microorganismos proporcionan el alimento elaborado, en tanto que el huésped aporta las materias primas y el lugar donde vivir. Esta forma de cooperación entre dos formas de vida para un beneficio mutuo se denomina «símbiosis», a partir de las palabras griegas que significan «vivir juntos».

Cristóbal Colón descubrió que los nativos sudamericanos jugaban con pelotas formadas por un jugo vegetal endurecido. Colón, y otros exploradores que visitaron la América del Sur en los dos siglos siguientes, quedaron fascinados por estas pelotas que botaban (obtenidas del jugo de ciertos árboles, en el Brasil). Muestras de ellas fueron llevadas a Europa posteriormente, como una curiosidad. Hacia el año 1770, Joseph Priestley (poco antes de descubrir el oxígeno) halló que una masa de este material podía borrar las marcas de lápiz. Los ingleses la llaman «goma de la India» debido a que procede de las «Indias» (el nombre original del nuevo mundo descubierto por Colón).

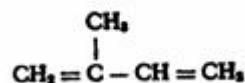
Con el tiempo, la gente halló otros usos para la goma. En 1823, un escocés llamado Charles Macintosh patentó vestiduras constituidas por una capa de goma entre dos capas de tejido, consiguiendo una impermeabilización, y por ello tales prendas aún son denominadas algunas veces «mackintoshes» (con una «k» añadida).

Sin embargo, la dificultad que planteaba la goma al ser utilizada de esta manera era que con el calor se volvía pegajosa y gomosa, mientras que cuando el tiempo era frío se volvía correosa y dura. Algunos individuos intentaron descubrir formas de tratar la goma, al objeto de suprimir estas características indeseables. Entre ellos se encontraba un norteamericano llamado Charles Goodyear, quien apenas tenía conocimientos químicos, pero que trabajó siguiendo el método del ensayo y el error. Un día, en 1839, accidentalmente vertió una mezcla de goma y azufre sobre una estufa caliente. Intentó rascarla rápidamente y descubrió sorprendido que la mezcla de goma-azufre calentada aparecía seca, incluso cuando aún estaba caliente. La

calentó y enfrió repetidamente, y halló al fin que tenía una muestra de goma que no se volvía pegajosa con el calor, o similar al cuero con el frío, sino que seguía siendo suave y elástica.

Este proceso de añadir azufre a la goma se denomina ahora «vulcanización» (de Vulcano, el dios romano del fuego). El descubrimiento de Goodyear estableció las bases de la industria del caucho. Se afirma que el propio Goodyear nunca recibió recompensa alguna, a pesar de que este descubrimiento representó muchos millones de dólares. Malgastó su vida luchando por derechos de patente, y murió en una profunda miseria.

El conocimiento de la estructura molecular de la goma se remonta al año 1879, cuando un químico francés, Gustave Bouchardat, calentó goma en ausencia de aire y obtuvo un líquido llamado «isopreno». Su molécula está compuesta de cinco átomos de carbono y ocho átomos de hidrógeno, dispuestos de la siguiente manera:



Un segundo tipo de jugo vegetal (el «látex»), obtenido a partir de ciertos árboles, en el sudeste asiático, produce una sustancia llamada «gutapercha». Carece de la elasticidad de la goma, pero cuando se calienta en ausencia de aire también produce isopreno.

Tanto la goma como la gutapercha están constituidas por miles de unidades de isopreno. Como en el caso del almidón y la celulosa, la diferencia entre ellas radica en el tipo de unión. En la goma, las unidades de isopreno se hallan unidas en la forma «...uuuuu...» y de tal modo que forman espirales, que pueden ser distendidas cuando se fracciona sobre ellas, permitiendo así su elongación. En la gutapercha, las unidades se unen en la forma «... ununu...», y forman cadenas que son más rectas y, por tanto, menos elongables.

Una simple molécula de azúcar, tal como la glucosa, es un «monosacárido» (de la palabra griega para «un azúcar»); la sacarosa y la lactosa son «disacáridos» («dos azúcares»); y el almidón y la celulosa son «polisacáridos» («muchos azúcares»). Debido a que dos moléculas de isopreno se unen para formar un tipo bien conocido de compuesto llamado «terpeno» (obtenido a partir de la esencia de trementina), la goma y la gutapercha se denominan «politerpenos».

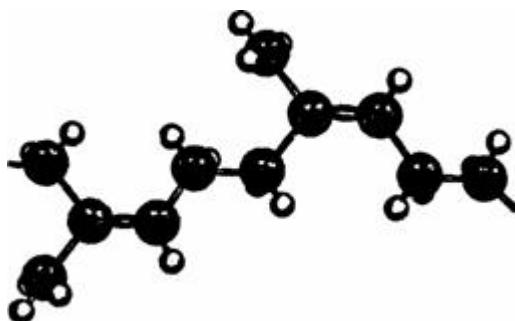
El término general para tales compuestos fue inventado por Berzelius (un gran inventor de nombres y símbolos) ya en el año 1830. Denominó a la unidad básica un «monómero» («una parte») y a la molécula grande un «polímero» («muchas partes»). Los polímeros que consisten de muchas unidades (digamos, más de un centenar) se denominan ahora «polímeros altos». El almidón, la celulosa, la goma y la gutapercha son todos ellos ejemplos de polímeros altos.

Los polímeros no son compuestos bien definidos, sino mezclas complejas de moléculas de diferente tamaño. El peso molecular medio puede ser determinado por diversos métodos. Uno de ellos es la determinación de la «viscosidad», (la facilidad o dificultad con que un líquido fluye bajo una presión dada). Cuanto más grande y más alargada es la molécula, tanto más contribuye a la «fricción interna» de un líquido y tanto más se asemejará a la melaza cuando se vierte y menos al agua. El químico alemán Hermann Staudinger elaboró este método en 1930 como parte de su trabajo general sobre polímeros, y, en 1953, fue galardonado con el premio Nobel de Química por su contribución al conocimiento de estas moléculas gigantes.

En 1913, dos químicos japoneses descubrieron que las fibras naturales, tales como las de la celulosa, difractaban los rayos X del mismo modo como lo hace un cristal.

Las fibras no son cristales en el sentido ordinario de la palabra, pero son de carácter «microcristalino». Es decir, las cadenas largas de unidades que constituyen su molécula tienden a correr en haces paralelos en distancias más largas o más cortas, aquí y allá. A lo largo de aquellos haces paralelos, los átomos se hallan dispuestos en un orden repetitivo, del mismo modo como lo están en los cristales, y los rayos X que inciden sobre aquellas secciones de la fibra son difractados.

Debido a esto, los polímeros han sido divididos en dos grandes clases: cristalinos y amorfos.



*La molécula de gutapercha, una porción de la cual se muestra aquí, está formada por miles de unidades de isopreno. Los primeros cinco álamos de carbono en la izquierda (esferas negras) y los ocho álamos de hidrógeno unidos a ellos forman fina unidad de isopreno.*

En un polímero cristalino, como la celulosa, la fuerza de las cadenas individuales aumenta por el hecho de que las vecinas paralelas se hallan unidas entre sí por enlaces químicos. La fibra resultante tiene una considerable resistencia a la tracción. El almidón también es cristalino, pero considerablemente menos de lo que lo es la celulosa. Por ello, carece de la resistencia de la celulosa o de su capacidad para formar fibras.

La goma es un polímero amorfó. Ya que las cadenas individuales no se alinean, no se producen uniones transversales. Si se calienta; las diversas cadenas pueden quedar independientes y deslizarse libremente sobre y en torno a otras. En consecuencia, la goma, o un polímero similar a la goma, se ablandará y se volverá pegajosa y eventualmente se fundirá con el calor. (La distensión de la goma hace más rectilíneas las cadenas y le confiere un cierto carácter microcristalino. Por ello, la goma distendida tiene una considerable resistencia a la tracción.) La celulosa, y el almidón, en los cuales las moléculas individuales se hallan unidas entre sí aquí y allá, no pueden mostrar la misma independencia de vibración, de tal modo que no se ablandan con el calor. Permanecen rígidas hasta que la temperatura es lo suficientemente alta como para inducir vibraciones que rompen la molécula de tal modo que se producen una carbonización y la emisión de humo.

A temperaturas por debajo del estado gomoso, pegajoso, los polímeros amorfos a menudo son blandos y elásticos. Sin embargo, a temperaturas aún más bajas se endurecen y adquieren el carácter de cuero o incluso el de vidrio. La goma en bruto está seca y es elástica en un campo de temperaturas más bien estrecho. La adición de azufre, en la proporción del 5 al 8 %, aporta enlaces de azufre flexibles que se extienden de una cadena a otra, lo que reduce la independencia de las cadenas y así impide que adquiera un carácter gomoso a una temperatura moderada. También aumenta la libertad de juego de las cadenas a temperaturas moderadamente bajas; por tanto, la goma no se endurecerá. La adición de cantidades mayores de azufre,

hasta del 30 al 50 %, unirá las cadenas tan íntimamente que la goma se endurecerá. Se la conoce entonces como «goma dura» o «ebonita».

(Incluso el caucho vulcanizado se volverá vítreo, si se reduce la temperatura lo suficiente. Una pelota ordinaria de goma, introducida en aire líquido por unos instantes, se romperá si se lanza contra una pared. Ésta es una de las demostraciones favoritas en los cursos de introducción a la química.)

Diversos polímeros amorfos muestran diferentes propiedades físicas a una temperatura dada. A la temperatura ambiente, la goma natural es elástica, diversas resinas son vítreas y sólidas, y el chicle (del níspero sudamericano) es blando y gomoso (es el principal ingrediente de la goma de mascar).

A parte nuestros alimentos, que están principalmente constituidos por polímeros altos (carne, almidón, etc.), probablemente el polímero del que más depende el ser humano es la celulosa. Es el principal componente de la madera, material indispensable como combustible y muy útil en la construcción. La celulosa de la madera también se utiliza para fabricar papel. En las formas fibrosas puras del algodón y del lino, la celulosa ha sido el material textil más importante para el hombre, y, naturalmente, los químicos orgánicos de la mitad del siglo XIX recurrieron a la celulosa como materia prima para la elaboración de otras moléculas gigantes.

Una forma de modificar la celulosa es unir a ella el «grupo nitrato» de átomos (un átomo de nitrógeno y tres átomos de oxígeno) a las combinaciones-hidrógeno («grupos hidroxilos») en las unidades de glucosa. Cuando se hizo esto, tratando la celulosa con una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico, se creó un explosivo de poder sin paralelo hasta entonces. El explosivo fue descubierto por accidente en 1846 por el químico sueco de origen alemán llamado Christian Friedrich Schönbein (quien, en 1839, había descubierto el ozono). Había derramado una mezcla de ácido en la cocina (donde le estaba prohibido experimentar, haciéndolo por tanto en ausencia de su mujer) y, según cuenta la historia, cogió el delantal de algodón de su esposa, al objeto de limpiar el líquido derramado. Cuando colgó el delantal sobre el fuego para secarlo, se encendió sin dejar rastro de él.

Schönbein reconoció instantáneamente las posibilidades de su descubrimiento denominado «nitrocelulosa». Schönbein vendió la fórmula a varios Gobiernos. La

pólvora ordinaria producía tantos humos que ennegrecía el ánima de los cañones, que debían ser limpiados entre uno y otro disparo, y también daba lugar a tal cantidad de humo que, después de las primeras andanadas, las batallas tenían que librarse a ciegas. Por tanto, los Ministerios de Guerra se sintieron muy bien dispuestos ante la posibilidad de utilizar un explosivo que no sólo era más poderoso, sino que además, no producía humos. Las fábricas para la manufactura del algodón pólvora comenzaron a crecer, y desaparecieron casi tan rápidamente como habían nacido. El algodón pólvora era un explosivo demasiado peligroso; no esperaba a ser disparado. A principios de 1860, se había superado el *boom* del algodón pólvora, tanto de forma figurada como literalmente.

Sin embargo, más tarde se descubrieron nuevos métodos para eliminar las pequeñas cantidades de impurezas que favorecían la explosión del algodón pólvora. Entonces se hizo razonablemente seguro para ser manipulado. El químico inglés Dewar (famoso por el gas licuado) y su colaborador Frederick Augustus Abel, introdujeron la técnica, en 1889, de mezclarlo con la nitroglicerina y añadir vaselina a la mezcla para hacerla moldeable en cables (la mezcla fue llamada «cordita»). Lo que finalmente se obtuvo fue un polvo que no producía humos y era útil. La guerra de Cuba, de 1898, fue la última de cierta importancia en la que se utilizó la pólvora común.

(La Era de la máquina añadía también su aportación a los horrores de los armamentos. Hacia 1860, el inventor estadounidense Richard Gatling produjo la primera «ametralladora» para el disparo rápido de balas, y ésta fue mejorada por otro inventor del mismo país, Hiram Stevens Maxim, en 1880. El «arma de Gatling» dio origen al vocablo inglés *gat* para designar el arma. Ésta y su descendiente, la «Maxim», proporcionaron a los imperialistas desvergonzados de finales del siglo XIX una ventaja sin precedentes sobre las «razas inferiores», para utilizar la ofensiva frase de Rudyard Kipling, de África y Asia. Una canción popular dice: « ¡Sea lo que sea, hemos llevado el "Maxim", y ellos no lo tienen!»)

Los «progresos» de este tipo continuaron en el siglo xx. El explosivo más importante en la Primera Guerra Mundial fue el «trinitrotolueno», abreviado familiarmente como TNT. En la Segunda Guerra Mundial se utilizó un explosivo aún más poderoso, la «cyclonita». Ambos contienen el grupo nitro ( $\text{NO}_2$ ) en vez del

grupo nitrato ( $\text{NO}_2\text{O}$ ). Sin embargo, todos los explosivos químicos tuvieron que ceder el trono a las bombas nucleares en 1945 (véase capítulo IX).

La nitroglicerina, a su vez, fue descubierta en el mismo año que el algodón pólvora. Un químico italiano llamado Ascanio Sobrero trató la glicerina con una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico y supo que había descubierto algo importante cuando casi se mató a consecuencia de la explosión que le siguió. Sobrero, careciendo de los impulsos emocionales de Schönbein, consideró que la nitroglicerina era una sustancia demasiado peligrosa para ser manejada y apenas informó sobre ella. Pero, antes de que hubieran transcurrido 10 años, una familia sueca, los Nobel, la fabricaron como un «aceite explosivo», para utilizarlo en minería y en trabajos de construcción. Después de una serie de accidentes, incluyendo aquel que costó la vida a un miembro de la familia, el hermano de la víctima, Alfred Bernhard Nobel, descubrió un método para mezclar la nitroglicerina con una tierra comúnmente llamada *kieselguhr*, o «tierra de diatomeas» (el *kieselguhr* consta, sobre todo, de los delicados esqueletos de los organismos unicelulares llamados diatomeas). La mezcla consistía en tres partes de nitroglicerina y una de *kieselguhr*, pero era tal el poder absorbente de este último, que la mezcla era virtualmente un polvo seco. Una barrita de esta tierra (dinamita) impregnada podía ser dejada caer, percutida, incluso consumida por el fuego, sin explotar. Cuando se sometía a la acción de un percutor (accionado eléctricamente y a distancia), manifestaba todo el poder de la nitroglicerina pura.

Los percutores contenían explosivos sensibles que detonaban por el calor o por un golpe metálico y, por ello, se denominan «detonadores». La fuerte percusión de la detonación desencadena la de la dinamita, menos sensible. Parecía como si el peligro simplemente se trasladara desde la nitroglicerina a los detonadores, pero en realidad aquello no era tan malo como pueda parecer, ya que el detonador sólo se requiere en pequeñas cantidades. Los detonadores más utilizados son el fulminato de mercurio ( $\text{C}_2\text{N}_2\text{O}_2\text{Hg}$ ) y la ácida de plomo ( $\text{N}_6\text{Pb}$ ).

Los cartuchos de «dinamita» hicieron posible proveer al Oeste americano de raíles, minas, carreteras y diques, a una velocidad sin precedentes en la Historia. La dinamita, y otros explosivos que también descubrió, hicieron millonario al aislado e impopular Nobel (que fue calificado, a pesar de sus actividades humanitarias, de

«mercader de la muerte»). Cuando murió en 1896, legó un donativo del que derivaban los famosos premios Nobel, cada uno de los cuales asciende a la cifra de 40.000 dólares, que debían ser concedidos cada año en cinco campos distintos: Química, Física, Medicina y Fisiología, Literatura y paz.

Los primeros premios fueron otorgados el 10 de diciembre de 1901, en el quinto aniversario de su muerte, y con el tiempo se ha convertido en el mayor honor que

cualquier científico puede recibir. (Es lamentable que Nobel no pensara en la Astronomía y las ciencias de la Tierra, de forma que hombres tales como Shapley, Hubble y otros hubieran podido ser recompensados apropiadamente por su labor.)

Considerando la naturaleza de la raza humana, los explosivos continuaron formando una fracción mensurable de la actividad de los grandes científicos. Ya que, casi todos los explosivos contienen nitrógeno, la química de este elemento y sus compuestos era de importancia clave. (También es, debemos admitir, de importancia clave para la vida.)

El químico alemán Wilhelm Ostwald, que estaba interesado en la teoría química más que en los explosivos, estudió la velocidad a la que se producían las reacciones químicas. Aplicó a la química los principios matemáticos asociados a la Física, siendo así uno de los fundadores de la «Química-Física». A finales del pasado siglo y comienzos de éste, elaboró métodos para convertir el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) en óxidos de nitrógeno, que luego pudieron ser utilizados para la fabricación de explosivos. Por su labor teórica, particularmente sobre la catálisis, Ostwald recibió el premio Nobel de Química en 1909.

La última fuente de origen del nitrógeno utilizable era, en las primeras décadas del siglo xx, los depósitos de nitrato en el desierto del Noreste de Chile. Durante la Primera Guerra Mundial, estas regiones dejaron de ser alcanzables por los alemanes, por la intervención de la Marina inglesa. Sin embargo, el químico alemán Fritz Haber había ideado un método por el que el nitrógeno molecular del aire podía combinarse con el hidrógeno bajo presión, para formar el amoníaco necesario para el proceso de Ostwald. Este «proceso Haber» fue mejorado por el químico alemán Karl Bosch, quien supervisó la creación de industrias, durante la Primera Guerra Mundial, para la fabricación del amoníaco. Haber recibió el premio Nobel de Química en 1918, y Bosch lo compartió en 1931 (con Bergius).

Pero volvamos a la celulosa modificada. Claramente era la adición del grupo nitrato lo que la convertía en explosiva. En el algodón pólvora estaban nitrados todos los grupos hidróxilos disponibles. ¿Qué pasaría si sólo lo estuvieran algunos de ellos? ¿No serían menos explosivos?

En realidad, esta celulosa parcialmente nitrada no era en absoluto explosiva. Sin embargo, era consumida con rapidez por el fuego; el material fue denominado «piroxilina» (de las palabras griegas que significan «madera ígnea»).

La piroxilina podía ser disuelta en mezclas de alcohol y éter. (Esto fue descubierto, independientemente, por el estudiante francés Louis-Nicolas Ménard y un estudiante norteamericano de Medicina llamado J. Parkers Maynard. Se advierte una curiosa semejanza entre sus apellidos.) Cuando se evaporaban el alcohol y el éter, la piroxilina aparecía depositada en la forma de una película tenue y transparente, a la que se llamó «colodión». Su primera aplicación fue en forma de revestimiento sobre cortes de pequeña importancia y quemaduras; fue denominado «piel nueva». Sin embargo, las aventuras de la piroxilina sólo estaban comenzando. Todavía debían ocurrir muchas más.

La propia piroxilina es quebradiza en cantidad. El químico inglés Alexander Parkes descubrió que, si se disolvía en alcohol y éter se mezclaba con una sustancia tal como el alcanfor, por la evaporación del disolvente se formaba un sólido duro que se blandía y se hacía maleable al calentarse. Podía luego ser moldeado en cualquier forma deseada, forma que conservaba al enfriarse y endurecerse. Así, la nitrocelulosa se transformó en el primer «plástico artificial», y esto sucedió en el año 1865. El alcanfor, que introducía las propiedades plásticas en una sustancia por lo demás quebradiza, fue el primer «plastificante».

Lo que determinó que los plásticos llamaran la atención del público y lo convirtieran en algo más que una curiosidad química fue su espectacular presentación en la sala de billar. Las bolas de billar se fabricaban entonces de marfil, material que podía obtenerse del cadáver de un elefante. Naturalmente, esto creaba problemas. En los comienzos de 1860 se ofreció un premio de 10.000 dólares para el mejor sustituto del marfil que pudiera satisfacer las múltiples propiedades de una bola de billar, relativas a su dureza, elasticidad, resistencia al calor y a la humedad, ausencia de grano, etc. El inventor estadounidense John Wesley Hyatt fue uno de los que optó al

premio. No logró ningún resultado positivo hasta que tuvo noticias acerca del truco de Parkes de plastificar la piroxilina para convertirla en material moldeable, que podía transformarse en un sólido duro. Hyatt desarrolló métodos mejorados de fabricación del material, empleando menor cantidad de alcohol y éter (productos caros) y poniendo mayor atención en las condiciones de calor y presión utilizadas. Hacia 1869, Hyatt fabricaba baratas bolas de billar de este material, que él llamó «celuloide». Ganó el premio.

El celuloide resultó tener también importancia fuera de la mesa de billar. Era realmente versátil. Podía ser moldeado a la temperatura de ebullición del agua, podía ser cortado, torneado, serrado a temperaturas bajas, era fuerte y duro en bloque, pero podía ser producido en la forma de películas delgadas y flexibles que servían como collares, sonajeros para niños, etc. En la forma de una película aún más delgada y flexible podía ser utilizado como base para los compuestos de plata en gelatina y, de este modo, se convirtió en el primer filme fotográfico práctico.

El único defecto del celuloide era que, gracias a sus grupos nitrato, tenía la tendencia a quemarse con sorprendente rapidez, sobre todo cuando se hallaba en la forma de película fina. Por tal motivo fue la causa de una serie de tragedias.

La sustitución por grupos acetato ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ) de los grupos nitrato dio lugar a la formación de otro tipo de celulosa modificada, llamada «acetato de celulosa». Adecuadamente plastificada, tiene propiedades tan buenas, o casi tan buenas, como las del celuloide, y además la ventaja de que se quema con mucha menor facilidad. El acetato de celulosa empezó a utilizarse inmediatamente antes de la Primera Guerra Mundial, y, después de la guerra, remplazó completamente al celuloide en la fabricación de películas fotográficas y muchos otros objetos.

En el curso de medio siglo después del desarrollo del celuloide, los químicos se emanciparon en la dependencia a la celulosa como base de los plásticos. Ya en el año 1872, Baeyer (que más tarde sintetizaría el índigo) había indicado que cuando se calentaban conjuntamente los fenoles y aldehídos se obtenía como resultado una masa resinosa. Ya que estaba interesado sólo en las pequeñas moléculas que podía aislar de la reacción, ignoró esta masa en el fondo del recipiente (como típicamente hacían los químicos orgánicos del siglo XIX cuando los precipitados ensuciaban sus recipientes de vidrio). Treinta y siete años más tarde, el químico americano de

origen belga Leo Hendrik Baekeland, experimentando con el formaldehído, halló que, en ciertas condiciones, la reacción podía dar lugar a una resina que, al seguir siendo calentada bajo presión, se convertía primero en un sólido blando, y luego en una sustancia dura e insoluble. Esta resina podía ser moldeada mientras era blanda y luego dejar que se endureciera y adoptara una forma permanente. O, una vez dura, podía ser transformada en polvo, vertida en un molde y transformada en una pieza de forma determinada bajo la acción del calor y la presión. Podían moldearse formas muy complejas con facilidad y rapidez. Además, el producto era inerte e inalterable por la mayoría de los agentes ambientales.

Baekeland denominó a su producto baquelita, inspirándose en su propio nombre. La baquelita pertenece a la clase de los plásticos «termoestables» que, una vez se han enfriado, no pueden ablandarse de nuevo mediante el calor (aunque, por supuesto, pueden ser destruidos por el calor intenso). Materiales tales como los derivados de la celulosa, que pueden ser convertidos reiteradas veces en materiales blandos, son llamados «termoplásticos». La baquelita tiene numerosos usos: como aislante, adhesivo, agente laminante, etc. Aún cuando es el más antiguo de los plásticos termoestables, sigue siendo el más utilizado.

La baquelita fue el primer polímero alto de utilidad producido en el laboratorio a partir de moléculas pequeñas. Por vez primera, el químico había logrado alcanzar completamente este particular objetivo perseguido. Por supuesto, no representa una síntesis en el sentido de la síntesis de la heme o la quinina, donde los químicos deben colocar hasta el último átomo en la posición apropiada, casi uno cada vez. En cambio, la producción de polímeros altos requiere simplemente que las unidades pequeñas, de las que está compuesto, se mezclen bajo las condiciones apropiadas. Entonces se pone en marcha una reacción en la que las unidades forman automáticamente una cadena, sin la intervención específica, punto a punto, del químico. Sin embargo, el químico puede alterar indirectamente la naturaleza de la cadena al variar los materiales de partida o las proporciones entre ellos o por la adición de pequeñas cantidades de ácidos, álcalis o diversas sustancias que actúan como «catalizadores» y tienden a guiar la naturaleza precisa de la reacción.

Naturalmente, con el éxito de la baquelita, los químicos recurrieron a otros posibles materiales de partida, en su búsqueda de más polímeros altos sintéticos, que

pudieran ser plásticos de utilidad. Y, con el transcurrir del tiempo, obtuvieron reiteradas veces satisfactorios resultados.

Por ejemplo, los químicos británicos descubrieron en la década de 1930 que el gas etileno ( $CH_2=CH_2$ ), bajo la acción del calor y la temperatura, podía formar cadenas muy largas. Uno de los dos enlaces, en el doble enlace entre los átomos de carbono, se abre y se une a una molécula próxima. Cuando esto ocurre una y otra vez, se produce una molécula de cadena larga llamada «polietileno».

La molécula de cera-parafina es una cadena larga constituida por las mismas unidades, pero la molécula del polietileno aún es más larga. Así, pues, el polietileno es por ello similar a la cera, pero sus propiedades son aún más notables. Tiene la blancura nebulosa de la cera, es suave al tacto, posee las propiedades aislantes eléctricas, el ser impermeables al agua, y la ligereza (puede decirse que es el único plástico que flota en el agua). Sin embargo, tiene la ventaja de ser mucho más resistente y flexible que la parafina.

Cuando se fabricó por primera vez, el polietileno requería presiones peligrosas, y el producto tenía un punto de fusión más bien bajo: exactamente, por encima del punto de ebullición del agua. Se ablandaba hasta ser inutilizable a temperaturas por debajo del punto de ebullición. Aparentemente, esto era debido al hecho de que la cadena de carbono tenía ramas que impedían que las moléculas se dispusieran íntimamente próximas entre sí, adoptando una estructura cristalina. En 1953, un químico alemán llamado Karl Ziegler halló una forma para producir cadenas de polietileno no ramificadas, y sin la necesidad de presiones elevadas. El resultado fue una nueva variedad de polietileno, más resistente y fuerte que el antiguo y capaz de resistir las temperaturas de ebullición del agua sin ablandarse demasiado. Ziegler logró esto utilizando un nuevo tipo de catalizador, una resina con iones de metales tales como el aluminio y el titanio unidos a grupos cargados negativamente a lo largo de la cadena.

Al tener noticia sobre el desarrollo por Ziegler de catalizadores órgano-metálicos para la formación de polímeros, el químico italiano Giulio Natta comenzó a aplicar la técnica al propileno (etileno al que se unió un pequeño grupo metílico de un solo átomo de carbono, el  $CH_3-$ ). En el curso de 10 semanas, halló que en el polímero resultante todos los grupos metílicos mostraban la misma dirección, aunque (como

era usual en la formación de polímeros antes de aquel tiempo) dirigido al azar, en cualquier dirección. Tales «polímeros isotácticos» (el nombre fue propuesto por la signora Natta) resultaron tener útiles propiedades, y éstos pueden ahora ser fabricados virtualmente a voluntad. En otras palabras, los químicos pueden idear polímeros con mayor precisión de lo que hasta ahora han solidado hacer. Por su labor en este campo, Ziegler y Natta compartieron el premio Nobel de Química de 1963.

El proyecto de la bomba atómica contribuyó aportando otro polímero alto de utilidad, en la forma de un pariente singular del polietileno. En la separación del uranio 235 del uranio natural, los físicos nucleares tenían que combinar el uranio con el flúor en el compuesto gaseoso hexafloruro de uranio. El flúor es la más activa de todas las sustancias y ataca casi cualquier cosa. Intentando hallar lubricantes y sustancias para cerrar sus recipientes, al objeto de que fueran inatacables por el flúor, los físicos recurrieron a los «fluorocarbonos», sustancias en las que el carbono se hallaba combinado con el flúor (que remplaza al hidrógeno).

Hasta entonces, los fluorocarbonos habían sido sólo curiosidades de laboratorio. La primera y más simple de este tipo de moléculas, el «tetrafluoruro de carbono» ( $F_4C$ ), había sido obtenida en forma pura en 1926. La química de estas sustancias fue estudiada intensamente. Entre los fluorocarbonos estudiados se hallaba el «tetrafluoruro etílico» ( $F_2C=F_2C$ ), que había sido sintetizado por vez primera en 1933 y que es, como se puede ver, etileno con sus 4 «hidrógenos» remplazados por 4 átomos de flúor. Alguien debió pensar que el tetrafluoruro etílico podía polimerizarse como el etileno. Después de la guerra, los químicos de la «Du Pont» produjeron un polímero de cadena larga cuya estructura,  $F_2CF_2CF_2C$ , era tan monótona como la del polietileno,  $H_2CH_2CH_2C\dots$ . Su nombre comercial es «Teflón» (el radical «tefl» proviene de una abreviatura de la palabra «tetrafluoro»).

El «Teflón» es similar al polietileno. Los enlaces de carbono-flúor son más fuertes que los de carbono e hidrógeno y ofrecen menos oportunidad de interferencia del medio ambiente. El «Teflón» es insoluble en todo, no se moja con nada, es un aislante eléctrico extremadamente bueno y mucho más resistente al calor que incluso el nuevo y mejorado polietileno. La aplicación conocida del «Teflón», por lo que se refiere a los usos que de él puede hacer el ama de casa, es un revestimiento

de las sartenes, que permite que los alimentos sean fritos sin grasa, ya que la grasa no se pega al polímero de fluorocarbonado que la repele.

Un compuesto interesante que no es exactamente un fluorocarbono es el «Freón» ( $F_2CL_2C$ ), introducido en 1932 como refrigerante. Es más caro que el amoníaco o el dióxido de azufre utilizados en los congeladores a gran escala, pero, por otra parte, el «Freón» es inodoro, atóxico e ininflamable, de tal modo que cualquier fuga accidental representa un peligro mínimo. Gracias al «Freón», los acondicionadores de aire en las habitaciones se han convertido en algo muy característico de la escena norteamericana desde la Segunda Guerra Mundial.

Por supuesto, las propiedades plásticas no pertenecen sólo al mundo orgánico. Una de las más antiguas de todas las sustancias plásticas es el vidrio. Las grandes moléculas del vidrio son esencialmente cadenas de átomos de sílice y oxígeno; es decir, -Si-O-Si-O-Si-O-Si-, y así indefinidamente. Cada átomo de sílice en la cadena tiene dos enlaces no ocupados, a los que pueden añadirse otros grupos. El átomo de sílice, de forma similar al átomo de carbono, tiene 4 enlaces de valencia. Sin embargo, el enlace sílice-sílice es más débil que el enlace carbono-carbono, de tal modo que sólo se forman cadenas cortas de sílice, y aquéllas (en los compuestos llamados «silanos») son inestables.

Sin embargo, el enlace sílice-oxígeno es muy fuerte y en tales cadenas aún son más estables que aquéllas del carbono. En realidad, puesto que la corteza de la Tierra es la mitad oxígeno y una cuarta parte de sílice, la base sólida sobre la que nos hallamos puede considerarse esencialmente como una cadena de sílice-oxígeno.

Aunque la belleza y utilidad del vidrio (un tipo de arena que se ha hecho transparente) son infinitas, posee la gran desventaja de romperse, y, en el proceso de rotura, produce fragmentos duros y cortantes, que pueden ser peligrosos e incluso mortales. Un parabrisas de automóvil, por efecto de un golpe, puede convertirse en una granada de metralla.

No obstante, el vidrio puede ser preparado como una lámina doble entre las que se coloca una delgada capa de un polímero transparente, que se endurece y actúa como un adhesivo. Éste es el «vidrio de seguridad», pues, cuando es roto, e incluso se lo intenta pulverizar, cada pieza es mantenida firmemente en su lugar por el polímero. Ninguno vuela en misiones mortales. Originalmente, ya en el año 1905,

se utilizó el colodión como adhesivo, pero luego ha sido remplazado en su mayor parte por polímeros constituidos por moléculas pequeñas, tales como el cloruro de vinilo. (El cloruro de vinilo es similar al etileno, salvo por el hecho de que los átomos del hidrógeno están remplazados por un átomo de cloro.) La «resina vinícola» no es decolorada por la luz, de tal modo que puede confiarse que el vidrio de seguridad no adquirirá un tinte amarillento con el transcurso del tiempo.

Luego existen los plásticos transparentes que pueden remplazar completamente al vidrio, al menos en algunas aplicaciones. Hacia 1935, «Du Pont» polimerizó una pequeña molécula llamada metil metacrilato y moldeó el polímero resultante (un «plástico poliacrílico») en láminas claras y transparentes. Los nombres comerciales de estos productos son «Plexiglás» y «Lucita». Tal «vidrio orgánico» es más ligero que el vidrio ordinario, más fácilmente moldeado, menos quebradizo y, simplemente, al romperse se agrieta en vez de saltar en astillas. Durante la Segunda Guerra Mundial, las láminas plásticas transparentes modeladas adquirieron una importante aplicación como ventanas y cúpulas transparentes en los aviones, donde tiene particular importancia la transparencia y el que no sean quebradizas. Pero los plásticos poliacrílicos tienen sus desventajas. Son afectados por los disolventes orgánicos, se ablandan más fácilmente por el calor que el vidrio y se rayan con facilidad. Los plásticos poliacrílicos utilizados en las ventanas de los automóviles, por ejemplo, se rayarían rápidamente bajo el impacto de las partículas de polvo y se volverían peligrosamente nebulosos. En consecuencia, con mucha probabilidad el vidrio no podrá ser totalmente remplazado. En realidad, actualmente se está desarrollando una nueva versatilidad. Las fibras de vidrio han sido tejidas en materiales textiles que tienen todas la flexibilidad de las fibras orgánicas, y la inestimable ventaja adicional de ser totalmente incombustibles.

Además de los sustitutivos del vidrio, existe lo que puede llamarse un compromiso de vidrio. Como he dicho, cada átomo de sílice en una cadena de sílice-oxígeno tiene dos enlaces disponibles para unirse a otros átomos. En el vidrio aquellos otros átomos son átomos de oxígeno, pero no precisan serlo. ¿Qué ocurriría si se unieran grupos que contienen carbono en vez de oxígeno? Se tendría entonces una cadena inorgánica con cadenas laterales orgánicas.

Así, pues, puede decirse que se trata de un compromiso entre un material orgánico y otro inorgánico. Ya en el año 1908, el químico Inglés Frederic Stanley Kipping formó tales compuestos, y ahora se los conoce como «siliconas».

Durante la Segunda Guerra Mundial, las «resinas de silicona» de larga cadena adquirieron gran importancia. Tales siliconas son esencialmente más resistentes al calor que los polímeros orgánicos por completo. Al variar la longitud de la cadena y la naturaleza de las cadenas laterales, puede obtenerse una serie de propiedades deseables no poseídas por el propio vidrio. Por ejemplo, algunas siliconas son líquidas a la temperatura ambiente y cambian muy poco en su viscosidad en un amplio campo de valores de temperatura. (Es decir, no se licuan con el calor o aumentan de viscosidad con el frío.) Ésta es una propiedad particularmente útil para el fluido hidráulico, el tipo de fluido usado, por ejemplo, para bajar el tren de aterrizaje de los aviones. Otras siliconas forman sustancias de cierre blandas, como si fueran de masilla, que no se endurecen o rompen a las bajas temperaturas de la estratosfera y repelen el agua. Existen otras siliconas que sirven para lubricantes resistentes a los ácidos, etc.

Hacia fines de la década de 1960 se utilizaban ya toda clase de plásticos a razón de 7.000.000 Tm por año, lo cual planteaba un serio problema respecto a la eliminación de desperdicios.

En 1962 se anunció la posible utilización de un polímero definitivamente asombroso, cuyas derivaciones potenciales teóricas eran fascinantes. Durante aquel año, el físico soviético Boris Vladimirovich Deriaguin informó que el agua, conducida por tubos muy delgados, parecía adquirir propiedades extraordinariamente peculiares. Casi todos los químicos se mostraron escépticos. Sin embargo, poco tiempo después, los investigadores estadounidenses confirmaron el hallazgo de Deriaguin. Al parecer, ocurría lo siguiente: cuando se les imponía unas condiciones restringentes, las moléculas de agua se alineaban ordenadamente y sus átomos se aproximaban unos a otros bastante más que en condiciones ordinarias. La estructura semejaba un polímero compuesto por unidades  $\text{H}_2\text{O}$ . Desde entonces se empleó la expresión «agua polimerizante».

El agua polimerizante era 1,4 veces más densa que el agua ordinaria, soportaba una temperatura de 500º C sin entrar en ebullición, y sólo se congelaba, formando

un hielo vidrioso, a los -40º C. Lo más interesante para los biólogos fue la posibilidad de que ese agua polimerizante existiera en los recónditos confines de la célula interna, y que sus propiedades constituyeran la clave de algún proceso vital. Sin embargo, los laboratorios químicos empezaron a divulgar informes en los que se advertía que ese agua polimerizante era, probablemente, un agua ordinaria que tal vez hubiera disuelto el silicato sódico de materias vítreas o se hubiese contaminado con la transpiración. En suma, el agua polimerizante era tan sólo agua impura. El peso de la evidencia pareció hacer derivar aquel asunto hacia lo negativo. Así, pues, se descartó el agua polimerizante tras su breve pero agitada vida..., no obstante, la controversia no ha dado fin todavía a la hora de escribir estas líneas.

### **Las Fibras**

Las fibras sintéticas suponen un capítulo particularmente interesante en la historia de la síntesis orgánica.

Las primeras fibras artificiales (al igual que los primeros plásticos) fueron elaboradas a partir de la celulosa. Naturalmente, los químicos empezaron a partir del nitrato de celulosa, ya que se disponía de él en cantidades razonables, disolvió el nitrato de celulosa en una mezcla de alcohol y éter, e hizo pasar la densa solución resultante a través de pequeños orificios. Cuando la solución se dispersó, el alcohol y el éter se evaporaron, dando lugar a que el nitrato de celulosa adquiriera la forma de finos filamentos de colodión. (Ésta es, esencialmente, la forma en que las arañas y gusanos de seda forman sus hilos. A través de finos orificios expulsan un líquido que se convierte en una fibra sólida al exponerse al aire.) Las fibras de nitrato de celulosa eran demasiado inflamables para ser utilizadas, pero los grupos nitrato podían eliminarse mediante un tratamiento químico apropiado, y el resultado fue un hilo de celulosa lustroso que se asemejaba a la seda.

Por supuesto, el método de Chardonnet era caro, dado que primero debían introducirse grupos nitrato para luego ser eliminados, sin tomar en consideración el peligroso interludio mientras se hallaban en su lugar y el hecho que la mezcla de alcohol-éter utilizada como disolvente también era peligrosamente inflamable. En 1892 se descubrieron métodos para disolver la propia celulosa. El químico inglés Charles Frederick Cross, por ejemplo, la disolvió en disulfuro de carbono y formó un

filamento a partir de la solución viscosa resultante (llamada «viscosa»). El problema en este caso consistía en que el disulfuro de carbono es inflamable, tóxico y de mal olor. En 1903, se inició el empleo de un método competitivo que empleaba ácido acético como parte del disolvente, y daba lugar a una sustancia llamada acetato de celulosa.

Estas fibras artificiales fueron en principio denominadas «seda artificial», pero posteriormente recibieron el nombre de «rayón», debido a que por su brillo reflejaban los rayos de la luz.

Las dos principales variedades de rayón se distinguen usualmente como «rayón viscosa» y el «rayón acetato».

La viscosa puede ser impulsada a través de una hendidura para formar una lámina delgada, flexible, impermeable al agua y transparente («celofán»), proceso este inventado por el químico francés Jacques-Edwin Brandenberger en 1908. Algunos polímeros sintéticos también pueden ser inducidos a pasar a través de una hendidura con el mismo fin. Las resinas vinílicas, por ejemplo, dan lugar a un material de revestimiento llamado «Saran».

En el año 1930 nació la primera fibra completamente sintética.

Permítaseme empezar diciendo algo acerca de la seda. La seda es un producto animal elaborado por ciertos gusanos que son exigentes en cuanto se refiere a sus necesidades de comida y cuidados. La fibra debe ser tediosamente desovillada a partir de sus capullos. Por estos motivos, la seda es cara y no puede ser producida en masa.

Fue producida por vez primera en China hace más de 2000 años, y el secreto de su preparación fue celosamente guardado por los chinos, de tal modo que pudieron crear un lucrativo monopolio para la exportación.

Sin embargo, pese a todo, los secretos no pueden ser guardados eternamente, a pesar de todas las medidas de seguridad. El secreto se extendió a Corea, Japón y la India. La antigua Roma recibía la seda a través de una larga ruta que atravesaba Asia, obteniendo cada uno de los innumerables intermediarios en dicha ruta su ganancia; de esta forma, la fibra apenas podía ser adquirida salvo por los más acaudalados. En el año 150 d. de J.C., huevos de gusano de seda fueron robados en Constantinopla, y se inició así la producción de seda en Europa. No obstante, la

seda ha seguido siendo un objeto más o menos de lujo. Además, hasta hace poco no existía ningún buen sustitutivo. El rayón pudo imitar su brillo, pero no su transparencia o resistencia.

Después de la Primera Guerra Mundial, cuando las medias de seda se convirtieron en un objeto indispensable del guardarropa femenino, se hizo muy fuerte la presión para la obtención de mayores cantidades de seda o de algún adecuado sustitutivo de la misma. Esto ocurrió particularmente en los Estados Unidos, donde la seda era utilizada en grandes cantidades y donde las relaciones con el principal proveedor, el Japón, estaban empeorando de forma gradual. Los químicos soñaban en el modo de obtener una fibra que pudiera compararse con ella.

La seda es una proteína. Su molécula está constituida por monómeros «aminoácidos» que, a su vez, contiene grupos «amino» (-NH<sub>2</sub>) y «carboxilo» (-COOH). Los dos grupos se hallan unidos entre sí por un átomo de carbono; representando al grupo amino por *a* y al grupo carboxilo por *c*, y al carbón interpuesto por un guion, podemos escribir un aminoácido de la siguiente manera: *a - c*. Estos aminoácidos se polimerizan de tal modo que el grupo amino de uno se condensa con el grupo carboxilo del siguiente. Así, la estructura de la molécula de la seda es similar a ésta: ...*a - c. a - c . a - c . a - c...*

En los años 30, un químico de «Du Pont», llamado Wallace Hume Carothers, investigaba las moléculas que contenían grupos amino y grupos carboxilo, con la esperanza de descubrir un método para condensarlos de tal forma que dieran lugar a moléculas con grandes anillos. (Tales moléculas tienen importancia en la perfumería.) En vez de esto halló que se condensaban formando moléculas de cadena larga.

Carothers ya había sospechado que eran posibles cadenas largas y, por supuesto, el resultado no le cogió de sorpresa. Perdió poco tiempo en seguir este desarrollo. Formó fibras a partir de ácido adípico y la hexametilendiamina. La molécula de ácido adípico contiene dos grupos carboxílicos separados por cuatro átomos de carbono, de tal modo que puede simbolizarse de la siguiente manera: *c - - - - c*. La hexametilendiamina consiste de dos grupos amínicos separados por 6 átomos de carbono, así, pues: *a - - - - - a*. Cuando Carothers mezcló las dos sustancias, se condensaron para formar un polímero similar al siguiente: ...*a - - - - - a . c - - - - c*

. a - - - - a . c - - - c . a - - - - a... Los lugares en los que tiene lugar la condensación tienen la configuración c.a hallada en la seda, tal como se podrá apreciar.

Al principio, las fibras producidas no eran muy buenas. Resultaban demasiado débiles. Carothers decidió que el problema radicaba en la presencia de agua producida en el proceso de condensación. El agua provocaba una reacción de hidrólisis que impedía el que prosiguiera la polimerización. Carothers halló un método para resolver esta cuestión: logró realizar la polimerización bajo presión reducida; de tal modo que el agua se evaporaba (y se eliminaba fácilmente, dejando que se condensara sobre una superficie de vidrio enfriada mantenida en las proximidades del líquido reaccionante, e inclinada de tal modo que alejaba al agua: un «destilador molecular»).

Entonces la polimerización podía proseguir indefinidamente. Dio lugar a hermosas cadenas rectas y largas y, por último, en 1935. Carothers tenía la base para la fibra soñada.

El polímero formado a partir del ácido adípico y la heximetilendiamina fue fundido y empujado a través de orificios. Luego fue estirado hasta que las fibras estuvieron juntas formando haces cristalinos. El resultado fue un filamento brillante similar al de la ceda, que podía ser utilizado para tejer una tela tan transparente y hermosa como la seda, e incluso más fuerte. Esta primera fibra completamente sintética fue llamada «nylon» (nilón).

Carothers no consiguió vivir para ver cómo fructificaba su descubrimiento, falleció en 1937.

«Du Pont» anunció la existencia de la fibra sintética en 1938 y empezó a producirla comercialmente en 1939. Durante la Segunda Guerra Mundial, las fuerzas armadas de los Estados Unidos utilizaron la producción de nilón para los paracaídas y otros centenares de fines. Pero, después de la guerra, el nilón remplazó completamente a la seda para prendas interiores.

El nilón abrió la senda para la producción de otras muchas fibras sintéticas. El acrilonitrilo o cianuro de vinilo ( $\text{CH}_2 = \text{CNCH}$ ) puede lograrse que polimerice en una cadena larga similar a aquella del polietileno, pero con grupos cianuro (en este caso totalmente atóxicos) unidos a cada átomo de carbono. El resultado, introducido en

1950, es el «Orlón». Si el cloruro de vinilo ( $\text{CH}_2 = \text{ClCH}$ ) se añade, de tal modo que la cadena contenga tantos átomos de cloro como grupos cianuro, se obtiene el «Dynel». O la adición de grupos acetato, utilizando el acetato de vinilo ( $\text{CH}_2 = \text{CH}_3\text{CHOOC}$ ), da lugar al «Acrilán».

En 1941, los británicos crearon una fibra «poliéster», en la que el grupo carboxilo de un monómero se condensa con el grupo hidróxilo de otro. El resultado es la usual cadena larga de átomos de carbono, rota en este caso por la inserción periódica de un oxígeno en la cadena. Los británicos la llamaron «Terylene», pero en los Estados Unidos ha aparecido con el nombre de «Dacrón».

Estas nuevas fibras sintéticas repelen aún más el agua que las fibras naturales; resisten el vapor y no son fácilmente teñidas. No son destruidas por la polilla y otros insectos. Algunas son resistentes al arrugado y pueden utilizarse para fabricar prendas de «lavar y poner».

## Gomas

Es un tanto sorprendente apreciar que el ser humano va sobre ruedas de caucho desde hace sólo un centenar de años. Durante miles de años ha viajado sobre ruedas de madera o metal. Cuando el descubrimiento de Goodyear hizo posible utilizar el caucho vulcanizado, a una serie de personas se les ocurrió que en torno a las ruedas podría colocarse caucho en vez de metal. En 1845, un ingeniero británico, Robert William Thomson, sustituyó esta idea por una mejor: patentó un dispositivo que consistía en un tubo de goma inflado, que podía adaptarse a una rueda. Hacia 1880, los «neumáticos» eran utilizados ya usualmente en las bicicletas y, en 1895, se emplearon en los carroajes tirados por caballos.

Aunque parezca chocante, el caucho, una sustancia relativamente débil y blanda, resultó ser mucho más resistente a la abrasión que la madera o el metal. Esta duración, junto con sus cualidades de absorción de los choques y la idea de un cojín de aire, proporcionó al ser humano una comodidad sin precedentes en los desplazamientos.

Al aumentar la importancia del automóvil, se incrementó astronómicamente la demanda de neumáticos de caucho. En medio siglo, la producción mundial de caucho aumentó 42 veces. Puede tenerse una idea de la cantidad de éste utilizado

para los neumáticos en la actualidad, si indico que en los Estados Unidos dejan no menos de 200.000 Tm de residuos de goma sobre las autopistas cada año, a pesar de la cantidad relativamente pequeña de goma sometida a la abrasión procedente de los neumáticos de un solo automóvil.

La creciente demanda de caucho introdujo una cierta inseguridad en los aprovisionamientos con destino bélico de muchas naciones. Puesto que la guerra se mecanizaba, los Ejércitos y el armamento empezaban a moverse sobre goma, y el caucho solamente podía obtenerse en cantidades apreciables en la península malaya, muy lejana de las naciones «civilizadas», que con mayor probabilidad se verían envueltas en una guerra «civilizada». (La Península de Malaca no es el hábitat natural del árbol del caucho. El árbol fue trasplantado allí, con gran éxito, procedente del Brasil, donde han disminuido constantemente las existencias originales de caucho.) Los suministros de los Estados Unidos fueron cortados, al iniciarse su entrada en la Segunda Guerra Mundial, cuando los japoneses conquistaron Malaca. Las aprensiones norteamericanas en este sentido determinaron el hecho que el primer artículo racionado durante la guerra, incluso antes del ataque a Pearl Harbor, fueran los neumáticos de goma.

En la Primera Guerra Mundial, cuando la mecanización estaba empezando. Alemania fue perjudicada al serle intervenidos los suministros de caucho por el poder naval aliado.

Durante la Primera Guerra Mundial, existieron razones para considerar la posibilidad de fabricar un caucho sintético. El material de partida natural para tal goma sintética era el isopreno, el sillar de la goma natural. Ya en 1880, los químicos habían apreciado que al dejar reposar el isopreno, éste tendía a hacerse gomoso y, si se acidificaba, se convertía en un material similar a la goma. El káiser Guillermo II tenía los neumáticos de su automóvil oficial hechos de tal material, como una especie de reclamo publicitario del virtuosismo químico alemán.

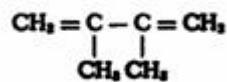
Sin embargo, existían dos obstáculos para utilizar el isopreno como material de partida para sintetizar la goma. Primero, la única fuente importante de isopreno era la propia goma. Segundo, cuando el isopreno se polimeriza, es más probable que lo haga de una forma totalmente al azar. La cadena de la goma posee todas las unidades de isopreno orientadas de la misma manera: - - - uuuuuuuuu - - -. La

cadena de la gutapercha los tiene orientados de forma estrictamente alternada: - - - unununununun - - - . Sin embargo, cuando el isopreno es polimerizado en el laboratorio en condiciones ordinarias, las *us* y *enes*, se mezclan al azar, formando un material que no es ni goma ni gutapercha. Al no poseer la flexibilidad ni la elasticidad de la goma, carece de utilidad para la fabricación de neumáticos de automóvil.

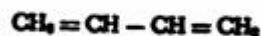
Catalizadores semejantes a aquellos que Ziegler introdujo en 1953 para fabricar el polietileno hicieron posible polimerizar el isopreno en un producto casi idéntico al caucho natural, pero en aquel entonces ya se habían desarrollado muchas gomas sintéticas de utilidad, químicamente muy distintas de la goma natural.

Por supuesto, los primeros esfuerzos se concentraron en el intento de formar polímeros a partir de compuestos fácilmente disponibles y que se asemejaran al isopreno.

Por ejemplo, durante la Primera Guerra Mundial, bajo el acicate de la necesidad de caucho, Alemania hizo uso del dimetilbutadieno:



No obstante, el dimetilbutadieno difiere del isopreno sólo en que contiene un grupo metilo ( $\text{CH}_3$ ) en los dos carbonos centrales de la cadena de 4 átomos de carbono, en vez de sólo sobre uno de ellos. El polímero formado a partir del dimetilbutadieno, llamado «goma metilada», pudo obtenerse a bajo costo y en cantidades apreciables. Alemania produjo, aproximadamente, 2.500 Tm de ella durante la Primera Guerra Mundial. Si bien no es muy resistente a la fatiga fue, no obstante, la primera de las gomas sintéticas utilizables. Hacia 1930, tanto Alemania como la Unión Soviética probaron nuevos procedimientos. Utilizaron como monómero el butadieno que no tenía ningún grupo metilo:

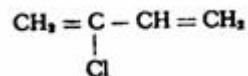


Utilizando sodio metal como catalizador obtuvieron un polímero llamado «Buna», (de «butadieno» y *Na*, símbolo del sodio).

La goma Buna era un caucho sintético que podía ser considerado satisfactorio en caso de apuro. Fue mejorado por la adición de otros monómeros, que alternaban con el butadieno a intervalos en la cadena. La adición más satisfactoria fue el «estireno», un compuesto similar al etileno, pero con un anillo de benceno unido a uno de los átomos de carbono. Este producto fue llamado Buna S.

Sus propiedades eran muy similares a las de la goma natural y, en realidad, gracias a ella, las fuerzas armadas alemanas no sufrieron una grave carencia de goma en la Segunda Guerra Mundial. La Unión Soviética también dispuso de suministros adecuados de caucho de la misma manera. Las materias primas podían obtenerse a partir del carbón o el petróleo.

Los Estados Unidos desarrollaron tardíamente la goma sintética en cantidades comerciales, quizá debido a que antes de 1941 no existió un peligro de carencia de goma. Pero, después de Pearl Harbor, fabricaron goma sintética en cantidad. Empezaron a producir la goma Buna y otro tipo de goma sintética llamada «neopreno», obtenida a base del «cloropreno»:



Como puede verse, esta molécula se parece al isopreno, salvo por la sustitución del grupo metilo por un átomo de cloro.

Los átomos de cloro unidos a intervalos a la cadena del polímero confieren al neopreno una cierta resistencia que no posee la goma natural. Por ejemplo, es más resistente a los disolventes orgánicos tales como la gasolina: no se ablanda y esponja como lo haría la goma natural. Así, el neopreno es realmente preferible a la goma para usos tales como los tubos flexibles para la conducción de gasolina. El neopreno demostró claramente, por vez primera, que en el campo de las gomas sintéticas, como en otros muchos campos, el producto del tubo de ensayo no precisaba ser un mero sustituto del natural, sino que incluso podía perfeccionarlo.

Los polímeros amorfos sin semejanza química con la goma natural, pero con cualidades similares a las de la goma, han sido producidos ahora y ofrecen toda una constelación de propiedades deseables. Ya que realmente no son gomas, son denominados «elastómeros» (una abreviatura de «polímeros elásticos»).

El primer elastómero distinto de la goma fue descubierto en 1918. Éste era una «goma de polisulfuro»; su molécula era una cadena compuesta de pares de átomos de carbono que alternaban con grupos de cuatro átomos de azufre. La sustancia fue denominada «Thiokol», procediendo el prefijo de la palabra griega para el azufre. El olor asociado a su preparación impidió durante largo tiempo que fuera producido comercialmente.

También se han formado elastómeros a partir de monómeros acrílicos, fluorocarbonos y siliconas. Aquí, como en casi todo campo que toca, el químico orgánico trabaja como un artista, utilizando materiales para crear nuevas formas y aventajar a la Naturaleza.

## Capítulo 11

### LAS PROTEÍNAS

#### **Moléculas De Importancia Crucial Para La Vida**

Al iniciar sus estudios sobre la materia viva, los químicos se percataron de la existencia de un extenso grupo de sustancias que se comportaban de una manera peculiar. El calentamiento transformaba el estado de estas sustancias de líquido en sólido, en lugar de ocurrir lo contrario. La clara de huevo, una sustancia en la leche (caseína) y un componente de la sangre (globulina), se hallaban entre los compuestos que mostraban esta propiedad. En 1777, el químico francés Pierre-Joseph Macquer incluyó a todas las sustancias que coagulaban al ser calentadas en una clase especial que denominó «albúminas», por el término *albumen* dado por el naturalista romano Plinio a la clara de huevo.

Cuando los químicos del siglo XIX procedieron al análisis de las sustancias albuminoides, descubrieron que estos compuestos eran considerablemente más complejos que otras moléculas orgánicas. En 1839, el químico holandés Gerardus Johannes Mulder estableció la fórmula general  $C_{40}H_{62}O_{12}N_{10}$ , que supuso tenían en común las sustancias albuminoides. Consideró que los diversos compuestos albuminoides se formaban por la adición a esta fórmula básica de pequeños grupos que contenían azufre o fósforo. Mulder denominó a su fórmula general «proteína» (palabra que le sugirió el inveterado acuñador de términos Berzelius), a partir del vocablo griego que significa «de importancia primordial». Tal vez con este término quiso indicar simplemente que esta fórmula básica era de fundamental importancia para la determinación de la estructura de las sustancias albuminoides, pero los ulteriores acontecimientos demostraron que también era una palabra muy adecuada para describir a las propias sustancias. Pronto se apreció que las «proteínas», tal como en la actualidad se las denomina, eran de importancia crucial para la vida.

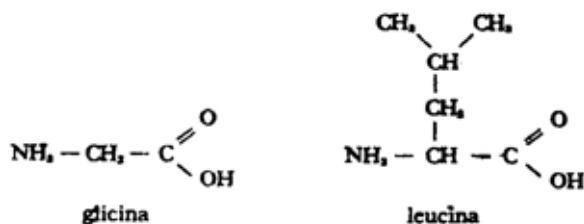
En el curso de la década que siguió a los trabajos de Mulder, el gran químico orgánico alemán Justus von Liebig estableció que las proteínas eran aún de mayor importancia para la vida que los hidratos de carbono o las grasas; no sólo aportaban carbono, hidrógeno y oxígeno, sino también nitrógeno, azufre y a menudo fósforo, elementos que se hallan ausentes en las grasas e hidratos de carbono.

En la época en que se efectuaron los intentos de Mulder y otros investigadores para establecer las fórmulas empíricas completas de las proteínas estaban condenados al fracaso. La molécula proteica era demasiado complicada para ser analizada por los métodos entonces conocidos. Sin embargo, ya se habían conseguido los primeros avances en otra línea de ataque, aquella que eventualmente perseguía revelar no sólo la composición, sino también la estructura de las proteínas. Los químicos habían empezado a aprender algo acerca de los sillares que las constituían.

En 1820, Henri Braconnot, que había conseguido degradar la celulosa en sus unidades de glucosa mediante el calentamiento de aquella en ácido (véase capítulo X), decidió ensayar el mismo método en la gelatina, una sustancia albuminoide. El tratamiento produjo una sustancia cristalina dulce. A pesar de las primeras sospechas de Braconnot, resultó que esta sustancia no era un azúcar, sino un compuesto que contenía nitrógeno, ya que podía obtenerse amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) a partir de ella. A las sustancias que contienen nitrógeno se les asignan convencionalmente nombre que terminan en «-ina», y ahora el compuesto aislado por Braconnot se denomina «glicina», de la palabra griega utilizada por «dulce».

Poco después, Braconnot obtuvo una sustancia cristalina blanca, por calentamiento del tejido muscular con ácido. A ésta la denominó «leucina», de la palabra griega para «blanco».

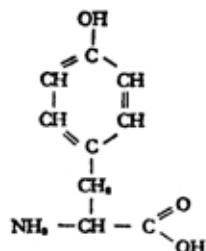
Cuando se logró establecer la fórmula estructural de la glicina y la leucina, se apreció que básicamente se parecían:



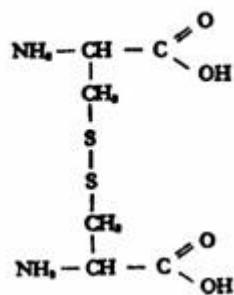
Como puede apreciarse, cada compuesto tiene en su extremo un grupo amina ( $\text{NH}_2$ ) y un grupo carboxilo ( $\text{COOH}$ ). Debido a que el grupo carboxilo confiere propiedades de ácido a cualquier molécula que lo contenga, las moléculas de este tipo fueron denominadas «aminoácidos». Aquellos que tienen el grupo amina y el grupo carboxilo unidos entre sí por un único átomo de carbono, como ocurre en estas moléculas, se denominan «alfa-aminoácidos».

Con el transcurso del tiempo, los químicos aislaron otros aminoácidos a partir de las proteínas. Por ejemplo, Liebig consiguió obtener uno de ellos a partir de la proteína de la leche (caseína), que denominó «tirosina» (de la palabra griega para el «queso»; el propio término caseína procede también, de la designación latina para el «queso»).

Las diferencias entre los diversos alfa-aminoácidos radican enteramente en la naturaleza del conjunto de átomos unidos a aquel átomo de carbono único situado entre los grupos amínico y carboxílico. La glicina, el más sencillo de todos los aminoácidos, sólo tiene un par de átomos de hidrógeno unidos a aquél. Los demás poseen una «cadena lateral» de átomos de carbono unida a aquel átomo de carbono.



Expondré todavía otra fórmula de un aminoácido, que será de utilidad en relación con cuestiones posteriormente consideradas en este capítulo. Se trata de la «cistina», descubierta en 1899 por el químico alemán K. A. H. Mörner. Ésta es una molécula con dos extremos y que contiene dos átomos de azufre:



Realmente, la cistina fue aislada por vez primera en 1810 por el químico inglés William Hyde Wollaston, a partir de un cálculo vesical, y la denominó cistina basándose en la palabra griega para la «vejiga». Lo que hizo Mörner fue demostrar que este centenario compuesto era un componente de las proteínas, así como también la sustancia existente en los cálculos vesicales.

La cistina es reducida con facilidad (término que químicamente es opuesto al de «oxidado»). Esto significa que puede adicionar con facilidad dos átomos de hidrógeno, los cuales sustituirán al enlace S-S. Entonces, la molécula se dividirá en dos mitades, conteniendo cada una un -SH («mercaptano» a «tiol»). Esta mitad reducida es la «cisteína», la que a su vez es fácilmente oxidada a cistina.

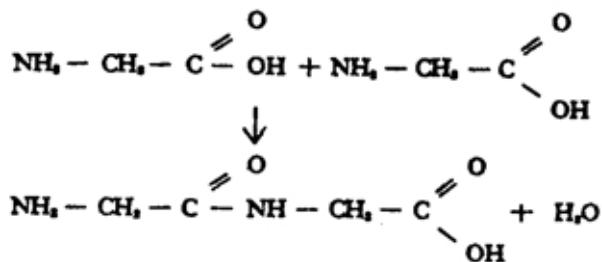
La fragilidad general del grupo tiol tiene gran importancia para que una serie de moléculas proteicas realicen su función. (Un delicado equilibrio y la capacidad de adoptar una u otra de las formas en equilibrio, bajo la acción de un ligero impulso, es la característica de las sustancias químicas más importantes para la vida; los miembros del grupo tiol se encuentran entre las combinaciones de átomos que contribuyen a su existencia.) El grupo tiol es particularmente sensible a las radiaciones, y la administración de cisteína inmediatamente antes o muy poco después de la exposición a las radiaciones constituye una protección parcial contra la enfermedad por radiación. La cisteína inyectada experimenta transformaciones químicas, a las que, de otra manera, podrían hallarse expuestos componentes celulares de importancia. He aquí un tenue rayo de esperanza que se filtra a través de una oscura nube de temor.

Hasta ahora se han identificado en total 19 aminoácidos importantes (es decir, que existen en la mayoría de las proteínas). El último de ellos fue descubierto en 1935 por el químico norteamericano William Cumming Rose. Es poco probable que reste por descubrir algún otro aminoácido ampliamente extendido en la Naturaleza.

Al finalizar el siglo XIX, los bioquímicos tenían ya la certeza de que las proteínas eran moléculas gigantes constituidas por aminoácidos, al igual que la celulosa está formada por glucosa y la goma por unidades de isopreno. Pero existía una importante diferencia: mientras la celulosa y la goma estaban constituidas por un solo tipo de sillon, las proteínas estaban formadas por una serie de aminoácidos distintos. Esto significaba que la elucidación de su estructura plantearía problemas arduos y sutiles.

El primero de ellos fue determinar cómo los aminoácidos se hallaban unidos entre sí en la cadena que formaba la molécula de proteína. Emil Fischer inició la resolución del problema, al unir entre sí los aminoácidos en cadenas, de tal modo que el grupo carboxílico de un aminoácido siempre se uniera al grupo amino del siguiente. En

1901 logró la primera condensación de este tipo; uniendo entre sí dos moléculas de glicina, con eliminación de una molécula de agua:



Ésta es la condensación más simple posible. En 1907, Fischer había sintetizado una cadena constituida por 18 aminoácidos, 15 de ellos de glicina y los restantes 3 de leucina. Esta molécula no mostraba ninguna de las propiedades características de las proteínas, pero Fischer supuso que esto se debía a que la cadena no era lo suficientemente larga. Denominó a sus cadenas sintéticas «péptidos», utilizando la palabra griega que significa «digestión», debido a que creyó que las proteínas se fragmentaban en tales grupos cuando eran digeridas. Fischer designó a la combinación del carbón del carboxilo con el grupo amino un «enlace peptídico».

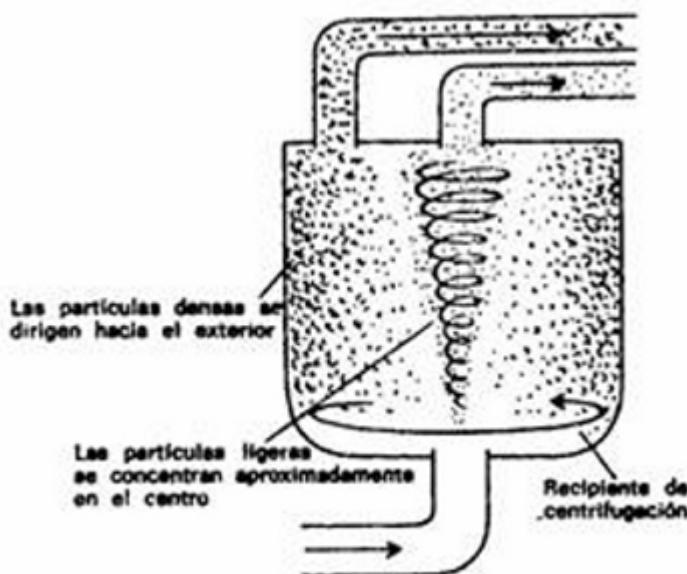
En el año 1932, el bioquímico alemán Max Bergmann (discípulo de Fischer) ideó un método para sintetizar péptidos a partir de diversos aminoácidos. Utilizando el método de Bergmann, el bioquímico polaco-americano Joseph Stewart Fruton preparó péptidos que pudo degradar en fragmentos más pequeños mediante jugos digestivos. Desde entonces existió una buena razón para suponer que los jugos digestivos hidrolizaban (es decir, escindían por adición de agua) sólo un tipo de enlace molecular, significando esto que el enlace entre los aminoácidos, en los péptidos sintéticos, debía de ser de la misma clase que el que une a los aminoácidos en las proteínas verdaderas. Esta demostración disipó cualquier duda existente sobre la validez de la teoría peptídica de Fischer acerca de la estructura de las proteínas.

No obstante, los péptidos sintéticos eran de dimensiones muy reducidas y no mostraban ninguna de las propiedades de las proteínas. Como ya he dicho anteriormente, Fischer había sintetizado uno que consistía de 18 aminoácidos; en 1916, el químico suizo Emil Abderhalden lo aventajó en un punto, al preparar un péptido con 19 aminoácidos, conservando con ello el «récord» durante treinta años.

Por lo demás, los químicos se percataron de que un péptido de estas características debía de ser un pequeño fragmento, cuando se comparaba con el tamaño de una molécula proteica, puesto que los pesos moleculares de las proteínas eran enormes. Consideremos, por ejemplo, la hemoglobina, una proteína de la sangre. La hemoglobina contiene hierro, que representa exactamente el 0,34 % del peso de la molécula.

Los datos químicos disponibles indican que la molécula de hemoglobina contiene 4 átomos de hierro, motivo por el cual el peso molecular total deberá ser aproximadamente de 67.000; 4 átomos de hierro, con un peso total de  $4 \times 55,85$ , deberán constituir el 0,34 % de dicho peso molecular. En consecuencia, la hemoglobina deberá con tener unos 550 aminoácidos (el peso molecular medio de los aminoácidos es de, aproximadamente, 120). Compárese esta cifra con la de 19 en el péptido sintetizado por Abderhalden. Y la hemoglobina es solamente una proteína de tamaño mediano.

La medición más exacta de los pesos moleculares de las proteínas se ha logrado sometiéndolas a la acción de una centrifugadora, aparato que al girar impulsa hacia el exterior a las partículas, debido a la fuerza centrífuga. Cuando dicha fuerza sea más intensa que la de la gravedad terrestre, las partículas suspendidas en un líquido sedimentarán, separándose del centro a mayor velocidad que aquella con la que sedimentarían a consecuencia de la gravedad. Por ejemplo, los glóbulos rojos de la sangre sedimentarán rápidamente en una centrifugadora de este tipo, y la leche fresca se separará en dos fracciones: la nata y la leche desnatada, más densa. Estos tipos de separación tienen lugar lentamente bajo las fuerzas gravitatorias ordinarias, pero la centrifugación las acelera.



*Principio de la centrifugadora.*

Las moléculas proteicas, aún cuando tienen gran tamaño, no son lo suficientemente pesadas para sedimentar, a partir de una solución, por la simple acción de la gravedad; ni tampoco sedimentan con rapidez en una centrifugadora ordinaria. Pero, en los años veinte de este siglo, el químico sueco Theodor Svedberg desarrolló una «ultracentrifugadora» capaz de separar a las moléculas según su peso. Este aparato, de gran velocidad, gira a más de 10.000 r.p(seg.) y produce fuerzas centrífugas hasta 900.000 veces más intensas que la fuerza gravitatoria que actúa sobre la superficie de la Tierra. Por sus contribuciones al estudio de las suspensiones, Svedberg recibió en 1926 el premio Nobel de Química.

Con la ultracentrifugadora, los químicos fueron capaces de determinar los pesos moleculares de una serie de proteínas a partir de su velocidad de sedimentación (medida en «Svedbergs» en honor de aquel químico). Las proteínas pequeñas mostraron tener pesos moleculares de sólo unos pocos millares y contener quizás a lo sumo 50 aminoácidos (por supuesto, bastante más que 19). Otras proteínas tenían pesos moleculares de cientos de miles y aún de millones, lo que significaba que debían consistir de miles a decenas de millares de aminoácidos. El poseer moléculas de tan grandes dimensiones situó a las proteínas en una clase de sustancias que sólo habían sido estudiadas sistemáticamente a partir de mediados del siglo XIX.

El químico escocés Thomas Graham fue el pionero en este campo, debido a su interés en la «difusión», es decir, en la forma en que se entremezclan las moléculas de dos sustancias puestas en contacto. Inició sus investigaciones con el estudio de la velocidad de difusión de los gases a través de pequeños orificios o tubos delgados. Hacia 1831, fue capaz de demostrar que la velocidad de difusión de un gas era inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su peso molecular («Ley de Graham»). (Precisamente por el fenómeno definido por la ley de Graham pudo ser separado el uranio 235 del uranio 238.) En las décadas que siguieron, Graham pasó a estudiar la difusión de las sustancias disueltas. Halló que soluciones de compuestos tales como la sal, el azúcar o el sulfato de cobre, llegaban a atravesar un grueso pergamino (y que se podían obtener fácilmente en forma cristalina).

A aquellas sustancias que no lo hacían, tales como la cola (en griego «cola»), las denominó «coloides». El estudio de las moléculas (o agregados gigantes de átomos, aún cuando no formen moléculas aisladas) llegó a ser conocido con el término de «coloidoquímica». Puesto que las proteínas y otras moléculas clave en los tejidos vivos poseen unas dimensiones enormes, la coloidoquímica tiene una importancia particular para la «Bioquímica» (el estudio de las reacciones químicas que tienen lugar en los tejidos vivos).

Existen una serie de métodos que hacen uso provechoso de las dimensiones gigantes de las moléculas proteicas. Supongamos que el agua pura está situada a un lado de un pergamino y que existe en el otro una solución coloidal de proteína. Las moléculas proteicas no podrán atravesar la membrana; además, evitarán el paso de algunas de las moléculas del agua donde se hallan suspendidas, que de otra forma podrían atravesarla. Por este motivo, el agua penetrará más fácilmente en el interior de la parte coloidal del sistema, que saldrá de él. Ascenderá el nivel del líquido en el lado de la solución proteica y creará una «presión osmótica».

En 1877, el botánico alemán Wilhelm Pfeffer mostró cómo podía medirse esta presión osmótica y determinar, a partir de ella, el peso de una molécula gigante. Éste fue el primer método suficientemente sensible para estimar las dimensiones de tales moléculas.

Por otra parte, las soluciones proteicas podrían situarse en sacos formados por «membranas semipermeables» (membranas con poros lo bastante grandes como

para permitir el paso de las moléculas pequeñas, pero no el de las grandes). Si éstos se sumergieran en agua corriente, las moléculas pequeñas y los iones atravesarían la membrana y serían lavados, mientras que la molécula proteica de grandes dimensiones permanecería retenida. Este procedimiento de «diálisis» es el método más sencillo para purificar las soluciones proteicas.

Las moléculas de tamaño coloidal son lo suficientemente grandes como para difractar la luz; las moléculas pequeñas no lo hacen. Además, la luz de pequeña longitud de onda es difractada con mayor intensidad que aquella de longitud de onda mayor. El primero en observar este efecto, en 1869, fue el físico irlandés John Tyndall; en consecuencia, se lo denomina «efecto Tyndall». El color azul del cielo se explica ahora por el efecto de la difracción de las partículas de polvo sobre la luz solar de onda corta. En el ocaso, cuando la luz atraviesa un mayor espesor de la atmósfera, con un contenido de polvo particularmente elevado debido a la actividad del día, se dispersa suficiente cantidad de luz como para permitir sólo la aparición de los colores rojo y naranja, dando lugar así a la maravillosa tonalidad rubí de las puestas de sol.

La luz que pasa a través de una solución coloidal es difractada de tal forma que puede apreciarse un cono visible de ella cuando se observa desde un lado. Las soluciones de sustancias cristaloides no dan lugar a tal cono visible de luz, cuando se iluminan y son «ópticamente limpias». En 1902, el químico austro-alemán Richard Adolf Zsigmondy aprovechó esta observación para idear un «ultramicroscopio», mediante el cual, cuando se observa una solución coloidal bajo ángulos rectos, las partículas individuales (demasiado pequeñas para ser vistas con el microscopio ordinario) aparecen como puntos dotados de una brillante luminosidad. Por este descubrimiento le fue otorgado en 1925 el premio Nobel de Química.

Los químicos dedicados al estudio de las proteínas estaban naturalmente interesados en sintetizar cadenas «polipéptidas» largas, con la esperanza de obtener así proteínas. Pero los métodos de Fischer y Bergmann permitían sólo la adición de un aminoácido cada vez: un procedimiento de escaso interés práctico. Lo que se precisaba era un método que determinara la unión de aminoácidos, cual si se tratara de una reacción en cadena, tal como la que Baekeland había usado para

obtener plásticos muy polimerizados. En 1947, el químico israelí E. Katchalski y el químico de Harvard, Robert Woodward (que había sintetizado la quinina) comunicaron haber logrado producir polipéptidos mediante una reacción de polimerización en cadena. Su material de partida era un aminoácido ligeramente modificado. (Dicha modificación se autoeliminaba totalmente durante la reacción.) Desde entonces obtuvieron polipéptidos sintéticos con incluso 100 o aún 1.000 aminoácidos.

Estas cadenas están generalmente constituidas por una sola clase de aminoácidos, tal como la glicina o la tirosina, y, por lo tanto, se denominan «poliglicina» o «politirosina». También es posible, cuando el material de partida es una mezcla de dos aminoácidos modificados, formar un polipéptido que contenga dos aminoácidos distintos en la cadena. Pero estos productos sintéticos se asemejan sólo a la clase más sencilla de proteínas: por ejemplo la «fibroína», es decir, la proteína que se encuentra en la seda.

Algunas proteínas son fibrosas y cristalinas como la celulosa o el nylon. Ejemplos de ello son la fibroína; la queratina, la proteína en el pelo y la piel; y el colágeno, la proteína en los tendones y en el tejido conjuntivo. El físico alemán R. O. Herzog demostró la capacidad de cristalizarse que tenían estas sustancias, al poner de manifiesto que difractaban los rayos X. Otro físico alemán, R. Brill, analizó la imagen obtenida por difracción y determinó la distancia entre los átomos en la cadena polipéptida. En los años treinta de este siglo, el bioquímico británico William Thomas Astbury y otros obtuvieron más datos sobre la estructura de la cadena mediante la difracción de los rayos X. Pudieron calcular con razonable precisión las distancias entre los átomos adyacentes, así como los ángulos formados por enlaces que los unen. De este modo apreciaron que la cadena de fibroína se hallaba totalmente extendida: es decir, los átomos se disponían a lo largo de una línea tan recta como lo permitían los ángulos formados por los enlaces entre sí.

Esta disposición de la cadena polipéptida totalmente extendida es la más simple posible. Se la denomina «configuración beta». Cuando se distiende un cabello, sus moléculas de queratina, al igual que las de fibroína, adoptan esta configuración. (Si el cabello está mojado, puede ser distendido hasta 3 veces su longitud original.)

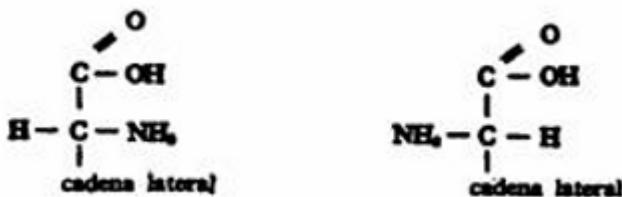
Pero en su estado ordinario, no distendido, la queratina muestra una disposición más complicada, denominada «configuración alfa».

En 1951, Linus Pauling y Robert Brainard Corey, del Instituto de Tecnología de California, sugirieron que, en la configuración alfa, las cadenas polipéptidas seguían una trayectoria helicoidal (similar a la de una escalera de caracol). Después de construir varios modelos, al objeto de apreciar cómo podría ser la estructura si todos los enlaces entre los átomos se hallaran en sus direcciones naturales, sin estar sometidos a ninguna tensión, llegaron a la conclusión que cada vuelta de la hélice debería tener la longitud de 3.6 aminoácidos, o sea 5.4 unidades Ångström. ¿Qué es lo que hace posible que una hélice conserve su estructura? Pauling sugirió que el agente responsable es el denominado «enlace de hidrógeno». Como hemos visto, cuando un átomo de hidrógeno se halla unido a un átomo de oxígeno o a uno de nitrógeno, cualquiera de estos últimos retiene a los electrones de enlace compartidos, de tal modo que el átomo de hidrógeno adquiere una ligera carga positiva y el oxígeno o el nitrógeno una débil carga negativa. En la hélice, al parecer, periódicamente un átomo de hidrógeno se halla en las proximidades de un átomo de oxígeno o de nitrógeno en la vuelta de la hélice inmediatamente por encima o debajo de él.

El átomo de hidrógeno ligeramente positivo es atraído por su vecino ligeramente negativo. Esta atracción tiene una fuerza veinte veces menor que la de un enlace químico ordinario, pero es lo suficientemente intensa como para que la hélice conserve su estructura. Sin embargo, al estirar la fibra, la hélice se desenrollará fácilmente, por lo que dicha fibra se distenderá.

Hasta el momento sólo hemos considerado a la «columna vertebral» de la molécula proteica, la cadena que puede representarse por CCNCCNCCNCCN, pero las diversas cadenas laterales de los aminoácidos también desempeñan un papel importante en la estructura proteica.

Todos los aminoácidos, excepto la glicina, tienen por lo menos un átomo de carbono asimétrico -el situado entre el grupo carboxilo y el grupo amino-. Por este motivo cada uno de ellos debería existir en los dos isómeros ópticamente activos. Las fórmulas generales de los dos isómeros son:



Sin embargo, parece totalmente demostrado, a partir de los análisis químicos y con rayos X, que las cadenas polipéptidas están constituidas únicamente por L-aminoácidos. En este caso, las cadenas laterales se desprenden alternativamente de un lado de la columna vertebral y luego del otro. Una cadena constituida por una mezcla de ambos isómeros no sería estable, debido a que, si un L-aminoácido y un D-aminoácido se hallaran uno junto al otro, habría dos cadenas laterales que se extenderían a partir del mismo lado, lo que determinaría que estuvieran tan próximas una de otra que los enlaces resultarían sometidos a tensión. Las cadenas laterales son elementos importantes de unión entre las cadenas polipéptidas vecinas. Allí donde una cadena lateral cargada negativamente, perteneciente a una cadena, se halle próxima a una cadena lateral cargada positivamente, perteneciente a una vecina, se formará un enlace electrostático. Las cadenas laterales también permiten la formación de enlaces de hidrógeno que pueden actuar como puentes de unión. Y el aminoácido con dos extremos, la cistina, puede insertar una de sus secuencias grupo amino-grupo carboxilo en una cadena y la otra en la próxima. Entonces las dos cadenas se hallarán unidas por los dos átomos de azufre en la cadena lateral (el «enlace disulfuro»). La unión de las cadenas polipéptidas aumenta la resistencia de las fibras proteicas. Esto explica la considerable resistencia del hilo de araña, aparentemente frágil, y el hecho de que la queratina pueda formar estructuras tan duras como las uñas de los dedos, las garras del tigre, las escamas del caimán y los cuernos del rinoceronte.

Todo lo expuesto hasta aquí describe bellamente la estructura de las fibras proteicas. ¿Qué ocurre con las proteínas en solución? ¿Qué tipo de estructura adquieren entonces? En realidad poseen una estructura definida que, no obstante, es extremadamente delicada; un suave calentamiento, la agitación de la solución, la adición de una pequeña cantidad de ácido o de álcali, o cualquiera de una serie de influencias ambientales, pueden «desnaturalizar» una proteína disuelta. Es decir, la proteína pierde la capacidad de realizar sus funciones naturales y se alteran muchas

de sus propiedades. Además, la desnaturalización es, por lo general, un proceso irreversible: por ejemplo, un huevo intensamente cocido nunca podrá transformarse de nuevo en un huevo crudo.

Parece evidente que la desnaturalización implica la pérdida de alguna configuración específica de la columna vertebral de los polipéptidos. ¿Qué es lo que se destruye en la estructura? La difracción de los rayos X no nos puede prestar su ayuda cuando las proteínas se hallan en solución, pero disponemos de otras técnicas.

Por ejemplo, en 1928, el físico hindú Chandrasejara Venkata Raman halló que la luz dispersada por las moléculas en solución era, hasta cierto punto, alterada en su longitud de onda. De la naturaleza de la alteración podía deducirse la estructura de la molécula. Por este descubrimiento del «efecto Raman», dicho investigador recibió en el año 1930 el premio Nobel de Física. (Las longitudes de onda alteradas de la luz son, por lo común, denominadas «el espectro Raman» de la molécula que determina la dispersión.) A finales de los años veinte, se desarrolló otra delicada técnica, la basada en el hecho de que los núcleos atómicos poseen propiedades magnéticas. Las moléculas expuestas a un campo magnético de gran intensidad absorberán ciertas radiofrecuencias. A partir de tal absorción, denominada «resonancia magnética nuclear», y frecuentemente abreviada como RMN, puede obtenerse información sobre los enlaces entre los átomos. En particular, las técnicas basadas en la RMN pueden localizar la posición de los pequeños átomos de hidrógeno en el interior de las moléculas, lo que no puede conseguirse a partir de la difracción de los rayos X. Las técnicas basadas en la RMN fueron elaboradas en 1946 por dos equipos que trabajaban independientemente, uno bajo la dirección de E. M. Purcell (que más tarde fue el primero en detectar las radioondas emitidas por los átomos de hidrógeno neutros en el espacio; véase capítulo 11), y el otro bajo la dirección del físico suizo-americano Felix Bloch. Por esta proeza, Purcell y Bloch compartieron el premio Nobel de Física en 1952.

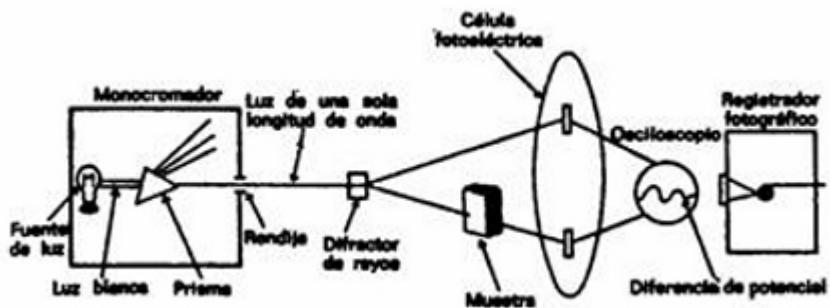
Volvamos a la cuestión de la desnaturalización de las proteínas en solución. Los químicos norteamericanos Paul Mead Doty y Elkan Rogers Blout, usando técnicas de difracción de la luz en soluciones de polipéptidos sintéticos, descubrieron que éstos poseían una estructura helicoidal.

Por modificación de la acidez de la solución pudieron romper las hélices en fragmentos curvados al azar; al restaurar la acidez original, lograron recomponer las hélices, y mostraron así que la conversión de las hélices en fragmentos curvados al azar reducía la actividad óptica de la solución. Fue entonces posible indicar de qué manera se curvaba la hélice proteica: tal como lo hace la rosca dextrógira de un tornillo.

Todo esto sugiere que la desnaturalización de una proteína implica la destrucción de su estructura helicoidal.

### Aminoácidos en la Cadena

Lo que he descrito hasta el momento representa una visión de conjunto de la estructura de la molécula proteica: la forma general de la cadena. ¿Cuáles son los detalles de su estructura? Por ejemplo, ¿cuántos aminoácidos de cada clase existen en una molécula proteica determinada? Podemos fragmentar una molécula proteica en sus aminoácidos (calentándola con un ácido) y luego determinar la cantidad de cada aminoácido que se halla presente en la mezcla. Desgraciadamente, algunos de los aminoácidos se parecen químicamente tanto entre sí, que es casi imposible obtener separaciones claras mediante los métodos químicos ordinarios. Sin embargo, los aminoácidos pueden separarse limpiamente mediante la cromatografía (véase capítulo V).



*Un espectrofotómetro. El haz de luz es dividido en dos, de tal modo que uno de los haces pase a través de la muestra que se está analizando y el otro incida directamente sobre la célula fotoeléctrica. Puesto que el haz de menor intensidad que ha atravesado la muestra libera menos electrones en la célula fotoeléctrica de lo que lo hace el haz no absorbido, los dos haces crean una diferencia de potencial que mide la cantidad de luz absorbida por la muestra.*

En el año 1941, los bioquímicos británicos Archer John, Porter Martin y Richard Laurence Millington Synge fueron los primeros en aplicar la cromatografía a este objetivo. Introdujeron el empleo del almidón como material de relleno en la columna. En el año 1948, los bioquímicos estadounidenses Stanford Moore y William Howard Stein lograron convertir la cromatografía sobre almidón de los aminoácidos en un método analítico muy eficaz.

Después de que la mezcla de aminoácidos ha sido vertida en el interior de la columna de almidón y todos ellos se han unido a las partículas del material de relleno, los aminoácidos son lentamente arrastrados en sentido descendente a lo largo de la columna, al pasar el eluyente a su través. Cada aminoácido se desplaza hacia la parte inferior de la columna a una velocidad que le es característica. A medida que se desprenden separadamente de ésta, las gotas de la solución de cada uno de los aminoácidos se recogen en un recipiente distinto. La solución en cada recipiente se trata posteriormente con un reactivo que convierte el aminoácido en un producto coloreado. La intensidad del color indica la cantidad del aminoácido particular presente. A su vez, esta intensidad del color se mide utilizando un instrumento denominado «espectrofotómetro», que señala dicha intensidad en función de la cantidad de luz absorbida de una determinada longitud de onda.

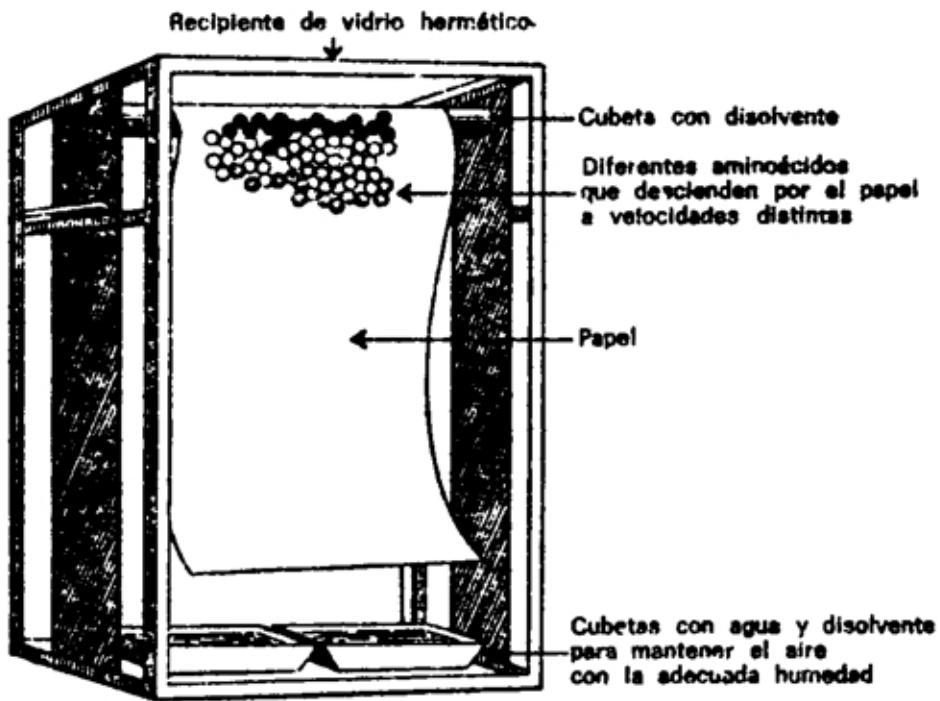
Los espectrofotómetros pueden utilizarse para otros tipos de análisis químicos, como es de suponer. Si se hace pasar luz, de longitud de onda progresivamente creciente a través de una solución, la magnitud de la absorción varía ligeramente, alcanzando valores máximos en ciertas longitudes de onda y manifestando valores mínimos en otras. El resultado es un registro denominado «espectro de absorción». Un determinado grupo atómico posee su propio pico o picos de absorción característicos. Esto se aprecia particularmente en la región de los infrarrojos, tal como demostró por vez primera el físico norteamericano William Weber Coblenz poco después de 1900. Sus instrumentos tenían por entonces tan escasa sensibilidad que la técnica no resultaba de utilidad, pero, desde la Segunda Guerra Mundial, el «espectrofotómetro de infrarrojos» ideado para rastrear automáticamente el espectro desde los 2 a los 40 micrones y registrar los resultados, se ha venido utilizando cada vez más para el análisis de la estructura de

compuestos complejos. «Los métodos ópticos» del análisis químico, que implica la absorción de ondas de radio, la absorción de la luz, su difracción, etc., son extremadamente «innocuos» y no alteran al producto estudiado -en otras palabras, la muestra investigada sobrevive a la investigación- y están remplazando totalmente los métodos analíticos clásicos de Liebig, Dumas y Pregl, que se mencionaron en el capítulo anterior.

La determinación de los aminoácidos mediante la cromatografía sobre almidón es plenamente satisfactoria, pero en la época en que este procedimiento se desarrolló, Martin y Synge elaboraron un método más simple de cromatografía. Es el denominado «cromatografía sobre papel». Los aminoácidos se separan sobre una hoja de papel de filtro (un papel absorbente constituido por celulosa particularmente pura). Una o dos gotas de una mezcla de aminoácidos se colocan cerca de uno de los ángulos de la hoja y uno de sus lados se sumerge en un disolvente, como por ejemplo el alcohol butílico. El disolvente asciende lentamente por el papel, por capilaridad. (Se puede hacer la prueba sumergiendo la punta de un secante en agua y comprobar así lo que ocurre.) El disolvente arrastra las moléculas en la gota depositada y las desplaza a lo largo del papel. Como en la cromatografía en columna, cada uno de los aminoácidos se mueve, esta vez en sentido ascendente, por el papel a una velocidad característica. Despues de un cierto período de tiempo, los aminoácidos de la mezcla aparecen separados en una serie de manchas sobre el papel. Algunas de las manchas pueden contener dos o tres aminoácidos. Para separarlos, el papel de filtro, tras haberse secado, se hace girar 90º con respecto a su posición primitiva, y el nuevo borde se sumerge a continuación en un segundo disolvente, que dispondrá a los componentes en manchas separadas. Finalmente, toda la hoja, tras haber sido secada de nuevo, se lava con reactivos químicos, los cuales determinan que las áreas ocupadas por los aminoácidos aparezcan como manchas coloreadas u oscuras. Es algo que merece sin duda la pena ser visto: todos los aminoácidos, originalmente mezclados en una única solución, aparecen ahora distribuidos a lo largo y a lo ancho del papel, formando un mosaico de manchas de vivos colores. Los bioquímicos experimentados pueden identificar cada aminoácido por la posición que muestran sus manchas correspondientes, y leer de este modo la composición de la proteína original casi a simple vista. Por disolución

de los componentes de la mancha, pueden asimismo medir la cantidad del aminoácido particular presente en la proteína.

(Martin, junto con A. T. James, aplicaron los principios de esta técnica a la separación de gases en el año 1952. Mezclas de gases o vapores pueden hacerse pasar a través de un disolvente líquido o de un sólido absorbente mediante la corriente de un «gas transportador» inerte, tal como el nitrógeno o el helio. La mezcla atraviesa el medio de separación y aparecen sus componentes individuales por el otro extremo. La «cromatografía de gases» es de particular utilidad, debido a la velocidad con que realiza las separaciones y a la gran sensibilidad con que puede detectar trazas de impurezas.) Los análisis cromatográficos han permitido valorar con exactitud el contenido de aminoácidos de diversas proteínas. Por ejemplo, se ha observado que la molécula de una proteína de la sangre, denominada «albúmina sérica», contiene 15 moléculas de glicina, 45 de valina, 58 de leucina, 9 de isoleucina, 31 de prolina, 33 de fenilalanina, 18 de tirosina, 1 de triptófano, 22 de serina, 27 de treonina, 16 de cistina, 4 de cisteína, 6 de metionina, 25 de arginina, 16 de histidina, 58 de lisina, 56 de ácido aspártico y 80 de ácido glutámico; o sea, un total de 526 aminoácidos de 18 tipos distintos, constituyendo una proteína con un peso molecular de aproximadamente 69.000. (Además de estos 18, existe aún otro aminoácido de frecuente aparición: la alanina.) El bioquímico germano-americano Erwin Brand sugirió un sistema de símbolos para los aminoácidos, que hoy en día es de uso general. Para evitar confusiones con los símbolos de los elementos, designó a cada aminoácido con las tres primeras letras de su nombre, en vez de hacerlo únicamente con la inicial. Sólo existen algunas variaciones especiales: la cistina se simboliza con la sigla CiS, para indicar así que sus dos mitades generalmente se hallan incorporadas a dos cadenas diferentes; la cisteína es representada por CiSH, para distinguirla de la cistina; y la isoleucina, por Ileu, en vez de Iso, pues «Iso» es el prefijo que se utiliza en muchos nombres químicos.



### **Cromatografía sobre papel.**

Abreviadamente, la fórmula de la albúmina sérica puede escribirse así:

Gli<sub>15</sub>Val<sub>45</sub>Leu<sub>38I</sub>Ileu<sub>9</sub>Pro<sub>31</sub>Fe<sub>33</sub>Tir<sub>18</sub>Tri<sub>1</sub>Ser<sub>22</sub>Tr<sub>27</sub>CiS<sub>32</sub>CiSH<sub>4</sub>Met<sub>6</sub>Arg<sub>52</sub>His<sub>16</sub>Lis<sub>58</sub>Asp<sub>46</sub>Glu<sub>80</sub>.

Esto, desde luego, es más conciso, aunque evidentemente no pueda decirse con rapidez.

El descubrimiento de la fórmula empírica de la proteína tan sólo representó vencer en la primera mitad de la batalla; en realidad, mucho menos que la mitad. Se planteaba entonces el problema, considerablemente más difícil, de descifrar la estructura de una molécula proteica. Existían toda una serie de razones para suponer que las propiedades de cada proteína dependían de cómo exactamente -es decir, en qué orden- se hallaban dispuestos todos aquellos aminoácidos en la cadena molecular. He aquí realmente un problema de tanta envergadura que puede causar vértigos al más avezado bioquímico. El número de las permutaciones posibles en que los 19 aminoácidos pueden hallarse situados en una cadena (incluso suponiendo que únicamente entre a formar parte de ella uno de cada uno de los aminoácidos) es de aproximadamente 120 millones. Si resulta difícil creerlo, basta

con intentar multiplicar 19 veces por 18 X 17 X 16 y así sucesivamente, que es la forma de calcular el número posible de permutaciones, y, en caso de no fiarse de la aritmética, tome 19 fichas del juego de damas, numérelas del 1 al 19 y compruebe luego en cuántos órdenes diferentes puede disponerlas. Le garantizo que no continuará el juego durante mucho tiempo.

Cuando nos enfrentamos con una proteína del tamaño de la albúmina sérica, compuesta de más de 500 aminoácidos, el número de posibles permutaciones llega a ser del orden de los  $1^{600}$  -es decir, un 1 seguido de 600 ceros-. Éste es un número totalmente fantástico, muy superior al número de partículas subatómicas en todo el Universo conocido, o, siguiendo en el tema, mucho mas de lo que el Universo podría contener si fuera un conglomerado sólido constituido por tales partículas.

No obstante, aunque pueda parecer abocada al fracaso la tarea de hallar cuál de todas aquellas posibles permutaciones es la que realmente representa una molécula de albúmina sérica, este tipo de problema ha sido en la actualidad planteado y resuelto.

En el año 1945, el bioquímico británico Frederick Sanger determinó el orden de los aminoácidos en una cadena peptídica. Comenzó intentando identificar el aminoácido en un extremo de la cadena: el extremo amina.

Evidentemente, el grupo amínico de este aminoácido terminal (denominado el «aminoácido N-terminal») está libre: es decir, no se halla unido a otro aminoácido. Sanger hizo uso de un reactivo químico que se combina con un grupo amínico libre, pero que no lo hace con un grupo amínico que esté unido a un grupo carboxílico. Éste da lugar a un derivado DNF (dinotrofenílico) de la cadena peptídica. Este investigador pudo marcar el aminoácido N-terminal con el DNF, y, ya que el enlace que permite esta combinación es más fuerte que aquellos que unen a los aminoácidos en la cadena, pudo romper ésta en sus aminoácidos individuales y aislar a aquél marcado con el DNF. Puesto que el grupo DNF tiene un color amarillo, este aminoácido particular, marcado por el DNF, aparece como una mancha amarilla en el cromatograma sobre papel.

Así, Sanger pudo separar e identificar el aminoácido en el extremo amínico de una cadena peptídica. De manera similar, identificó el aminoácido en el otro extremo de la cadena: aquél con un grupo carboxílico libre, denominado el «aminoácido C-

terminal». También fue capaz de separar algunos otros aminoácidos, uno a uno, e identificar en algunos casos la «secuencia terminal» de una cadena peptídica. Sanger procedió a atacar la cadena peptídica en toda su longitud. Estudió la insulina, una sustancia de gran importancia funcional para el organismo, que posee además la virtud de ser una proteína relativamente pequeña, con un peso molecular de sólo 6.000, en su forma más simple. El tratamiento con DNF reveló que esta molécula consistía en dos cadenas peptídicas, pues contenía dos aminoácidos N-terminales. Las dos cadenas se hallaban unidas entre sí por moléculas de cistina. Mediante un tratamiento químico que rompía los enlaces entre los dos átomos de azufre en la cistina, Sanger escindió la molécula de insulina en sus dos cadenas peptídicas, cada una de ellas intacta. Una de las cadenas tenía la glicina como aminoácido N-terminal (denominado por él la cadena G), y la otra tenía la fenilalanina como el aminoácido N-terminal (la cadena P). Ahora podían ser estudiadas separadamente ambas cadenas.

Sanger y un colaborador, Hans Tuppy, fragmentaron primero las cadenas en los aminoácidos constituyentes e identificaron los 21 aminoácidos que formaban la cadena G y los 30 que componían la cadena P. Luego, para establecer algunas de las secuencias, rompieron las cadenas, no en aminoácidos individuales, sino en fragmentos constituidos por 2 ó 3 aminoácidos. Esto podía realizarse por hidrólisis parcial, la cual fragmentaba sólo los enlaces más débiles en la cadena, o bien atacando la insulina con ciertas sustancias digestivas, que sólo rompían determinados enlaces entre aminoácidos y dejaban intactos a los restantes.

De este modo, Sanger y Tuppy fragmentaron cada una de las cadenas en un gran número de piezas distintas. Por ejemplo, la cadena P dio lugar a 48 fragmentos distintos, 22 de los cuales estaban formados por dos aminoácidos (dipéptidos), 14 por tres y 12 por más de tres aminoácidos.

Los diversos péptidos de pequeñas dimensiones, después de ser separados, podían ser fragmentados en sus aminoácidos individuales por cromatografía sobre papel. Así, pues, los investigadores estaban ya en disposición de determinar el orden de los aminoácidos en cada uno de estos fragmentos. Supongamos que poseyeran un dipéptido constituido por la valina y la isoleucina. El problema que entonces se plantearía podría ser: ¿El orden era el de Val-Ileu o el de Ileu-Val? En otras

palabras, ¿era la valina, o la isoleucina, el aminoácido N-terminal? (El grupo amínico y, en consecuencia, la unidad N-terminal, se considera convencionalmente que se halla situado en el extremo izquierdo de una cadena.) Aquí el marcado con el DNF podía dar la respuesta. Si se hallaba presente sobre la valina, éste sería el aminoácido N-terminal, y el orden de los aminoácidos en el diséptido sería Val-Ileu. Si se hallara sobre la isoleucina, entonces sería el de Ileu-Val.

También pudo resolverse el orden de sucesión de los aminoácidos en un fragmento constituido por tres de ellos. Supongamos que sus componentes fueran la leucina, la valina y el ácido glutámico. La prueba con el DNF identificaría el aminoácido N-terminal. Si éste fuera, por ejemplo, la leucina, el orden debería ser, o bien Leu-Val-Glu, o bien Leu-Glu-Val. Luego, se sintetizó cada una de estas combinaciones y se depositó en forma de una mancha sobre un cartograma, para ver cuál ocupaba sobre el papel el mismo lugar que el ocupado por el fragmento que estaba estudiando.

Por lo que se refiere a los péptidos de más de 3 aminoácidos, éstos podían fragmentarse en otros más pequeños para su análisis ulterior.

Después de determinar las estructuras de todos los fragmentos en que había sido dividida la molécula de insulina, la fase siguiente era reunir todas las piezas entre sí, disponiéndolas en el orden correcto en la cadena, a la manera de un rompecabezas en zigzag. Existían una serie de incógnitas para despejar. Por ejemplo, se sabía que la cadena G solamente contenía una unidad del aminoácido anilina. En la mezcla de péptidos obtenida por fragmentación de las cadenas-G, la alanina se halló en dos combinaciones: alanina-serina y cistina-alanina. Esto significaba que, en la cadena G intacta, el orden debía ser Cis-Ala-Ser.

Mediante tales indicios, Sanger y Tuppy fueron reuniendo gradualmente las piezas del rompecabezas. Les llevó un par de años identificar la totalidad de los fragmentos de forma definitiva y disponerlos en una secuencia absolutamente satisfactoria, pero, hacia el año 1952, habían logrado establecer la disposición exacta de todos los aminoácidos en la cadena G y en la cadena P. Seguidamente, se dedicaron a establecer de qué modo se hallaban unidas entre sí las dos cadenas. En 1953, obtuvieron su triunfo final con el desciframiento de la estructura de la insulina. La estructura completa de una molécula proteica importante se había dilucidado por

vez primera. Por este logro, a Sanger le fue concedido el premio Nobel de Química en 1958.

Los bioquímicos adoptaron inmediatamente los métodos de Sanger para determinar la estructura de otras moléculas proteicas. La ribonucleasa, una molécula proteica que consta de una única cadena peptídica con 124 aminoácidos, fue conquistada en 1959, y la unidad proteica del virus del mosaico del tabaco, con 158 aminoácidos, en el año 1960. En 1964 fue a su vez descifrada la tripsina, una molécula con 223 aminoácidos.

En 1967 se automatizó esta técnica. El bioquímico sueco-australiano P. Edman creó un «secuenciador» que podía trabajar con 5 mg de proteína pura, «descascarillando» e identificando los aminoácidos uno por uno. De este modo, en cuatro días fueron identificados sesenta aminoácidos de la cadena de la mioglobina. Una vez dilucidado el orden de los aminoácidos en la cadena polipeptídica, resultó posible intentar unir a los aminoácidos en el orden correcto. Naturalmente, los comienzos fueron modestos. La primera proteína sintetizada en el laboratorio fue la «oxitocina», una hormona con importantes funciones en el organismo. La oxitocina es extremadamente pequeña para poder ser considerada realmente una molécula proteica: se compone únicamente de 8 aminoácidos. En 1953, el bioquímico americano Vincent du Vigneaud logró sintetizar una cadena peptídica exactamente igual a aquella que, al parecer, representaba la molécula de exótocina. Y, además, el péptido sintético mostraba todas las propiedades de la hormona natural. A Du Vigneaud se le otorgó el premio Nobel de Química del año 1955.

Con el paso de los años se sintetizaron moléculas proteínicas cada vez más complejas, pero si se quisiera sintetizar una molécula específica con especiales aminoácidos dispuestos en un orden preconcebido, sería preciso «enhebrar la sarta» por así decirlo, paso a paso. En los años 1950 eso resultó tan difícil como medio siglo antes, es decir, la época de Fischer. Cada vez que se consiguió aparejar un aminoácido determinado con una cadena, fue preciso separar el nuevo compuesto del resto mediante procedimientos sumamente laboriosos y luego partir nuevamente desde el principio para agregar otro aminoácido determinado. Con cada paso se perdió una porción considerable del material en reacciones secundarias y,

por tanto, sólo fue posible formar cantidades mínimas de cadenas sin excluir siquiera las más elementales.

Sin embargo, hacia principios de 1959, un equipo bajo la dirección del bioquímico norteamericano Robert Bruce Merrifield, tomó una orientación inédita: un aminoácido, comienzo de la ambicionada cadena, asociado a los glóbulos de la resina de poliestireno. Tales glóbulos fueron insolubles en el líquido utilizado y de este modo resultó fácil separarlos de todo lo restante mediante una sencilla filtración. Se agregó cada nueva solución conteniendo el siguiente aminoácido que se asociase con el anterior. Otra filtración, otra más y así sucesivamente. Los manejos entre esas adiciones fueron tan simples y rápidos que se les pudo automatizar con muy escasas pérdidas. En 1965 se sintetizó por este medio la molécula de insulina; en 1969 le llegó el turno a la cadena todavía más larga de los ribonucleicos con sus 124 aminoácidos. Más tarde, en 1970, el bioquímico estadounidense de origen chino Cho Hao Li sintetizó la hormona del crecimiento humano, una cadena de 188 aminoácidos.

Con la molécula proteínica entendida, por así decirlo, como una hilera de aminoácidos, parecía conveniente obtener una visión aún más sofisticada. ¿Cuál era la manera exacta en que la cadena de aminoácidos se inclinaba y curvaba? ¿Cuál era la forma exacta de la molécula proteínica? Enfrascados en este problema se hallaban el químico austro-inglés Max Ferdinand Perutz y su colega inglés John Cowdery Kendrew. Perutz tomó como objeto de estudio la hemoglobina, la proteína de la sangre que transporta el oxígeno y que contiene unos 12.000 átomos. Kendrew estudió la mioglobina, una proteína muscular, similar en su función a la hemoglobina, pero sólo con una cuarta parte de su tamaño. Como herramienta utilizaron los estudios de difracción de los rayos X.

Perutz empleó el ardid de combinar las moléculas proteicas con un átomo pesado, como el del oro o el mercurio, átomo que era particularmente eficaz en difractar los rayos X. Esto les proporcionó algunas pistas, a partir de las que pudo deducir con más exactitud la estructura de la molécula, sin dicho átomo pesado. Hacia el año 1959, la mioglobina, y, un año más tarde, la hemoglobina, fueron dilucidadas estructuralmente. Fue posible preparar modelos tridimensionales en los cuales se situaba cada uno de los átomos en el lugar que parecía ser con mayor probabilidad

el correcto. En ambos casos, la estructura proteica se basaba claramente en la helicoidal. Como resultado de sus investigaciones, Perutz y Kendrew compartieron el premio Nobel de Química de 1962.

Hay buenas razones para creer que las estructuras tridimensionales elaboradas mediante los procedimientos técnicos de Perutz-Kendrew, quedan determinadas al fin y al cabo por la naturaleza de los encadenamientos de aminoácidos. Las cadenas de aminoácidos tienen «puntos de repliegue», por así decirlo, y cuando se doblan sobrevienen inevitablemente ciertas interconexiones que las mantienen debidamente plegadas. Para determinar cuáles son esos pliegues e interconexiones es preciso calcular todas las distancias interatómicas y los ángulos que forman los eslabones de conexión. Esta tarea es realizable, pero extremadamente tediosa. Aquí se ha pedido también ayuda a las computadoras; éstas han realizado todos los cálculos y, por si fuera poco, han escrito el resultado en una pantalla.

Entre unas cosas y otras, la lista de moléculas proteínicas cuyas formas se conocen a escala tridimensional, está alargándose rápidamente. La insulina, iniciadora de los nuevos sondeos en la biología molecular, ha encontrado ya su forma tridimensional gracias a la bioquímica inglesa Dorothy Crowfoot Hodgkin (1969).

## Enzimas

Por supuesto, existe una buena razón para justificar la complejidad y casi infinita variedad que manifiestan las moléculas proteicas. Las proteínas tienen una multiplicidad de funciones que cumplir en los organismos vivos.

Una de ellas, de cierta importancia, es constituir el armazón estructural del cuerpo. De la misma manera que la celulosa constituye el armazón de las plantas, así las proteínas fibrosas cumplen el mismo papel en los animales complejos. Las arañas producen los hilos de sus telas, y las larvas de insectos las hebras de sus capullos, en ambos casos gracias a las fibras proteicas. Las escamas de los peces y los reptiles están constituidas principalmente por la proteína denominada queratina. Los pelos, plumas, cuernos, pezuñas, garras y uñas de los dedos -todo ello simplemente escamas modificadas- también contienen queratina. La piel debe su resistencia y flexibilidad a su elevado contenido de queratina. Los tejidos de sostén internos -cartílago, ligamentos, tendones, e incluso el armazón orgánico de los

huesos- están constituidos en gran parte por moléculas proteicas tales como el colágeno y la elastina. A su vez, el músculo está formado por una proteína fibrosa compleja denominada actomiosina.

En todos estos casos, las fibras proteicas son algo más que un simple sustitutivo de la celulosa. Representan un perfeccionamiento; son más resistentes y más flexibles. La celulosa podrá soportar una planta que no tenga que realizar más que el simple movimiento de doblarse bajo la acción del viento. Pero las fibras proteicas tienen la misión de plegar y flexionar los apéndices del cuerpo, debiendo estar adaptadas a movimientos rápidos, vibraciones, etc.

Sin embargo, las fibras se encuentran entre las proteínas más sencillas, tanto en su forma como en su función. La mayoría de las otras proteínas tienen funciones mucho más sutiles y complejas que realizar.

Para mantener la vida en todos sus aspectos, deben producirse numerosas reacciones químicas en el organismo. Éstas se producen a una velocidad elevada y con gran diversidad, hallándose además cada reacción íntimamente relacionada con las restantes, pues no es sólo una, sino de todas ellas conjuntamente, que dependen los fluidos procesos vitales. Además, todas las reacciones deben producirse en el más suave de los medios ambientes: sin altas temperaturas, reactivos químicos enérgicos o presiones elevadas. Las reacciones deben hallarse bajo un control estricto, y a la vez flexible, y deben ser constantemente ajustadas a las variables características del medio ambiente y a las distintas necesidades momentáneas del organismo. La indebida reducción de la velocidad o la aceleración de incluso una sola reacción, entre los muchos miles de ellas, desorganizaría más o menos gravemente al organismo.

Todo esto es realizado por las moléculas proteicas.

Hacia finales del siglo XVIII, los químicos, siguiendo las enseñanzas de Lavoisier, comenzaron a estudiar las reacciones químicas de forma cuantitativa; en particular para medir las velocidades a que se producían dichas reacciones.

Inmediatamente observaron que la velocidad de las reacciones podía ser drásticamente modificada por alteraciones pequeñas en comparación con el medio ambiente. Por ejemplo, cuando Kirchhoff descubrió que el almidón podía ser convertido en azúcar en presencia de ácido, apreció también que el ácido aceleraba

considerablemente la reacción, aunque no se consumía en el proceso. Pronto se descubrieron otros ejemplos de este fenómeno. El químico alemán Johann Wolfgang Döbereiner halló que el platino finamente dividido (denominado negro de «platino») favorece la combinación del hidrógeno y el oxígeno para formar agua; una reacción que, sin esta ayuda, sólo tendría lugar a una temperatura elevada. Döbereiner diseñó incluso una lámpara que entraba automáticamente en ignición y en la que un chorro de hidrógeno, proyectado sobre una superficie revestida de negro de platino, provocaba la llama.

Debido a que las reacciones aceleradas procedían generalmente en el sentido de descomponer una sustancia compleja en una más simple, Berzelius denominó al fenómeno «catálisis» (de las palabras griegas que esencialmente significan «descomponer»). Así, el negro de platino fue designado como catalizador de la combinación del hidrógeno y el oxígeno, y el ácido como catalizador de la hidrólisis del almidón en glucosa. La catálisis ha resultado ser de la máxima importancia en la industria. Por ejemplo, la mejor manera de fabricar ácido sulfúrico (el producto químico inorgánico simple más importante, del mismo orden de significación que el aire, el agua y quizás la sal) implica la combustión del azufre, primero en dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y luego en trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ). La conversión de dióxido a trióxido se realizaría a la velocidad del caracol sin la ayuda de un catalizador tal como el negro de platino. El níquel finamente dividido (que ha remplazado al negro de platino en la mayor parte de los casos, debido a que es más barato), y compuestos tales como el cromito de cobre, el pentóxido de vanadio, el óxido férrico y el dióxido de manganeso también son importantes catalizadores. En realidad, gran parte del éxito de un proceso químico industrial depende de hallar el adecuado catalizador para la reacción en él involucrada. El descubrimiento por Ziegler de un nuevo tipo de catalizador revolucionó la producción de los polímeros.

¿Cómo es posible que una sustancia, algunas veces presente en concentraciones muy pequeñas, determine reacciones cuantitativamente importantes, sin que ella misma se altere? Bien, en realidad parte del catalizador interviene en la reacción, pero haciéndolo en forma cíclica, de tal modo que continuamente vuelve a recuperar su naturaleza original. Un ejemplo lo constituye el pentóxido de vanadio ( $\text{O}_5\text{V}_2$ ), que puede catalizar la transformación del dióxido de azufre en trióxido de azufre. El

pentóxido de vanadio cede uno de sus oxígenos al  $\text{SO}_2$ , formándose  $\text{SO}_3$  y transformándose el mismo en el óxido de vanadilo ( $\text{O}_4\text{V}_2$ ). Pero el óxido de vanadilo reacciona rápidamente con el oxígeno del aire y vuelve a formarse el  $\text{O}_5\text{V}_2$ . Así, pues, el pentóxido de vanadio actúa como un intermediario, cediendo un átomo de oxígeno al dióxido de azufre, tomando otro a partir del aire, cediéndolo de nuevo a otra molécula de dióxido de azufre, y así sucesivamente. El proceso es tan rápido que una pequeña cantidad del pentóxido de vanadio será suficiente para determinar la conversión de grandes cantidades de dióxido de azufre. Y, al final, nos parecerá que el pentóxido de vanadio no ha experimentado modificación alguna.

En el año 1902, el químico alemán George Lunge sugirió que este tipo de proceso era la explicación de la catálisis en general. En 1916, Irving Langmuir avanzó un paso más y aportó una explicación para la acción catalítica de ciertas sustancias, tales como el platino, tan poco reactivas que no es de esperar que se hallen implicadas en reacciones químicas ordinarias. Langmuir sostuvo que el exceso de enlaces de valencia en la superficie del metal de platino escindiría las moléculas del hidrógeno y el oxígeno. Al entrar en íntimo contacto con la superficie de platino, las moléculas del hidrógeno y el oxígeno podrían combinarse mucho más fácilmente para formar moléculas de agua, que en su estado libre ordinario como moléculas gaseosas, y, una vez formada una molécula de agua, ésta sería desplazada de la superficie del platino por moléculas de hidrógeno y oxígeno. Así, el proceso de escisión del hidrógeno y el oxígeno, su combinación en agua, la liberación de ésta, la escisión de más hidrógeno y oxígeno, y la transformación de más agua continuaría de forma indefinida.

Este fenómeno se denomina «catálisis de superficie». Por supuesto, cuanto más finamente se halle dividido el metal, tanta más superficie ofrecerá una masa dada y con tanta mayor eficacia podrá producirse la catálisis. Por supuesto, si una sustancia extraña se une firmemente a los enlaces superficiales del platino, «envenenará» al catalizador.

Todos los catalizadores de superficie son más o menos selectivos o «específicos». Algunos absorben fácilmente moléculas de hidrógeno y catalizan reacciones en las que se halla implicado el hidrógeno; otros absorben con facilidad moléculas de agua y catalizan condensaciones o hidrólisis, etc.

La capacidad de las superficies para captar capas de moléculas («adsorción») la manifiestan muchas sustancias y puede aplicarse a otros usos distintos del de la catálisis. El dióxido de silicio preparado en forma esponjosa («gel de silicio») adsorberá grandes cantidades de agua.

En el acondicionamiento del equipo electrónico, cuyo rendimiento sufriría sometido a condiciones de humedad elevada, actúa como «desecador», reduciendo la humedad al mínimo.

Por otra parte, el carbón finamente dividido («carbón activado») adsorberá con facilidad moléculas orgánicas; cuanto mayor sea la molécula orgánica, tanto más fácilmente será adsorbida. El carbón activado puede ser utilizado para decolorar soluciones, pues adsorberá las impurezas coloreadas (por lo general de peso molecular elevado) dejando sin adsorber a la sustancia deseada (por lo general incolora y de peso molecular comparativamente bajo).

El carbón activado también se ha utilizado en las máscaras antigás. Su uso ya fue previsto por el físico inglés John Stenhouse, quien por vez primera preparó un filtro de carbón para el aire en el año 1853. El oxígeno y el nitrógeno del aire pasan a través de una máscara de este tipo sin dificultad, pero son adsorbidas las moléculas relativamente grandes de los gases venenosos.

El mundo orgánico también posee sus catalizadores. En realidad, algunos de ellos se conocen desde hace miles de años, aunque no por el mismo nombre. Son tan antiguos como la fabricación del pan y la elaboración del vino. La masa de pan, abandonada a sí misma, y protegida de la contaminación de las influencias ambientales, no fermentará. Si se añade una pizca de «levadura» (de la palabra latina que significa «subir»), aparecerán burbujas, que hincharán la masa y la harán más ligera.

La levadura también acelera la conversión de los zumos de frutas y granos en alcohol. Aquí de nuevo, la conversión implica la formación de burbujas, de tal modo que el proceso se ha denominado «fermentación», a partir de la palabra latina que significa «hervir». La preparación de la levadura se denomina «fermento».

Hasta el siglo XVII no se descubrió la naturaleza de la levadura. En el año 1680, Van Leeuwenhoek observó por vez primera células de levadura. Para este fin hizo uso de un instrumento que revolucionaría la Biología: el «microscopio». Se

basa en el empleo y el enfoque de la luz mediante lentes. Ya hacia el año 1590 se idearon instrumentos que utilizaban combinaciones de lentes («Microscopios compuestos») por un pulidor de lentes, Zacharias Janssen. Los microscopios primitivos fueron en principio de utilidad, pero las lentes estaban tan imperfectamente pulidas que los objetos ampliados aparecían como burbujas cubiertas de pelusa, de estructura inapreciable. Van Leeuwenhoek pulió lentes delgadas, pero perfectas, que aumentaban la imagen hasta 200 veces. Utilizó lentes simples («microscopio simple»).

Con el tiempo se extendió la práctica de utilizar buenas lentes en combinaciones (pues un microscopio compuesto tiene, al menos potencialmente, un mayor poder de resolución que un microscopio simple), y se hizo aún más extenso el mundo de lo muy pequeño. Un siglo y medio después de Leeuwenhoek, un físico francés, Charles Cagniard de la Tour, usando un buen microscopio estudió los pequeños fragmentos de levadura con la suficiente atención como para observarlos en el proceso de autorreproducción.

Las pequeñas burbujas tenían vida. Más tarde, hacia 1850, la levadura se convirtió en un importante objeto de estudio.

La industria vinícola de Francia atravesaba momentos difíciles. El vino durante el proceso de envejecimiento, se agriaba y no era posible beberlo, con lo cual se perdían millones de francos. El problema fue planteado al joven decano de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Lila en el corazón de la región vinícola. Este joven decano era Louis Pasteur, quien ya había alcanzado cierta fama al ser el primero en separar isómeros ópticos en el laboratorio. Pasteur estudió con el microscopio las células de levadura en el vino. Era evidente para él que dichas células eran de diversos tipos. Todos los vinos que contenían levadura experimentaban fermentación, pero aquellos que se agriaban debían de contener además otro tipo de levadura. A Pasteur le pareció que el vino no se agriaba hasta que finalizaba la fermentación. En este caso, puesto que ya no se precisaba más levadura después de este proceso, ¿por qué no desembarazarse de toda ella en este momento y evitar que la de clase perjudicial creara más trastornos? Sugirió, por tanto, a una industria vinícola horrorizada, que el vino debía ser suavemente calentado después de la fermentación, al objeto de exterminar toda la levadura

existente en él. Predijo que el envejecimiento proseguiría seguidamente sin que el vino se agriara. La industria ensayó al fin su afrentosa propuesta, y, para su delicia, halló que efectivamente cesaba de agriarse el vino, mientras su aroma no se alteraba en lo más mínimo por el calentamiento. La industria del vino se había salvado. Por otra parte, el proceso de un suave calentamiento («pasteurización») fue posteriormente aplicado a la leche para matar cualquier germen patógeno presente en ella.

Otros organismos, además de la levadura, aceleran los procesos de degradación. En realidad, en el tracto intestinal tiene lugar un proceso análogo al de la fermentación. El primer hombre en estudiar científicamente la digestión fue el físico francés René-Antoine Ferchault de Réaumur. Utilizando un halcón como animal de experimentación, en el año 1752 le hizo deglutar pequeños tubos metálicos que contenían carne; dichos cilindros protegían a los alimentos de cualquier acción mecánica de molienda, pero, al mismo tiempo, poseían aberturas, cubiertas por una fina malla metálica, para que los procesos químicos del estómago pudieran actuar libremente sobre la carne. Réaumur comprobó que, cuando el halcón regurgitaba estos tubos, los alimentos aparecían parcialmente disueltos e iban acompañados de un fluido amarillento.

En 1777, el médico escocés Edward Stevens aisló un líquido a partir del estómago («jugo gástrico») y mostró que el proceso disolvente podía tener lugar fuera del organismo, divorciándolo así definitivamente de la influencia directa de la vida.

Evidentemente, los jugos gástricos contenían algo que aceleraba el proceso de desintegración de los alimentos. En 1834, el naturalista alemán Theodor Schwann añadió cloruro mercúrico al jugo de estómago y precipitó un polvo blanco. Después de liberar al polvo del compuesto de mercurio y disolver el residuo obtenido, halló que la solución manifestaba una intensa acción digestiva. Al polvo que había descubierto lo denominó «pepsina», de la palabra griega que significa «digerir».

Mientras tanto, dos químicos franceses, Anselme Payen y J. F. Persoz, habían hallado en el extracto de malta una sustancia capaz de determinar la conversión del almidón en azúcar más rápidamente de lo que lo podía hacer un ácido. Denominaron a dicha sustancia «diastasa», de una palabra griega que significa «separar», puesto que la habían separado de la malta.

Durante mucho tiempo, los químicos establecieron una clara distinción entre los fermentos vivos, tales como las células de levadura, y los fermentos no vivos o «no organizados», como la pepsina. En el año 1878, el fisiólogo alemán Wilhelm Kühne sugirió que a estos últimos debía de nominárseles «enzimas», a partir de las palabras griegas que significaban «en la levadura», debido a que su actividad era similar a la manifestada por las sustancias catalizadoras en la levadura. Kühne no llegó a presenciar cuán importante, en realidad cuán universal, llegaría a ser el término «enzima».

En 1897, el químico alemán Eduard Buchner, utilizando arena, molió células de levadura, con objeto de romperlas todas, y logró extraer un jugo que podía ejercer la misma actividad fermentativa que aquella desarrollada por las células de levadura originales. Bruscamente se desvaneció la distinción entre fermentos en el interior y en el exterior de las células. Representó otro rudo golpe para la semimística distinción sostenida por los vitalistas entre lo vivo y lo inerte. El término «enzima» fue aplicado desde entonces a todos los fermentos.

Por su descubrimiento, Buchner recibió el premio Nobel de Química de 1907.

Desde entonces fue posible definir una enzima simplemente como un catalizador orgánico. Los químicos iniciaron estudios encaminados a lograr el aislamiento de las enzimas y a precisar qué tipo de sustancias eran realmente. El primer problema que se les planteó fue motivado por el hecho que la cantidad de enzimas en las células y jugos naturales era muy pequeña, y los extractos obtenidos eran, invariablemente, algún tipo de mezclas, siendo en éas muy difícil deslindar lo que era propiamente una enzima y lo que no lo era.

Muchos bioquímicos sospecharon que las enzimas eran sencillamente proteínas, debido a que sus propiedades enzimáticas podían ser destruidas con facilidad, tal como ocurriría en las proteínas, al ser desnaturadas por calentamiento suave. Pero, hacia 1920, el bioquímico alemán Richard Willstätter indicó que ciertas soluciones enzimáticas purificadas, de las que él consideraba había eliminado toda proteína, mostraban marcados efectos catalíticos.

A partir de esto llegó a la conclusión de que las enzimas no eran en realidad proteínas, sino sustancias químicas relativamente sencillas, que podían, además, utilizar una proteína como «molécula transportadora». La mayoría de los

bioquímicos siguieron las ideas de Willstätter, que poseía el premio Nobel y gozaba de gran prestigio.

Sin embargo, el bioquímico James Batcheller Sumner, de la Universidad de Cornell, aportó pruebas evidentes en contra de esta teoría, casi al mismo tiempo en que fue dada a conocer. A partir de las semillas blancas de una planta americana tropical, Sumner aisló ciertos cristales que, en solución, mostraban las propiedades de una enzima denominada «ureasa». Esta enzima catalizaba la degradación de la urea en anhídrido carbónico y amoníaco.

Los cristales obtenidos por Sumner mostraban propiedades proteicas definidas, y no consiguió separar la actividad proteica de la enzimática. Todo lo que desnaturalizaba a la proteína también destruía a la enzima. Esto parecía demostrar que lo que había obtenido era una enzima en forma pura y cristalina, y, al mismo tiempo, establecer que la enzima era efectivamente una proteína.

La gran fama de Willstätter restó importancia durante un cierto tiempo al descubrimiento de Sumner. Pero, en 1930, el químico John Howard Northrop y sus colaboradores en el «Instituto Rockefeller» aportaron argumentos irrefutables en favor de los hallazgos de Sumner. Cristalizaron una serie de enzimas, inclusive la pepsina, y comprobaron que todas ellas eran ciertamente proteínas. Además, Northrop mostró que estos cristales eran proteínas muy puras y retenían su actividad catalítica, aún cuando se disolvieran o dividieran hasta un punto tal, que las pruebas químicas ordinarias, como las utilizadas por Willstätter, no pudieran detectar ya la presencia de proteínas.

Así, pues, se estableció definitivamente que las enzimas eran «catalizadores proteicos». Por aquel entonces se había cristalizado ya un centenar de enzimas y todas ellas resultaron sin excepción proteínas.

Por su trabajo, Sumner y Northrop compartieron el premio Nobel de Química de 1946 (con Stanley).

Las enzimas son catalizadores peculiares en dos aspectos: eficacia y especificidad. Por ejemplo, existe una enzima denominada catalasa, que cataliza la transformación del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno. No obstante, el peróxido de hidrógeno en solución puede descomponerse bajo la acción catalítica de limaduras de hierro o del dióxido de manganeso. Sin embargo, ponderalmente, la catalasa

acelera la velocidad de descomposición mucho más de lo que puede hacer cualquier catalizador inorgánico. Cada molécula de catalasa puede descomponer 44.000 moléculas de peróxido de hidrógeno por segundo a 0º C. De esto se desprende que basta una pequeña concentración de enzima para realizar su función.

Por esta misma razón, serán capaces de poner fin a la vida incluso cantidades muy pequeñas de ciertas sustancias («venenos»), en tanto puedan interferir las acciones de una enzima de importancia clave. Los metales pesados, como el mercurio o el bario, administrados en forma de cloruro o nitrato respectivamente, reaccionan con los grupos tiol, esenciales para que muchas enzimas realicen su función. Como consecuencia, la acción de tales enzimas cesa y el organismo resulta envenenado. Compuestos tales como el cianuro potásico o el ácido cianhídrico hacen entrar a su grupo cianuro (-CN) en combinación con el átomo de hierro de otras enzimas de importancia crucial, y por ello causan rápidamente la muerte, suponemos que de forma indolora, ya que el ácido cianhídrico es el gas utilizado para ejecutar en las cámaras de gas en algunos de los Estados occidentales de los Estados Unidos.

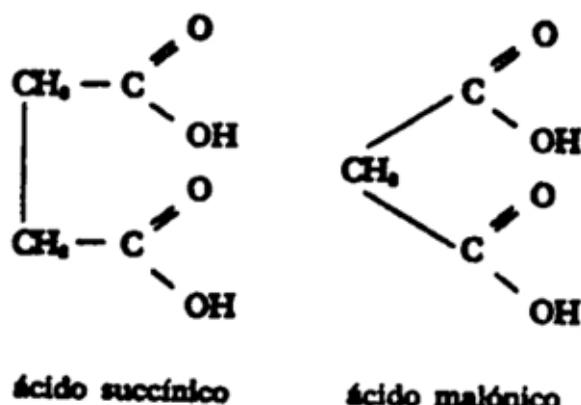
El monóxido de carbono constituye una excepción entre los venenos corrientes. No actúa sobre las enzimas de forma primaria, sino que bloquea la función de la molécula de hemoglobina (ésta una proteína, pero no una enzima), la cual ordinariamente transporta el oxígeno desde los pulmones a las células, pero no puede llevar a cabo esta función cuando el monóxido de carbono se ha fijado en ella. Los animales que no utilizan hemoglobina para el transporte de oxígeno no resultan afectados por el monóxido de carbono.

Las enzimas, como revela el demostrativo ejemplo de la catalasa, son muy específicas; la catalasa descompone únicamente al peróxido de hidrógeno, mientras que los catalizadores inorgánicos, tales como las limaduras de hierro y el dióxido de manganeso, pueden descomponer al peróxido de hidrógeno y, además, catalizar otras muchas reacciones.

¿A qué se debe esta llamativa especificidad de las enzimas? Las teorías de Lunge y Langmuir sobre el papel de intermediario desempeñado por el catalizador sugieren una respuesta. Supongamos que una enzima forma una combinación temporal con el «sustrato»: la sustancia cuya reacción cataliza aquella enzima. La forma, o configuración, de la enzima particular que se considere puede, por lo

tanto, desempeñar un papel muy importante. Realmente, toda enzima debe poseer una superficie muy compleja, pues tiene una serie de diferentes cadenas laterales que emergen de la columna peptídica central. Algunas de estas cadenas laterales tienen una carga negativa, otras una positiva, y aún otras no poseen carga eléctrica alguna. Unas cadenas son de grandes dimensiones, otras en cambio, pequeñas. Puede suponerse que cada enzima posee una superficie que se ajusta especialmente a un sustrato particular. En otras palabras, se adapta al sustrato como una llave lo hace a la cerradura correspondiente. Por lo tanto, se combinará de forma fácil con aquella sustancia, pero sólo difícilmente, o de ninguna manera, con todas las restantes. Esto podría explicar la gran especificidad de las enzimas; cada una de ellas tiene una superficie elaborada con el fin, digamos, de combinarse con un compuesto particular. Si así fuera, no es de maravillar que las proteínas sean formadas con tantas unidades diferentes y sean elaboradas por los tejidos vivos en una variedad tan grande.

Este punto de vista sobre el mecanismo de acción de las enzimas surgió del descubrimiento de que la presencia de una sustancia de estructura similar a la de un sustrato dado podía hacer más lenta e inhibir la reacción del sustrato catalizado por la enzima. El caso mejor conocido es el de una enzima denominada deshidrogenasa del ácido succínico, que cataliza la eliminación de dos átomos de hidrógeno a partir de dicho ácido. Esa reacción no tendrá lugar si se halla presente una sustancia denominada ácido malónico, muy similar al ácido succínico. Las estructuras de ambos ácidos son



La única diferencia entre estas dos moléculas es que el ácido succínico tiene un grupo  $\text{CH}_2$  más, en el lado izquierdo de la fórmula. Seguramente el ácido malónico,

debido a su estructura semejante a la del ácido succínico, puede unirse a la superficie de la enzima. Una vez se encaja en el punto de la superficie donde lo hará el ácido succínico, permanece, digamos, aprisionado allí y entonces la enzima ya no puede ejercer su función. El ácido malónico ha «envenenado» a la enzima, por lo que respecta a su función normal. Este tipo de fenómeno se denomina «inhibición competitiva».

La prueba más positiva en favor de la teoría de la formación de un complejo entre la enzima y el sustrato procede del análisis espectrográfico. Seguramente, cuando una enzima se combina con su sustrato, se produce una modificación de su espectro de absorción: la absorción de la luz por la combinación será diferente de aquella determinada por sólo la enzima o el sustrato. En 1936, los bioquímicos ingleses David Keilin y Thaddeus Mann detectaron una modificación del color de una solución de la enzima peroxidasa, después de la adición de su sustrato, el peróxido de hidrógeno. El biofísico norteamericano Britton Chance efectuó un análisispectral y descubrió que tenían lugar dos modificaciones progresivas y sucesivas en el espectro de absorción. Atribuyó el primer cambio en el espectrograma a la formación del complejo enzima-sustrato a una cierta velocidad, y el segundo a la descomposición de esta combinación, cuando finaliza la reacción. En 1964, el bioquímico japonés Kunio Yagi comunicó el aislamiento de un complejo enzima-sustrato, constituido por la enzima D-aminoácido-oxidasa levemente unida a la alanina, su sustrato.

Ahora se plantea la cuestión: ¿Es necesaria la totalidad de la molécula de enzima: para la catálisis, o bastará sólo una parte de ella? Ésta es una cuestión importante, tanto desde el punto de vista práctico, como desde el teórico. Hoy en día las enzimas se utilizan cada vez más ampliamente; se las ha empleado para la fabricación de fármacos, ácido cítrico y otras muchas sustancias químicas. Si la totalidad de la molécula de enzima no es necesaria y un pequeño fragmento de la misma fuera suficiente para desempeñar su función, quizás esta porción activa podría ser sintetizada, de tal modo que el proceso no dependería ya del empleo de células vivas, tales como las levaduras, hongos y bacterias.

Se han hecho algunos progresos prometedores en este sentido. Por ejemplo, Northrop descubrió que cuando se añadían algunos grupos acetilo ( $\text{CH}_3\text{CO}$ ) a las

cadenas laterales del aminoácido tirosina en la molécula de pepsina, la enzima perdía parte de su actividad. Sin embargo, ésta se conservaba cuando los grupos cetilo se adicionaban a las cadenas laterales de lisina en la pepsina. Por lo tanto debía contribuir a la actividad manifestada por la pepsina, mientras que, evidentemente, la lisina no lo hacía. Éste fue el primer indicio de que una enzima podía poseer porciones no esenciales para su actividad.

Recientemente se ha determinado con mayor precisión la «región activa» de una enzima digestiva. Se trata de la enzima llamada quimiotripsina. El páncreas la segregá primeramente en una forma inactiva, el denominado «quimiotripsinógeno». Esta molécula inactiva se convierte en la activa por escisión de un único enlace peptídico (que es efectuada por la enzima digestiva tripsina). Es decir, parece como si la puesta al descubierto de un simple aminoácido proporcionara a la quimiotripsina su actividad. Ahora se sabe que la adición de una molécula de DFF (diisopropífluorofosfato) a la quimiotripsina inactiva a esta enzima. Seguramente el DFF se une al aminoácido de importancia clave. Gracias al marcado con el DFF, aquel aminoácido ha sido identificado como la serina. En realidad, también se ha observado que el DFF se une a la serina de otras enzimas digestivas. En todos los casos la serina se halla en la misma posición de una secuencia de cuatro aminoácidos: glicina-ácido aspártico-serina-glicina.

Es indudable que un péptido constituido únicamente por esos cuatro aminoácidos no manifestará su actividad catalítica. De alguna manera, el resto de una molécula de enzima también desempeña cierto papel. Podemos suponer que esta secuencia de cuatro aminoácidos -el centro activo- es análogo al borde cortante de un cuchillo, que, no obstante, no puede utilizarse sin el correspondiente mango.

El centro activo, o borde cortante, no debe ser necesariamente un elemento único en la cadena de aminoácidos. Consideremos la enzima ribonucleasa. Ahora que se conoce el orden exacto en que se hallan dispuestos sus 124 aminoácidos, ha sido posible idear métodos para sustituir éste o aquel aminoácido en la cadena y apreciar el efecto del cambio sobre la acción de la enzima. Se ha descubierto que tres aminoácidos en particular son necesarios para el desarrollo de su acción, pero que éstos se hallan ampliamente separados. Dichos aminoácidos son una histidina en la posición 12, una lisina en la posición 41 y otra histidina en la posición 119.

Por supuesto, esta separación existe sólo en la cadena considerada como una cinta extendida. En la molécula operante, la cadena se muestra arrollada adoptando una configuración tridimensional específica, mantenida por cuatro moléculas de cistina, que se extienden como puentes entre los segmentos curvados de la cadena. En dicha molécula, los tres aminoácidos necesarios se hallan próximos entre sí, formando una unidad íntimamente entrelazada. Se especificó más todavía la cuestión del centro activo en el caso de la lisocima, una enzima presente en muchos lugares incluidas las lágrimas y la mucosidad nasal. Provoca la disolución de las células bacterianas, catalizando la descomposición de los eslabones básicos en algunas sustancias que componen la pared celular bacteriana. Es como si ocasionara el resquebrajamiento de esa pared y dejara escapar el contenido de las células.

La lisocima fue la primera enzima cuya estructura se sometió a un análisis completo (1965) en las tres dimensiones. Se descubrió el eslabón básico entre un átomo de oxígeno en la cadena ramificada del ácido glutámico (posición # 35) y otro átomo de oxígeno en la cadena ramificada del ácido aspártico (posición # 52). Se conjuraron ambas posiciones mediante el pliegue de la cadena de ácido amínico con la separación suficiente entre ambas para el alojamiento de la molécula que se debería atacar. En tales circunstancias podía tener lugar fácilmente la reacción química necesaria para romper el eslabón. Ésta es la forma específica que permite trabajar ordenadamente a la lisocima.

Por otra parte, algunas veces ocurre también que el borde cortante de la molécula enzimática no es en absoluto un grupo de aminoácidos, sino una combinación atómica de naturaleza totalmente distinta. Más adelante se mencionarán algunos ejemplos.

No podemos jugar con este borde cortante, pero ¿podríamos modificar el mango del cuchillo sin afectar la eficacia de la herramienta? La existencia de variedades distintas, por ejemplo, de una proteína como la insulina, nos permite considerar que sí podemos hacerlo. La insulina es una hormona, no una enzima, pero su función es muy específica. En una cierta posición de la cadena G de la insulina existe una secuencia de 3 aminoácidos, que es distinta en los diferentes animales. En el ganado vacuno es la alanina-serina-valina; en el cerdo, treoninaserina-isoleucina;

en las ovejas, alanina-glicina-valina; en los caballos, treonina-glicina-isoleucina; y así sucesivamente. Cualquiera de estas insulinas puede ser sustituida por cualquier otra y realizar todavía la misma función.

Aún es más; una molécula proteica puede en ocasiones ser fragmentada de modo drástico sin que resulte afectada seriamente su actividad (de la misma manera como el mango de un cuchillo o el de un hacha pueden acortarse sin que su eficacia se vea considerablemente reducida). Un ejemplo de esto lo constituye la hormona denominada ACTH (hormona adrenocorticotrópica). Esta hormona es una cadena peptídica constituida por 39 aminoácidos, cuyo orden de sucesión ha sido ahora plenamente determinado. Pueden eliminarse hasta 15 de los aminoácidos a partir del extremo C-terminal sin destruir la actividad de la hormona. Por otra parte, la eliminación de uno o dos aminoácidos del extremo N-terminal (por así decirlo el borde cortante) inactiva la molécula.

Lo mismo se ha hecho con una enzima denominada «papaína», procedente de los frutos y la savia del árbol papaya. Su acción enzimática es similar a la de la pepsina. La supresión de 80 de los 180 aminoácidos de la molécula de papaína a partir del extremo N-terminal no reduce su actividad en grado apreciable.

Así, pues, puede al menos concebirse que las enzimas podrían simplificarse hasta un punto tal que su síntesis fuera factible. Las enzimas sintéticas, en la forma de compuestos orgánicos bastante simples, podrían obtenerse entonces a gran escala, utilizándolas para distintos fines.

Ésta podría ser una forma de «miniaturización química».

## Metabolismo

Un organismo tal como el cuerpo humano es una fábrica de productos químicos de gran diversidad. Respira oxígeno y bebe agua. Incorpora como alimentos hidratos de carbono, grasas, proteínas, sustancias minerales y otras materias primas. Elimina diversos materiales no digeribles, así como bacterias y los productos de la putrefacción que producen. También excreta anhídrido carbónico a través de los pulmones, elimina agua por dichos órganos y las glándulas sudoríparas, y expele orina, que transporta una serie de compuestos en solución, el principal de los cuales es la urea. Estas reacciones químicas determinan el metabolismo del organismo.

Examinando las materias primas que penetran en el organismo y los productos de desecho, podremos decir unas cuantas cosas acerca de lo que ocurre en el interior del organismo. Por ejemplo, puesto que las proteínas aportan la mayor parte del nitrógeno que penetra en el organismo, sabemos que la urea ( $\text{NH}_2\text{CONH}_2$ ) debe ser un producto del metabolismo de las proteínas. Pero entre las proteínas y la urea existe una larga, tortuosa y complicada senda a recorrer. Cada enzima del organismo cataliza sólo una reacción específica, consistente quizás en la simple redisposición de 2 ó 3 átomos. Cada conversión importante en el organismo implica el paso a través de una multitud de fases y la participación de muchas enzimas.

Incluso un organismo aparentemente simple, tal como la diminuta bacteria, debe hacer uso de muchos miles de enzimas y reacciones distintas.

Todo esto podría parecer innecesariamente complejo, pero en realidad es la misma esencia de la vida. La vasta complejidad de reacciones en los tejidos puede ser controlada delicadamente aumentando o reduciendo la producción de las enzimas apropiadas. Las enzimas controlan la química del organismo, al igual que los intrincados movimientos de los dedos sobre las cuerdas controlan la música de un violín, y, sin esta complejidad, el organismo no podría llevar a cabo sus múltiples funciones.

Seguir el curso de las miríadas de reacciones que constituyen el metabolismo del organismo es seguir los trazos que perfilan la vida. El intentar precisarlo con detalle, dar sentido al entrelazamiento de las incontables reacciones que se producen simultáneamente, puede sin duda parecer una tarea formidable o incluso químérica. Formidable, sin duda, lo es, pero no irremisiblemente condenada al fracaso.

El estudio por los químicos del metabolismo se inició modestamente con un esfuerzo por descubrir cómo las células de levadura convertían el azúcar en alcohol etílico. En el año 1905, dos químicos británicos, Arthur Harden y W. J. Young, sugirieron que este proceso implicaba la formación de azúcares que poseían grupos fosfatos. Fueron los primeros en apreciar que el fósforo desempeñaba un papel importante (y, desde entonces, el fósforo ha adquirido una importancia cada vez mayor). Harden y Young hallaron incluso en los tejidos vivos un éster azúcar-fosfato que consistía del azúcar fructosa con dos grupos fosfato ( $\text{PO}_3\text{H}_2$ ). Este «fructosa difosfato» (algunas veces denominado aún «éster de Harden-Young») fue el primer

«intermediario metabólico» identificado con precisión, es decir, el primer compuesto del cual se reconocía que era formado momentáneamente en el proceso que discurría desde los compuestos ingeridos por el organismo hasta los compuestos eliminados por él. Harden y Young establecieron de este modo las bases del estudio del «metabolismo intermediario», que intenta precisar la naturaleza de tales productos intermedios y las reacciones en las cuales se hallan implicados. Por este trabajo, y por sus ulteriores investigaciones sobre las enzimas que participan en la conversión del azúcar en alcohol por la levadura (véase capítulo XIV), Harden compartió el premio Nobel de Química de 1929 (con Euler-Chelpin).

Lo que en un principio era considerado peculiar de la célula de levadura adquirió más tarde una gran trascendencia, cuando el químico alemán Otto Meyerhof demostró, en 1918, que células animales tales como las musculares, metabolizaban el azúcar casi de la misma manera como lo hacía la levadura. La diferencia primordial consistía en que, en las células animales, la degradación no proseguía hasta un estadio tan avanzado de esta vía particular del metabolismo. En vez de convertir a la molécula de glucosa, con sus 6 átomos de carbono, en el alcohol etílico, de 2 átomos de carbono ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ), sólo la metabolizaban hasta dar lugar a la sustancia con 3 átomos de carbono denominada ácido láctico ( $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$ ). Los trabajos de Meyerhof vertieron por vez primera cierta luz sobre el principio general que desde entonces ha sido aceptado de forma unánime: que, con pequeñas diferencias, el metabolismo sigue las mismas vías en todas las criaturas, desde la más simple a la más compleja.

Por sus estudios sobre el ácido láctico en el músculo, Meyerhof compartió el premio Nobel de Fisiología y Medicina de 1922 con el fisiólogo inglés Archibald Vivian Hill. Este último había estudiado el músculo desde el punto de vista de su producción de calor, llegando a conclusiones muy similares a las obtenidas por Meyerhof mediante su resolución química del problema.

Los detalles de las fases individuales implicadas en la transformación de la glucosa en el ácido láctico fueron dilucidadas entre los años 1937 y 1941 por Carl Ferdinand Cori y su esposa Gerty Theresa Cori, que trabajaban en la Universidad Washington de San Luis. Utilizaron extractos de tejidos y enzimas purificadas, al objeto de provocar modificaciones en diversos ésteres azúcar-fosfato, y luego intentaron

ensamblar todas estas reacciones parciales cual si se tratara de un rompecabezas. El esquema de las reacciones concatenadas que presentaron se ha conservado, con pequeñas modificaciones, hasta la actualidad, y los Cori compartieron (con Houssay) el premio Nobel de Fisiología y Medicina de 1947.

En la vía del azúcar al ácido láctico se produce una cierta cantidad de energía que es utilizada por las células. La célula de levadura vive de ella cuando fermenta al azúcar, y así lo hace también, cuando es necesario la célula muscular. Es importante recordar que esta energía se obtiene sin la participación del oxígeno del aire. Así, un músculo es capaz de trabajar, aún cuando deba gastar más energía de la que puede ser remplazada por las reacciones que implican la utilización del oxígeno llegado hasta él en una proporción relativamente baja, a través de la sangre. Sin embargo, cuando el ácido láctico se acumula, el músculo se fatiga y debe descansar hasta que el oxígeno haya degradado el ácido láctico.

Seguidamente se plantea la pregunta: ¿De qué forma es proporcionada a las células la energía procedente de la degradación metabólica del azúcar en ácido láctico, y cómo la utilizan? El químico norteamericano, de origen alemán, Fritz Albert Lipmann halló una respuesta merced a las investigaciones iniciadas en 1941. Mostró que ciertos compuestos de fosfato, formados en el curso del metabolismo de los hidratos de carbono, acumulan cantidades considerables de energía en el enlace que conecta al grupo fosfato con el resto de la molécula. Este «enlace fosfato de alta energía» es transferido a transportadores de energía presentes en todas las células. El más conocido de estos transportadores es el «trifosfato de adenosina» TFA, o con su sigla internacional ATP. La molécula de TFA y ciertos compuestos similares representan las monedas de escaso valor en el activo energético de la economía. Acumulan la energía en bonos rápidamente negociables, netos y de conveniente cuantía. Cuando el enlace fosfato es hidrolizado, la energía disponible puede convertirse en energía química para la formación de proteínas a partir de los aminoácidos, en energía eléctrica para la transmisión de un impulso nervioso, o en energía cinética mediante la contracción del músculo, etc. Aunque la cantidad de TFA en el organismo es pequeña en cualquier momento dado, siempre existe la suficiente (mientras dura la vida), pues tan pronto como las moléculas de TFA son utilizadas, se forman otras nuevas.

Por su crucial descubrimiento, Lipmann compartió el premio Nobel de Fisiología y Medicina del año 1953 (con Krebs).

El organismo de los mamíferos no puede convertir el ácido láctico en alcohol etílico (como lo hace la levadura), en cambio, a través de otra vía metabólica salva la etapa que representa el alcohol etílico y degrada al ácido láctico en anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) y agua. Para lograr este objetivo consume oxígeno y produce una gran cantidad de energía, mucho mayor que la generada por la conversión anaeróbica (es decir, sin la participación del oxígeno) de la glucosa en el ácido láctico.

El hecho que el consumo de oxígeno se halle implicado ofrece un medio conveniente para seguir el curso del proceso metabólico; es decir, para hallar qué productos intermediarios se crean a lo largo de esta vía metabólica. Supongamos que en una etapa dada de una secuencia de reacciones se sospecha que una cierta sustancia (por ejemplo el ácido succínico) es el sustrato intermediario. Podremos mezclar a este sustrato con tejido (o, en muchos casos, con una única enzima) y medir la velocidad con que consume oxígeno. Si muestra una rápida incorporación de oxígeno, tendremos la certeza que esta sustancia particular puede participar en el proceso.

El bioquímico alemán Otto Heinrich Warburg ideó el instrumento idóneo para medir la proporción en que es incorporado el oxígeno. El denominado «manómetro de Warburg» consiste en un pequeño matraz (donde se mezclan el sustrato de tejido o la enzima) conectado a un extremo de un delgado tubo en forma de U, mientras que el otro extremo del tubo está abierto. Un líquido coloreado llena la parte inferior del tubo en U. Puesto que la mezcla de la enzima y el sustrato absorbe oxígeno a partir del aire en el matraz, se produce un ligero vacío en él y el líquido coloreado en el tubo asciende por la rama conectada con el matraz. La proporción en que asciende la columna de líquido puede utilizarse para calcular la intensidad de la incorporación de oxígeno.

Las experiencias de Warburg sobre el consumo de oxígeno por los tejidos le valieron el premio Nobel de Fisiología y Medicina del año 1931.

Warburg y otro bioquímico alemán, Heinrich Wieland, identificaron las reacciones que producen energía durante la degradación del ácido láctico. En el curso de la

serie de reacciones, pares de átomos de hidrógeno son eliminados de las sustancias intermediarias mediante enzimas denominadas «deshidrogenasas». Estos átomos de hidrógeno se combinan luego con el oxígeno, con la ayuda catalítica de las enzimas llamadas «citrocromos». A finales de la década 1920-1930, Warburg y Wieland adoptaron posiciones contrapuestas sobre cuál de estas reacciones era la más importante, sosteniendo Warburg que la de mayor importancia era la de incorporación del oxígeno, y Wieland que era la de la eliminación del hidrógeno. David Keilin demostró que ambas fases eran igualmente esenciales.

El bioquímico alemán Hans Adolf Krebs inició la tarea de dilucidar la secuencia completa de reacciones y productos intermediarios, desde el ácido láctico, hasta el anhídrido carbónico y el agua. Éste es el denominado ciclo de Krebs, o ciclo del ácido cítrico, siendo éste uno de los productos de importancia crucial formados en este ciclo.

Por este logro, que fue finalmente obtenido en 1940, Krebs compartió junto con Lipmann, el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1953.

El ciclo Krebs produce el mayor porcentaje de energía, como si dijéramos la parte del león, en los organismos que requieren oxígeno molecular para la respiración (lo cual significa todos los organismos salvo algunos tipos de bacterias anaeróbicas cuya adquisición de energía estriba en reacciones químicas no relacionadas con el oxígeno). En diferentes puntos del ciclo Krebs un compuesto perderá dos átomos de hidrógeno que se combinarán a su debido tiempo con el oxígeno para formar agua. Tras la expresión «a su debido tiempo» se ocultan muchos pormenores. Los dos átomos de hidrógeno circulan por muy diversas moléculas citocrómicas hasta que la última, la «oxidasa citocrómica» lo pasa al oxígeno molecular. A lo largo de esa cadena de citrocromos se forman las moléculas de TFA que abastecen al cuerpo con su «modesta» energía química. Recapitulando: por cada giro del ciclo Krebs se forman dieciocho moléculas de TFA. No se sabe con exactitud dónde ni cómo se forma la TFA en la cadena. Puesto que todo el proceso requiere oxígeno y acumulación de grupos fosfáticos para formar la TFA, se ha estimado conveniente denominarlo «fosforización oxidásica»; ésta es una reacción básica en los tejidos del ser vivo. Cualquier interferencia sería en su funcionamiento (tal como la ingestión de cianuro potásico) ocasiona la muerte al cabo de pocos minutos.

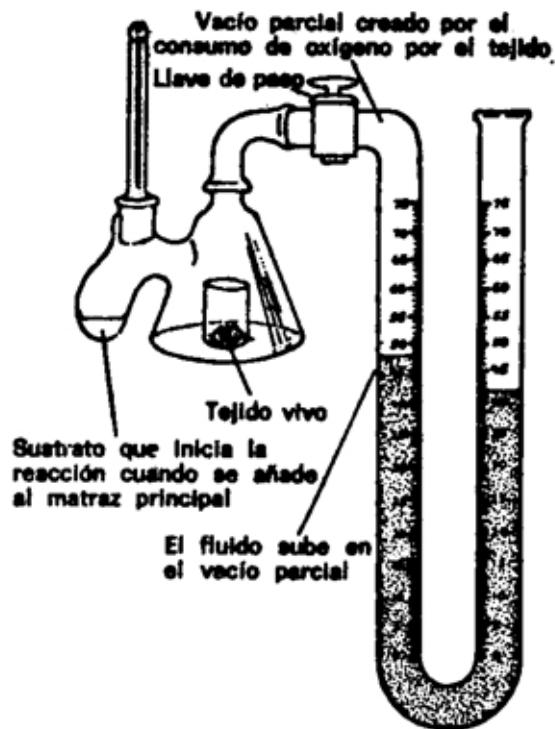
Los diminutos corpúsculos dentro del citoplasma contienen todas las sustancias y enzimas participantes en la fosforización oxidásica. Las detectó por primera vez en 1898 el biólogo alemán C. Benda, quien -como es natural- no percibió su alcance por aquellas fechas. Él las llamó «mitocondrios» (tomándolas erróneamente por «filamentos de cartílago») y el nombre perduró.

El mitocondrio usual parece por su forma, un balón de rugby con 1/25.000 centímetros de longitud y 1/62.500 centímetros de grosor. Una célula mediana puede contener entre varios centenares y un millar de mitocondrios. Las células excepcionalmente grandes contienen unos doscientos mil, mientras que las bacterias anaeróbicas no contienen ninguno. Después de la Segunda Guerra Mundial, la investigación con microscopio electrónico mostró que el mitocondrio tenía una estructura enormemente compleja para su minúsculo tamaño; poseía una doble membrana cuya parte externa era lisa, mientras que la interna ofrecía una gran superficie de laberínticas arrugas. En esta superficie interna del mitocondrio se alojaban varios millares de exigüas estructuras denominadas «partículas elementales». Y eran ellas las que parecían representar el verdadero laboratorio de la fosforización oxidásica.

Mientras tanto, los bioquímicos habían obtenido algunos progresos en la resolución del problema que representaba el metabolismo de las grasas. Se sabía que las moléculas de las grasas eran cadenas de átomos de carbono que podían ser hidrolizadas en «ácidos grados» (en la mayor parte de los casos cadenas de 16 a 18 átomos de carbono dispuestos sucesivamente), y que las moléculas se fragmentaban cada vez en elementos de 2 átomos de carbono. En 1947, Fritz Lipmann descubrió un compuesto bastante complejo que desempeñaba un papel importante en la «acetilación», es decir, la transferencia de un fragmento de 2 átomos de carbono de un compuesto a otro. Denominó al compuesto «coenzima A» (la A procede del término de acetilación). Tres años más tarde, el bioquímico alemán Feodor Lynen halló que la coenzima A se hallaba íntimamente implicada en el metabolismo de las grasas. Una vez unida a un ácido graso, seguía una secuencia de 4 etapas que terminaban en el desprendimiento de un fragmento de dos átomos de carbono del extremo de la cadena a la que se hallaba unida la coenzima. Luego, otra molécula de coenzima A se unía a lo que se había separado del ácido graso, se

perdían otros dos átomos de carbono más, y así sucesivamente. Éste es el denominado «ciclo de oxidación de los ácidos grasos». Por éste y otros trabajos de investigación, Lynen compartió el premio Nobel de Fisiología y Medicina de 1964. La degradación de las proteínas evidentemente debe ser, en general, más compleja que aquellas de los hidratos de carbono o las grasas, debido a que se hallan implicados unos 20 aminoácidos diferentes. En algunos casos parece ser bastante simple: una pequeña modificación en un aminoácido puede convertirlo en un compuesto capaz de incorporarse al ciclo del ácido cítrico al igual que pueden hacerlo los fragmentos de 2 átomos de carbono procedentes de los ácidos grasos. Pero la mayor parte de los aminoácidos son descompuestos siguiendo vías complejas.

Podemos ahora referirnos de nuevo a la conversión de las proteínas en urea: la cuestión que consideramos al principio. Esta conversión parece ser comparativamente simple.



*Manómetro de Warburg.*

Un grupo de átomos, que es esencialmente la molécula de urea, forma parte de una cadena lateral del aminoácido arginina. Este grupo puede ser separado por una

enzima denominada «arginasa» y deja como resto un tipo de aminoácido truncado, denominado «ornitina». En 1932, Krebs y un colaborador, K. Henseleit, mientras estudiaban la formación de la urea por el tejido hepático de la rata, descubrieron que, cuando añadían arginina al tejido, se producía un considerable aumento en el contenido de urea, en realidad mucha más urea de la que podía haber producido la escisión de cada molécula de arginina que añadieron. Krebs y Henseleit, decidieron que las moléculas de arginina debían actuar como agentes que producían urea de forma reiterada. En otras palabras, cuando una molécula de arginina resulta desprovista de su fragmento ureico por la arginasa, la ornitina que se forma obtiene grupos amina a partir de otros aminoácidos (así como también anhídrido carbónico a partir del organismo) y forma de nuevo arginina. Así, la molécula de arginina se escinde repetidamente, vuelve a formarse, se escinde otra vez, y así de forma sucesiva, dando lugar en cada ocasión a una molécula de urea. Éste es denominado «ciclo de la urea», «ciclo de la ornitina» o el «ciclo de Krebs-Henseleit».

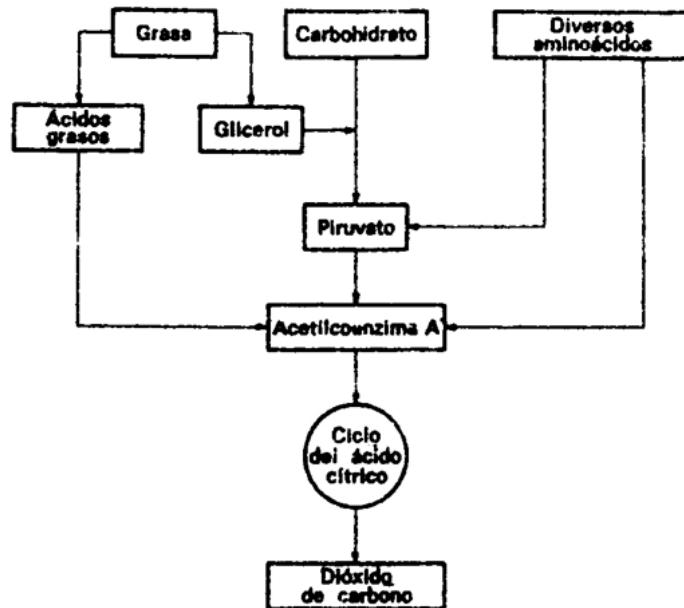
Después de la eliminación de nitrógeno, a través de la arginina, los restantes «esqueletos de carbono» de los aminoácidos pueden ser degradados, a través de diversas rutas, en anhídrido carbónico y agua, con producción de energía.

## Trazadores

Las investigaciones del metabolismo mediante todos estos artificios mantenían aún a los bioquímicos en la posición de estar viendo lo que ocurría, por así decirlo «desde la barrera». Podían elaborar ciclos generales, pero, para hallar qué era lo que realmente estaba teniendo lugar en el animal vivo, necesitaban algún sistema trazador que les permitiera seguir con detalle el curso de los acontecimientos a través de los estadios del metabolismo; es decir, precisar el destino de las moléculas individuales allí donde se hallaran. Realmente, las técnicas que lo hacían posible se descubrieron a principios de este siglo, pero los químicos comenzaron a emplearlas más bien lentamente en todas sus posibilidades.

El primer pionero en este campo fue el bioquímico alemán Franz Knoop. En 1904 concibió la idea de administrar a perros, con los alimentos, moléculas grasas marcadas para ver cuál era el destino de dichas moléculas. Las marcó uniéndoles un anillo de benceno a un extremo de la cadena; hizo uso del anillo de benceno debido

a que los mamíferos no poseen enzimas que puedan metabolizarlo. Knoop esperaba que lo que el anillo de benceno llevara con él, cuando apareciera en la orina, podría decirle algo acerca de cómo la molécula de grasa había sido metabolizada por el organismo, y estaba en lo cierto. El anillo de benceno invariablemente aparecía unido a una cadena lateral de dos átomos de carbono. De esto dedujo que el organismo separaba en cada ocasión de la molécula de grasa fragmentos de dos átomos de carbono. (Como hemos visto, 40 años más tarde, los trabajos realizados con la coenzima A confirmaron su deducción.) Las cadenas de átomos de carbono de las grasas más frecuentes contienen todas ellas un número par de átomos de carbono. ¿Qué ocurriría si se utilizara una grasa cuya cadena poseyera un número impar de átomos de carbono? En este caso, si los átomos fueran separados de la cadena de dos en dos, el producto final resultante estaría formado por el anillo de benceno con un átomo de carbono unido a él. Knoop administró a perros este tipo de molécula grasa y, por supuesto, obtuvo dicho resultado.



*El esquema completo del metabolismo de carbohidratos, grasas y proteínas.*

Knoop había empleado el primer «trazador» en Bioquímica. En 1913, el químico húngaro Georg von Hevesy y su colaborador, el químico alemán Friedrich Adolf Paneth, hallaron otra forma de marcar a las moléculas: mediante isótopos

radiactivos. Comenzaron con el plomo radiactivo, y su primer experimento bioquímico fue medir cuánto plomo, en la forma de una solución de sal de este metal, podía incorporar una planta. La cantidad era realmente demasiado pequeña para ser medida con cualesquiera de los métodos químicos entonces disponibles, pero, utilizando el plomo radiactivo, podía medirse fácilmente, debido a su radiactividad. Hevesy y Paneth alimentaron a plantas con la solución de la sal de plomo marcada radiativamente, y, a intervalos periódicos, calcinaron una planta y midieron la radiactividad de sus cenizas. De esta manera fueron capaces de determinar la proporción en que el plomo era absorbido por las células de la planta. Pero el anillo de benceno y el plomo eran sustancias muy poco «fisiológicas» para ser utilizadas como trazadoras. Con facilidad podían modificar la química normal de las células vivas. Sería mucho mejor emplear como trazadores a átomos que tomaran parte en el metabolismo ordinario del organismo: tales como los átomos de oxígeno, nitrógeno, carbono, hidrógeno, fósforo.

Una vez los Joliot-Curie hubieron demostrado, en 1934, la radiactividad artificial, Hevesy siguió en esta dirección y comenzó utilizando fosfatos que contenían fósforo radiactivo. Con ellos midió la incorporación del fosfato en las plantas. Desgraciadamente, los isótopos radiactivos de algunos de los elementos de importancia crucial en los tejidos vivos -especialmente el nitrógeno y el oxígeno- no son utilizables debido a que tienen una vida muy corta, siendo su vida media de sólo unos pocos minutos, a lo sumo. Pero la mayor parte de los elementos más importantes poseen isótopos estables que pueden ser utilizados como trazadores. Estos isótopos son el carbono 13, el nitrógeno 15, el oxígeno 18 y el hidrógeno 2. Comúnmente existen en cantidades muy pequeñas (alrededor del 1 % o menos); en consecuencia, «enriqueciendo» el hidrógeno natural en hidrógeno 2, por ejemplo, podrá utilizarse como trazador de una molécula que contenga hidrógeno administrada al organismo. La presencia del hidrógeno pesado en cualquier compuesto puede ser detectada mediante el espectrógrafo de masas, que lo separa en virtud de su mayor peso. De este modo puede seguirse a través del organismo el destino del hidrógeno marcado.

El hidrógeno, en realidad, fue el primer trazador fisiológico. Se dispuso de él para este fin cuando Harold Urey aisló el hidrógeno 2 (deuterio) en 1931. Uno de los

primeros hechos dilucidados con el uso del deuterio como trazador fue que los átomos de hidrógeno en el organismo se hallaban mucho menos fijados a sus compuestos de lo que se había creído. Se puso de relieve que eran liberados y transferidos de un compuesto a otro, intercambiando posiciones entre los átomos de oxígeno de las moléculas de azúcar, en las moléculas de agua, etc. Ya que un átomo de hidrógeno ordinario no puede ser distinguido de otro, este intercambio no pudo ser detectado antes de que los átomos de deuterio lo descubrieran.

Lo que el hallazgo implicaba era que los átomos de hidrógeno iban de un lado a otro del organismo, y, si los átomos del deuterio se unían al oxígeno, podrían difundir a través del organismo, independientemente de que experimentaran una transformación química global, los compuestos implicados, o, por el contrario no lo hicieran. En consecuencia, el investigador tenía que estar seguro de que un átomo de deuterio, hallado en un compuesto, había llegado allí por alguna reacción definida, catalizada por una enzima determinada, y no simplemente por un proceso de salto o intercambio. Por fortuna, los átomos de hidrógeno unidos al carbono no se intercambian, de tal manera que el deuterio hallado a lo largo de las cadenas de carbono adquiere una significación metabólica.

Los hábitos errantes de los átomos fueron destacados en primer plano en 1937, cuando el bioquímico norteamericano, de origen alemán, Rudolf Schoenheimer y sus colegas empezaron a utilizar el nitrógeno 15. Alimentaron a ratas con aminoácidos marcados con nitrógeno 15, las sacrificaron después de un cierto período de tiempo, y analizaron los tejidos para ver qué compuestos contenían el nitrógeno 15. De nuevo aquí se observó que, poco después de que un aminoácido marcado hubiera penetrado en el organismo, casi todos los aminoácidos contenían nitrógeno 15. En 1942, Schoenheimer publicó un libro titulado *The Dynamic State of Body Constituents* (El estado dinámico de los constituyentes en el organismo). El título describe la nueva perspectiva que los isótopos trazadores han permitido adoptar en Bioquímica. Casi al margen de los cambios químicos aparentes, se produce un tráfico incesante de átomos.

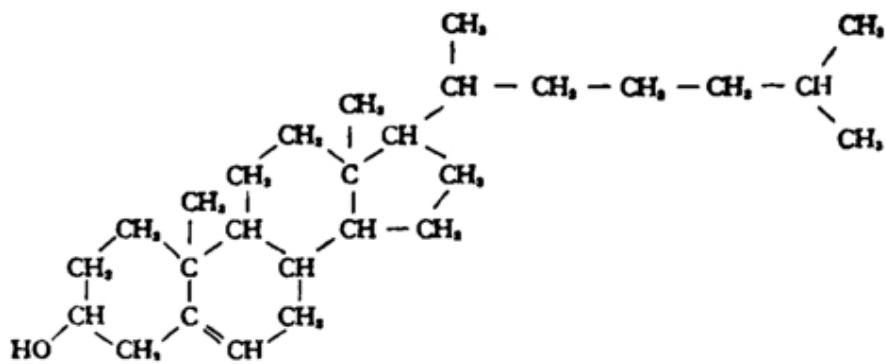
Poco a poco el empleo de trazadores ha aportado multitud de detalles relativos a las vías metabólicas. Corrobora el esquema general de procesos tales como el

metabolismo del azúcar, el ciclo del ácido cítrico y el ciclo de la urea. Ha permitido descubrir nuevos intermediarios, establecer vías alternativas de reacción, etc.

Cuando, gracias al reactor nuclear, pudo disponerse en cantidad de más de 100 diferentes isótopos radiactivos, después de la Segunda Guerra Mundial, los trabajos con trazadores experimentaron un enorme impulso. Compuestos ordinarios podían ser bombardeados con neutrones en un reactor y aparecer cargados con isótopos radiactivos. Casi todos los laboratorios de Bioquímica en los Estados Unidos (y podría decirse que en todo el mundo, pues, poco después, los Estados Unidos pusieron a disposición de otros países isótopos para fines científicos) iniciaron programas de investigación en los que se utilizaban trazadores radiactivos.

A los trazadores estables se sumaron entonces el hidrógeno radiactivo (tritio), el fósforo radiactivo (fósforo 32), el azufre radiactivo (azufre 35), el potasio radiactivo (potasio 42), sodio radiactivo, yodo radiactivo, hierro radiactivo, cobre radiactivo y, el más importante de todos ellos, el carbono radiactivo (carbono 14). El carbono 14 fue descubierto en 1940 por los químicos estadounidenses Martin D. Kamen y Samuel Ruben, y, para su sorpresa, tenía una vida media de más de 5.000 años, insospechadamente larga para un isótopo radiactivo de un elemento ligero.

El carbono 14 permitió resolver problemas que habían desafiado a los químicos durante años, y en los cuales no habían logrado, al parecer, ningún progreso. Una de las cuestiones de la cual esbozó una respuesta fue la relativa a la producción de la sustancia conocida como «colesterol». La fórmula del colesterol, elaborada después de muchos años de penosa investigación por hombres tales como Wieland (que recibió el premio Nobel de Química de 1927 por su trabajo sobre compuestos relacionados con el colesterol), ha resultado ser:



Todavía no se comprende completamente la función del colesterol en el organismo, pero, sin lugar a dudas, esta sustancia posee una importancia capital. El colesterol se encuentra en grandes cantidades en las vainas de naturaleza grasa que rodean a los nervios, en las glándulas suprarrenales, y en combinación con ciertas proteínas. Un exceso de esta sustancia puede determinar cálculos biliares y arteriosclerosis. Lo más importante de todo es que el colesterol constituye el prototipo de la familia de los «esteroides», siendo el núcleo esteroideo la combinación de los cuatro anillos que se pueden apreciar en la fórmula. Los esteroides son un grupo de sustancias sólidas, similares a las grasas, que incluye a las hormonas sexuales y a las hormonas corticosuprarrenales. Todas ellas son formadas, sin lugar a duda, a partir del colesterol. Pero, ¿cómo es sintetizado, a su vez, el colesterol en el organismo? Hasta que los trazadores vinieron en su ayuda, los bioquímicos no tenían ni la más remota idea sobre este particular. Los primeros en abordar la cuestión con un trazador fueron Rudolf Schoenheimer y su colaborador David Rittenberg. Administraron agua pesada a ratas y hallaron que el deuterio aparecía incorporado a las moléculas de colesterol. Esto, en sí mismo, no tiene importancia alguna, debido a que el deuterio podría haber llegado a dicha molécula por simples intercambios. Pero, en 1942 (después de que Schoenheimer se suicidara trágicamente), Rittenberg y otro colaborador, el bioquímico germano-americano Konrad Emil Bloch, descubrieron un hecho más definido. Alimentaron a las ratas con el ion acetato (un simple grupo de dos átomos de carbono, CH<sub>3</sub>COO-) marcado con el trazador deuterio unido al átomo de carbono del grupo CH<sub>3</sub>. De nuevo se apreció que el deuterio se había incorporado a las moléculas de colesterol, y esta vez no podía haber llegado a él por intercambio; tenía que haber sido incorporado a la molécula como parte del grupo CH<sub>3</sub>. Los grupos de dos átomos de carbono (de los cuales el ion acetato es una versión) parecen representar encrucijadas generales del metabolismo. Tales grupos, por lo tanto, pueden muy bien servir de almacén de material para constituir el colesterol. Pero, ¿cómo llegan a formar la molécula? En 1950, cuando se dispuso del carbono 14, Bloch repitió la experiencia, esta vez marcando cada uno de los 2 átomos de carbono del ion acetato con un trazador diferente. Marcó el carbono del grupo CH<sub>3</sub> con el isótopo estable carbono 13 y el carbono del grupo COO- con el carbono radiactivo 14. Luego, después de

administrar el compuesto a ratas, analizó su colesterol y vio en qué puntos de la molécula se hallaban los dos carbonos marcados. El análisis era una tarea que requería una verdadera y delicada maestría en química, y Bloch junto con una serie de experimentadores trabajaron en el durante años, identificando el origen de cada uno de los átomos de carbono del colesterol. De estos estudios parecía desprenderse que los grupos acetato probablemente formaban al principio una sustancia denominada «escualeno», un compuesto con 30 átomos de carbono, muy escaso en el organismo, sobre el que nadie había pensado dedicarle antes verdadera atención. Entonces aparecía como estación intermedia en la vía que conducía al colesterol, y, por ello, los bioquímicos empezaron a estudiarlo con gran interés. Por sus investigaciones, Bloch compartió con Lynen el premio Nobel de Fisiología y Medicina de 1964.

Aproximadamente de la misma manera a como dilucidaron la síntesis del colesterol, los bioquímicos han logrado establecer la estructura del anillo porfirínico del heme, que constituye el armazón básico de la hemoglobina y de muchas enzimas. David Shemin, de la Universidad de Columbia, alimentó a patos con el aminoácido glicina, marcado de diversas maneras. La glicina ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ ) tiene dos átomos de carbono. Cuando marcó el carbono  $\text{CH}_2$  con carbono 14, dicho carbono aparecía en la porfirina obtenida a partir de la sangre de los patos. Sin embargo, cuando marcó el carbono  $\text{COOH}$ , el trazador radiactivo no aparecía en la porfirina. En resumen, el grupo  $\text{CH}_2$  participaba en la síntesis de la porfirina, pero no, en cambio, el grupo  $\text{COOH}$ .

Shemin, trabajando con Rittenberg, descubrió que la incorporación a la porfirina de los átomos de la glicina podía tener lugar igualmente en los eritrocitos en el tubo de ensayo que en los animales vivos. Esto simplificaba la cuestión, dando resultados fácilmente valorables, y evitaba el sacrificio de animales o la inconveniencia que podían representar éstos. Marcó el nitrógeno de la glicina con nitrógeno 15 y su carbono  $\text{CH}_2$  con el carbono 14, luego mezcló la glicina con la sangre de pato. Más tarde, separó cuidadosamente la porfirina producida y halló que los 4 átomos de nitrógeno en la molécula de porfirina procedían de la glicina. Lo mismo ocurría con el átomo de carbono adyacente en cada uno de los cuatro pequeños anillos pirrólicos (véase la fórmula, en la página 15), así como también con los 4 átomos

de carbono que hacían de puentes entre los anillos pirrólicos. Esto arrojaba una diferencia de 12 átomos de carbono en el anillo de porfirina y de 14 en las diversas cadenas laterales. Se observó que éstos procedían del ion acetato, algunos a partir del carbono del CH<sub>3</sub> y otros a partir del carbono del COO-. De la distribución de los átomos trazadores fue posible deducir la manera como el acetato y la glicina eran incorporados a la porfirina. Primero formaban un único pirrólico; luego, dos de tales anillos se combinaban, y, finalmente, dos combinaciones de dos anillos se unían para formar la estructura porfirínica de cuatro anillos.

En 1952 fue aislado un compuesto denominado «porfobilinógeno» en forma pura, como resultado de una línea independiente de investigación, por el químico inglés R. G. Westall. Este compuesto aparecía en la orina de personas con defectos en el metabolismo de la porfirina, de tal modo que se sospechó que tenía algo que ver con las porfirinas. Su estructura resultó ser casi idéntica a aquélla de un solo anillo pirrólico que Shemin y sus colaboradores habían postulado como una de las fases previas en la síntesis de la porfirina. El porfobilinógeno representaba un estadio crucial en esta vía metabólica.

Seguidamente se demostró que el ácido «delta-aminolevulínico», una sustancia de estructura similar a la de la molécula del porfobilinógeno escindida por la mitad, podía aportar todos los átomos necesarios para su incorporación en el anillo porfirínico por las células sanguíneas. La conclusión más plausible es que las células forman primero el ácido delta-aminolevulínico a partir de la glicina y el acetato (eliminando, en el proceso, el grupo COOH de glicina como dióxido de carbono), que dos moléculas del ácido delta-aminolevulínico se combinan luego para formar porfobilinógeno (un único anillo pirrólico), y para este último, a su vez, se combina formando primero un anillo con dos pirroles y, finalmente, la estructura con cuatro anillos pirrólicos de la porfirina.

## Fotosíntesis

De todos los triunfos de la investigación con trazadores, quizás el mayor ha sido haber dilucidado la compleja serie de fases que conducen al desarrollo de las plantas verdes, de las que depende toda la vida en este planeta.

El reino animal no podría existir si los animales sólo pudieran comerse los unos a los otros, de la misma manera que una comunidad de personas tampoco podría enriquecerse si solamente se apoderaran de sus mutuas ganancias, ni tampoco un hombre podría sostenerse a sí mismo apretándose el cinturón. Un león que se come a una cebra o un hombre que ingiere un bisté están consumiendo una sustancia preciosa, que se obtuvo con grandes esfuerzos y considerable atrición por parte del mundo vegetal. La segunda ley de la termodinámica nos dice que, en cada fase del ciclo, se está perdiendo algo. Ningún animal almacena la totalidad de los hidratos de carbono, grasas y proteínas contenidas en los alimentos que come, ni puede hacer uso de toda la energía disponible en los alimentos. Inevitablemente una gran parte, por no decir la mayor parte, de la energía es disipada en forma de calor no utilizable. En cada nivel de la ingestión de alimentos se está perdiendo algo de energía química. Así, si todos los animales fueran exclusivamente carnívoros, la totalidad del reino animal moriría en muy pocas generaciones. Más bien diremos que nunca habría llegado a ocupar el primer plano.

El hecho afortunado es que la mayor parte de los animales son herbívoros. Se alimentan de la hierba de los campos, de las hojas de los árboles, de semillas, nueces y frutas, o de las algas y células vegetales verdes microscópicas que en cantidades ingentes se hallan en las capas superficiales de los océanos. Tan sólo una minoría de animales pueden permitirse el lujo de ser carnívoros.

Por lo que respecta a las propias plantas, éstas no se hallarían en mejores condiciones, si no les fuera cedida la energía necesaria desde una fuente externa. Elaboran hidratos de carbono, grasas y proteínas a partir de moléculas sencillas, tales como anhídrido carbónico y agua. Esta síntesis presupone una aportación de energía, y las plantas la obtienen a partir de la fuente de energía más abundante posible: la luz solar. Las plantas verdes convierten la energía de la luz solar en la energía química de los compuestos complejos, y ésta hace posible todas las formas de vida (excepto la de ciertas bacterias). Esto fue claramente indicado en 1845 por el físico alemán Julius Robert von Mayer, uno de los primeros en abogar por la ley de la conservación de la energía, y que, por lo tanto, conocía particularmente bien el problema del equilibrio energético. El proceso por el cual las plantas verdes hacen

uso de la luz solar se denomina «fotosíntesis», derivado de las palabras griegas que significan «sintetizar por la luz».

El primer intento de una investigación científica del crecimiento de las plantas fue realizado ya a principios del siglo XVII por el químico flamenco Jan Baptista van Helmont. Hizo crecer un pequeño sauce en un recipiente que contenía una cierta cantidad, escrupulosamente pesada, de tierra, y halló, ante la sorpresa general, que aunque el árbol crecía, el peso de la tierra se mantenía invariable. Se había considerado hasta entonces como un hecho indudable que las plantas obtenían las sustancias constitutivas a partir del suelo. (Realmente las plantas toman del suelo algunos minerales e iones, pero no en una cantidad fácilmente ponderable.) Si no la obtienen de él. ¿de dónde la consiguen? Van Helmont decidió que las plantas debían elaborar sus sustancias constituyentes a partir del agua, con la que él había regado abundantemente la tierra. Sólo en parte estaba en lo cierto.

Un siglo más tarde, el fisiólogo inglés Stephen Hales mostró que las plantas formaban sus propias sustancias constituyentes en gran medida a partir de un material más etéreo que el agua, a saber, el aire. Medio siglo después, el médico holandés Jan Ingen-Housz identificó el ingrediente nutritivo en el aire como el anhídrido carbónico. También demostró que una planta no absorbe el anhídrido carbónico en la oscuridad; precisa de la luz (la «foto» de la palabra fotosíntesis). Entretanto Priestley, el descubridor del oxígeno, demostraba que las plantas verdes liberaban oxígeno, y, en 1804, el químico suizo Nicholas Théodore de Saussure demostró que el agua era incorporada a los tejidos vegetales, tal como había sugerido Van Helmont.

La siguiente contribución de importancia tuvo lugar en los años 1850-1860, cuando el ingeniero de minas francés Jean-Baptiste Boussingault hizo crecer plantas en un suelo totalmente libre de materia orgánica. De esta manera demostró que las plantas podían obtener su carbono a partir únicamente del anhídrido carbónico atmosférico. Por otra parte, las plantas no conseguían crecer en un terreno exento de compuestos nitrogenados, y esto demostraba que obtenían su nitrógeno a partir del suelo y que no utilizaban el atmosférico (salvo en el caso de ciertas bacterias). Desde la época de Boussingault se hizo patente que la participación del suelo como alimento directo para las plantas se limitaba a ciertas sales inorgánicas, tales como

ciertos nitratos y fosfatos. Eran estos ingredientes lo que los fertilizantes orgánicos (tales como el estiércol) añadían al terreno. Los químicos comenzaron a defender el empleo de fertilizantes químicos, que servían excelentemente para este fin y que eliminaban los desagradables olores así como reducían los peligros de infección y enfermedad, en gran parte derivados de los estercoleros.

De este modo pudo establecerse el esqueleto del proceso de la fotosíntesis. En presencia de la luz solar, una planta toma el anhídrido carbónico y lo combina con agua, para formar sus tejidos, liberando oxígeno en el proceso. Por lo tanto, es evidente que las plantas verdes no sólo proporcionan alimentos, sino que además renuevan las existencias de oxígeno en la Tierra. Si no fuera por ello, en cosa de unos siglos, el contenido de oxígeno en la atmósfera descendería hasta un nivel mínimo, y el aire contendría tanto anhídrido carbónico que asfixiaría la vida animal. Es enorme la escala a la que las plantas verdes de la tierra crean materia orgánica y liberan oxígeno. El bioquímico ruso-estadounidense Eugene I. Rabinovich, uno de los más importantes investigadores de la fotosíntesis, estima que cada año las plantas verdes de la tierra combinan un total de 150 mil millones de toneladas de carbono (a partir del anhídrido carbónico) con 25 mil millones de toneladas de hidrógeno (a partir del agua), y liberan 400 mil millones de toneladas de oxígeno. En esta gigantesca producción, las plantas de los bosques y campos de la tierra firme sólo contribuyen en un 10 %; el restante 90 % debemos agradecerlo a las plantas unicelulares y algas marinas de los océanos.

Ahora bien, aún seguimos conociendo únicamente el esqueleto del proceso. ¿Cuáles son sus detalles? En 1817, Pierre-Joseph Pelletier y Joseph-Bienaimé Caventou, de Francia, que más tarde serían los descubridores de la quinina, cafeína, estricnina y algunos otros productos vegetales especializados, aislaron el más importante producto vegetal de todos: el único que da el color verde a las plantas verdes. Denominaron al compuesto «clorofila», de las palabras griegas que significan «hoja verde». Luego, en 1865, el botánico alemán Julius von Sachs mostró que la clorofila no se hallaba distribuida de forma general en las células vegetales (aún cuando las hojas aparecen uniformemente verdes), sino que se hallaba localizada en pequeños cuerpos subcelulares, llamados más tarde «cloroplastos».

Se hizo evidente que la fotosíntesis tenía lugar dentro del cloroplasto y que la clorofila era esencial para ese proceso. Sin embargo, la clorofila no bastó. Aunque se la extrajera meticulosamente, ella no podía catalizar por sí sola la reacción fotosintética en un tubo de ensayo.

Por lo general, el cloroplasto es bastante mayor que el mitocondrio. Algunas plantas unicelulares poseen solamente un gran cloroplasto como célula. Ahora bien, casi todas las células vegetales contienen muchos cloroplastos pequeños, y cada uno es dos o tres veces más largo y grueso que el típico mitocondrio.

La estructura del cloroplasto parece ser todavía más compleja que la del mitocondrio. Su interior está compuesto por muchas membranas sutiles que se extienden de una pared a otra. Éstas son las *Lamellae*. En casi todos los tipos de cloroplasto, esas *Lamellae* engruesan y se oscurecen por sectores para producir «grana» y es precisamente dentro de la grana donde se encuentran las moléculas clorofílicas.

Si observamos las *Lamellae* dentro de la grana con el microscopio electrónico, veremos que ellas parecen a su vez estar formadas por diminutas unidades apenas visibles que semejan los mosaicos de un cuarto de baño. Cada uno de esos objetos puede ser una unidad fotosintetizadora conteniendo entre 250 y 300 moléculas clorofílicas.

Es más difícil aislar y mantener intacto al cloroplasto que al mitocondrio. Por fin, en 1954, el bioquímico norteamericano de origen polaco Daniel I. Arnon, trabajando con células disociadas de espinaca, logró extraer totalmente intactos los cloroplastos y llevar a cabo la reacción fotosintética completa. El cloroplasto no contiene solamente clorofila, sino también un complemento de enzimas y sustancias asociadas, todas ellas dispuestas en un esquema preciso e intrincado. Contiene incluso citocromos donde la energía de la luz solar captada por la clorofila puede convertirse en TFA mediante la fosforización oxidásica. Pero, ¿qué decir entretanto sobre la estructura de la clorofila, la sustancia más característica de los cloroplastos? Durante décadas, los químicos atacaron esta sustancia de crucial importancia con todas las herramientas de que disponían, pero sólo lentamente se hizo la luz. Por último, en 1906, Richard Willstätter, de Alemania (que redescubrió la cromatografía e insistió incorrectamente en que las enzimas no eran proteínas)

identificó un componente central de la molécula de clorofila. Era el metal magnesio, (Willstätter recibió el premio Nobel de Química en 1915 por su descubrimiento y otros trabajos sobre los pigmentos vegetales.) Willstätter y Hans Fischer iniciaron sus trabajos sobre la estructura de la molécula -labor que sólo se completó en una generación-. Hacia los años treinta habían determinado que la clorofila tenía una estructura anular porfirínica básicamente similar a aquella del heme (una molécula que Fischer había descifrado). Donde el heme tenía un átomo de hierro en el centro del anillo porfirínico, la clorofila tenía un átomo de magnesio.

Si había alguna duda al respecto, ésta fue desterrada por R. B. Woodward. Aquel maestro de la síntesis, que había sintetizado la quinina en 1945, la estricnina en 1947 y el colesterol en 1951, coronó por fin sus anteriores logros sintetizando una molécula, en 1960, que era idéntica a la fórmula elaborada por Willstätter y Fischer, y que, además, tenía todas las propiedades de la clorofila aislada de las hojas verdes.

Exactamente, ¿qué reacción cataliza en la planta la clorofila? Todo lo que se sabía hacia los años treinta era que el anhídrido carbónico y el agua penetraban en la planta y el oxígeno entonces salía de ella. La investigación se hizo más difícil debido al hecho de que la clorofila aislada no podía lograr la realización de la fotosíntesis. Sólo las células vegetales intactas, o, en el mejor de los casos, los cloroplastos intactos, podían hacerlo, lo que significaba que el sistema en estudio era muy complejo.

Como una primera hipótesis, los bioquímicos supusieron que las células vegetales sintetizaban glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) a partir del anhídrido carbónico y el agua, y luego elaboraban, a partir de ésta, las diversas sustancias vegetales, añadiendo nitrógeno, azufre, fósforo, y otros elementos inorgánicos procedentes del suelo.

Sobre el papel parecía como si la glucosa pudiera ser formada en una serie de fases, combinándose en la primera el átomo de carbono del anhídrido carbónico con el agua (liberando los átomos de oxígeno del  $CO_2$ ), y luego polimerizándose la combinación,  $CH_2O$  (formaldehído) en glucosa. Seis moléculas de formaldehído darían lugar a una molécula de glucosa.

Esta síntesis de la glucosa a partir del formaldehído pudo ser realizada en el laboratorio de una forma muy tediosa. Seguramente la planta posee enzimas que

aceleran las reacciones. En realidad, el formadehído es un compuesto muy venenoso, pero los químicos supusieron que era transformado en glucosa tan rápidamente que en ningún momento la planta contenía más de una cantidad muy pequeña de él. Esta teoría del formaldehído, propuesta por vez primera en 1870 por Baeyer (que sintetizó el índigo), se mantuvo durante dos generaciones, simplemente debido a que no había otra mejor que pudiera sustituirla.

En 1938 surgió un nuevo enfoque del problema, cuando Ruben y Kamen iniciaron la tarea de dilucidar la química de las plantas verdes con trazadores. Mediante el uso del oxígeno 18, el poco común isótopo estable del oxígeno, hicieron un hallazgo importante. Se apreció que, cuando el agua dada a una planta estaba marcada con oxígeno 18, el oxígeno liberado por la planta contenía este trazador, pero éste no era el caso cuando era marcado sólo el anhídrido carbónico proporcionado a la planta. En resumen, el experimento mostró que el oxígeno liberado por las plantas procedía de la molécula de agua y no de la molécula de anhídrido carbónico, como erróneamente se había supuesto en la teoría del formaldehído.

Ruben y sus colaboradores intentaron seguir el destino de los átomos de carbono en la planta, marcando el anhídrido carbónico con el isótopo radiactivo carbono 11 (el único carbono radiactivo conocido en aquel tiempo). Pero este intento falló. Por este motivo: el carbono 11 tiene una vida media de sólo 20,5 minutos. Por otra parte, no disponían de un método, en aquel entonces, que les permitiera separar compuestos individuales en la célula vegetal con rapidez y de forma total.

Pero, hacia 1940, se obtuvieron las herramientas necesarias: Ruben y Kamen descubrieron el carbono 14, el isótopo radiactivo de vida larga, que hizo posible seguir el destino del carbono a través de una serie de reacciones perezosas, y el desarrollo de la cromatografía sobre papel proporcionó un medio de separar mezclas complejas con facilidad y limpiamente. (En realidad, los isótopos radiactivos permitieron un claro refinamiento de la cromatografía sobre papel: Las manchas radiactivas sobre papel, que representaban la presencia del trazador, producían señales oscuras sobre una película fotográfica colocada debajo de aquél, de tal modo que el cromatograma daba lugar a su propia fotografía; esta técnica fue denominada «autorradiografía».) Después de la Segunda Guerra Mundial, otro grupo, dirigido por el bioquímico norteamericano Melvin Calvin, recogió el desafío.

Durante breves períodos de tiempo expusieron plantas unicelulares microscópicas (*Chlorella*) al anhídrido carbónico que contenía carbono 14, permitiendo así que la fotosíntesis se desarrollara sólo a lo largo de sus primeros estadios. Luego trituraron las células vegetales, separaron sus sustancias por cromatografía e hicieron una autorradiografía. Descubrieron que, aún cuando las células habían sido expuestas al anhídrido carbónico marcado durante sólo un minuto y medio, los átomos de carbono radiactivo aparecían en 15 sustancias distintas de la célula. Por reducción del tiempo de exposición, disminuyeron el número de sustancias en las que se había incorporado el carbono radiactivo y llegaron a la conclusión que el primero o casi el primer compuesto en el cual la célula incorporaba el carbono del anhídrido carbónico era el «gliceril-fosfato». (En ningún caso detectaron la presencia de formaldehído, de tal modo que la venerable teoría del formaldehído pasó, sin más estridencias, a la Historia.) El gliceril-fosfato es un compuesto con 3 átomos de carbono. Evidentemente, tenía que ser formado por una vía indirecta, pues no pudo hallarse un precursor de 1 ó 2 átomos de carbono. Se localizaron otros dos compuestos, conteniendo fosfato, que incorporaban carbono marcado al cabo de un período de tiempo muy corto. Ambos eran variedades: El «ribulosa-difosfato» (un compuesto con 5 átomos de carbono) y el «sedoheptulosa fosfato» (un compuesto con 7 átomos de carbono). Los investigadores identificaron las enzimas que catalizaron las reacciones en las que intervenían tales azúcares, estudiaron estas reacciones y elaboraron las vías metabólicas seguidas por la molécula de anhídrido carbónico. El esquema que mejor satisface sus hallazgos es el siguiente.

Primero el anhídrido carbónico se adiciona a la ribulosa-difosfato de 5 átomos de carbono, produciendo un compuesto con 6 átomos de carbono. Éste seguidamente se escinde en dos, dando lugar al gliceril-fosfato de 3 átomos de carbono. Una serie de reacciones, en las que participa la sedoheptulosa fosfato y otros compuestos, unen luego a dos gliceril-fosfato para formar el glucosa-fosfato con 6 átomos de carbono. Entretanto, el ribulosa-difosfato se regenera y está en disposición de incorporar otra molécula de anhídrido carbónico. Se pueden imaginar seis de tales ciclos operando a la vez. Cada vez que se completa un ciclo, cada uno de ellos aporta un átomo de carbono (a partir de anhídrido carbónico) y, a partir de éstos, se forma una molécula de glucosa-fosfato. Después de completarse un nuevo ciclo

en los seis ciclos se produce otra molécula de glucosa-fosfato, y así sucesivamente. Desde un punto de vista energético esto es la inversa del ciclo del ácido cítrico. Mientras que el ciclo del ácido cítrico convierte los fragmentos de la degradación de los hidratos de carbono en anhídrido carbónico, el ciclo de la ribulosa-fosfato elabora hidratos de carbono a partir del anhídrido carbónico. El ciclo del ácido cítrico libera energías que utilizará el organismo; el ciclo de la ribulosadifosfato, inversamente, tiene que consumir energía.

Con esto están de acuerdo los primeros resultados de Ruben y Kamen. La energía de la luz solar se utiliza, gracias a la acción catalítica de la clorofila, para escindir una molécula de agua en hidrógeno y oxígeno, un proceso denominado «fotólisis» (de las palabras griegas que significan «lisis por la luz»). Esta es la forma como la energía radiante de la luz solar es convertida en energía química, pues las moléculas de hidrógeno y oxígeno contienen mas energía química que la molécula de agua de la que proceden.

De no ser así, se requeriría una gran cantidad de energía para escindir moléculas de agua en hidrógeno: por ejemplo, calentando el agua hasta aproximadamente 2.000 grados, o haciendo pasar a su través una corriente eléctrica de gran intensidad. Pero la clorofila realiza esta función fácilmente a temperaturas ordinarias. Todo lo que requiere es la energía, relativamente débil, de la luz visible. La planta utiliza la energía luminosa de la que absorbe, por lo menos, el 30 %; algunos investigadores creen que el rendimiento puede llegar a ser del 100 % en condiciones ideales. Si el hombre pudiera obtener energía tan eficazmente como lo hacen las plantas, sus preocupaciones sobre sus suministros energéticos y de alimentos serían mucho menores.

Una vez se han escindido las moléculas de agua, la mitad de los átomos de hidrógeno se incorporan al ciclo de la ribulosa-difosfato, y la mitad de los átomos de oxígeno son liberados al aire. El resto de los átomos de hidrógeno y oxígeno se combinan de nuevo para formar agua. Al hacer esto, liberan el exceso de energía que se les cedió, cuando la luz solar escindió las moléculas de agua, y esta energía es transferida a los compuestos de fosfato de alta energía, tales como TFA. La energía almacenada en estos compuestos se utiliza luego para mantener en funcionamiento el ciclo de la ribulosa-difosfato. Por su trabajo de elucidación de las

reacciones implicadas en la fotosíntesis, Calvin recibió el premio Nobel de Química de 1961.

En realidad existen algunas otras formas de vida que obtienen energía sin utilizar la clorofila. Hacia el año 1880 se descubrieron las «bacterias quimiosintéticas»; estas bacterias incorporan el anhídrido carbónico en la oscuridad y no liberan oxígeno. Algunas oxidan compuestos de azufre para obtener energía; otras oxidan compuestos de hierro, y algunas la obtienen a través de otros procedimientos químicos.

Pero, además, también existen bacterias que contienen compuestos similares a la clorofila («bacterioclorofila»), que les permite convertir el anhídrido carbónico en compuestos orgánicos a expensas de la energía de la luz; incluso en algunos casos en el infrarrojo próximo, donde ordinariamente la clorofila no actuaría. Sin embargo, sólo la propia clorofila puede lograr la escisión del agua y la conservación de la gran acumulación de energía así obtenida; la bacterioclorofila debe hacerlo con recursos energéticos menores.

Todos los métodos de obtención de energía fundamental, distintos de los que utilizan la luz solar a través de la clorofila, son esencialmente vías muertas, y ninguna criatura más complicada que una bacteria ha hecho satisfactorio uso de ellos. Para las restantes formas de vida (e incluso para la mayor parte de las bacterias), la clorofila y la fotosíntesis son, directa o indirectamente, la base de la vida.

## Capítulo 12

### LA CÉLULA

#### Cromosomas

Constituye una verdadera paradoja el hecho que, hasta tiempos recientes, el hombre conociera muy poco acerca de su propio organismo. En realidad, únicamente hace unos 300 años que aprendió algo sobre la circulación de la sangre, y tan sólo en el curso de, aproximadamente, los últimos 50 años ha conseguido descubrir las funciones de muchos de sus órganos.

El hombre prehistórico, al trocear los animales para cocinarlos y al embalsamar los restos humanos preparándolos para la vida futura, tuvo conocimiento de la existencia de los grandes órganos tales como el cerebro, el hígado, el corazón, los pulmones, el estómago, los intestinos y los riñones. Este conocimiento fue aumentado debido al frecuente uso de la observación de los diversos órganos internos del animal sacrificado con fines rituales (particularmente su hígado), para prever el futuro o estimar el grado con que la divinidad daba su beneplácito o desaprobaba una determinada cuestión. Papiros egipcios que tratan de forma correcta sobre las técnicas quirúrgicas y presuponen una cierta familiarización con la estructura del organismo, datan ya de unos 2.000 años a. de J.C.

Los antiguos griegos llegaron a disecar animales y, en ocasiones, cadáveres humanos, con el propósito de aprender algo acerca de la «anatomía» (de las palabras griegas que significan «seccionar»). Se consiguieron incluso algunos trabajos delicados. Alcmaeón de Crotón, aproximadamente unos 500 años a. de J.C., describió por vez primera el nervio óptico y la trompa de Eustaquio. Dos siglos mas tarde, en Alejandría, Egipto (entonces el centro mundial de la Ciencia), se inició brillantemente una escuela de anatomía griega con Herófilo y su discípulo Erasístrato. Investigaron las partes del cerebro, distinguiendo entre éste y el cerebelo, y estudiaron asimismo los nervios y vasos sanguíneos.

La Anatomía antigua alcanzó su nivel más alto con Galeno, médico de origen griego que practicó en Roma en la segunda mitad del siglo II. Galeno elaboró ciertas teorías sobre las funciones del organismo, que fueron aceptadas como un evangelio durante los siguientes 1.500 años. Sin embargo, sus nociones sobre el cuerpo

humano estaban llenas de curiosos errores. Esto es comprensible, ya que los antiguos obtenían la mayor parte de su información de la disección de animales; inhibiciones de diversa índole les impedían la disección del cuerpo humano.

En sus denuncias de los griegos paganos, los primeros escritores cristianos los acusaban de haber practicado estas disecciones de seres humanos. Pero esto son cosas que sólo se hallan en la literatura polémica; no sólo es dudoso que los griegos hicieran múltiples disecciones humanas, sino que, evidentemente, no disecaron siquiera suficientes cuerpos muertos para aprender gran cosa sobre la anatomía humana. En cualquier caso, la desaprobación por la Iglesia de la disección puso virtualmente punto final a los estudios anatómicos durante toda la Edad Media. Cuando este período de la historia llegaba a su fin, la Anatomía comenzó a revivir en Italia. En 1316, un anatomista italiano, Mondino de Luzzi, escribió el primer libro dedicado enteramente a la Anatomía, y por ello es conocido como el «restaurador de la Anatomía».

El interés en el arte naturalista durante el Renacimiento promovió también la investigación anatómica. En el siglo XV, Leonardo da Vinci efectuó algunas disecciones mediante las que reveló nuevos aspectos de la Anatomía, pintándolos con el propio genio del artista. Mostró la doble curvatura de la columna vertebral y los senos que horadan los huesos de la cara y la frente. Usó sus estudios para elaborar teorías fisiológicas mucho más avanzadas que las de Galeno. Pero Leonardo, aunque fue tanto un genio de la ciencia como del arte, tuvo poca influencia sobre el pensamiento científico de su época. Bien sea por rechazo neurótico, o por simple precaución, no publicó ninguno de sus trabajos científicos, ocultándolos en libros de notas, escritos en clave. Correspondió a generaciones posteriores, cuando sus libros de notas fueron finalmente publicados, descubrir sus logros científicos.

El médico francés Jean Fernel fue el primer científico moderno en adoptar la disección como una parte importante de sus deberes de médico. Publicó un libro sobre este tema en 1542. Sin embargo, su labor pasó casi totalmente inadvertida debido a un trabajo mucho más importante publicado el año siguiente. Éste fue la famosa *De Humani Corporis Fabrica* («Concerniente a la estructura del cuerpo humano») de Andreas Vesalio, un flamenco que realizó la mayor parte de su obra

en Italia. Basándose en la teoría de que el verdadero estudio de la Humanidad comenzaba con el hombre, Vesalio disecó el sujeto apropiado y corrigió muchos de los errores de Galeno. Los dibujos de Anatomía humana de su libro (que se cree fueron realizados por Jan Stevenzoon van Calcar, un discípulo del artista Tiziano) son tan maravillosos y exactos que todavía se publican hoy en día y siempre serán considerados como clásicos. Vesalio puede en conciencia ser llamado el padre de la Anatomía moderna. Su *Fabrica* fue tan revolucionaria en su campo como en el suyo lo fue el *De Revolutionibus Orbium Coelestium* de Copérnico, publicado en el mismo año.

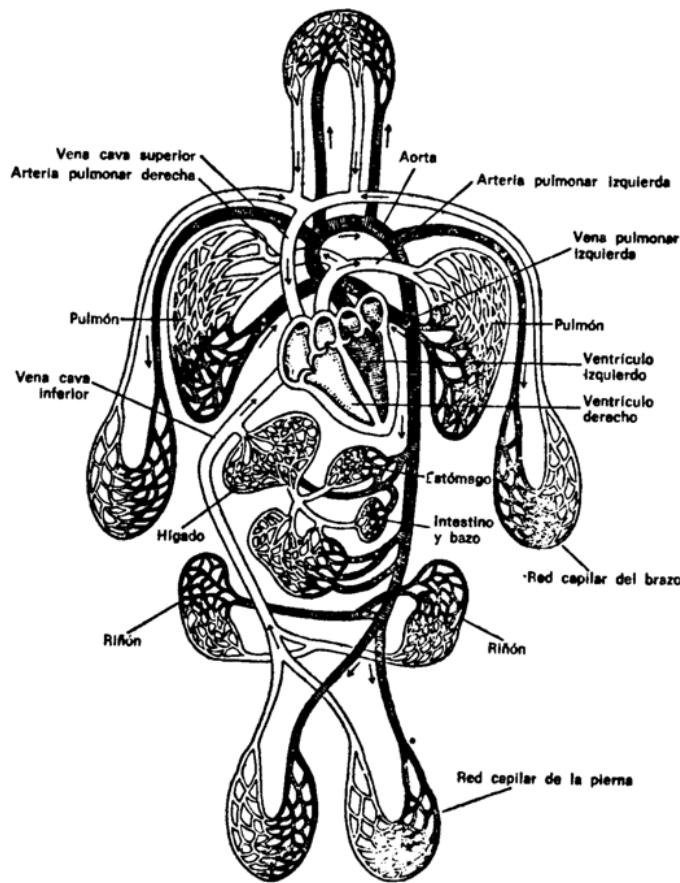
Del mismo modo que la revolución iniciada por Copérnico fructificó en Galileo, aquí también la iniciada por Vesalio alcanzó la cumbre en los descubrimientos cruciales de William Harvey. Harvey era un médico y experimentador inglés, de la misma generación de Galileo y William Gilbert, el investigador del magnetismo. Se interesó particularmente por el líquido orgánico vital: la sangre. ¿Qué hacía ésta en el organismo?

Se sabía que existían dos clases de vasos sanguíneos: las venas y las arterias. (Praxágoras de Coso un médico griego del siglo III a. de J.C., había dado a las últimas el nombre de «arterias» a partir de las palabras griegas que significan «yo transporto aire», debido a que halló que estos vasos estaban vacíos en los cuerpos muertos. Más tarde, Galeno demostró que, durante la vida del organismo, estos vasos transportaban la sangre.) También se sabía que la contracción del corazón impulsaba a la sangre, pues, cuando se cortaba una arteria, podía observarse cómo la sangre salía a un ritmo sincronizado con el latido cardíaco.

Galen había afirmado que la sangre seguía un curso de ida y vuelta en los vasos sanguíneos; primero corría en una dirección a través del cuerpo y luego en la otra. Esta teoría le obligó a explicar por qué los movimientos de ida y retorno no eran bloqueados por la pared entre las dos mitades del corazón; a esta cuestión Galeno respondió simplemente que la pared debía de poseer unos pequeños orificios, invisibles, que permitían el paso de la sangre a su través.

Harvey inició un estudio más detallado del corazón. Descubrió que cada mitad se hallaba dividida en dos cámaras, separadas entre sí por una válvula unidireccional que permitía a la sangre fluir desde la cámara superior («aurícula») a la inferior

(«ventrículo»), pero no en sentido contrario. En otras palabras, la sangre que penetraba en una de las aurículas podía ser bombeada a su correspondiente ventrículo y, desde allí, hacía los vasos sanguíneos que partían de él, pero en ningún caso podían fluir en el sentido opuesto. Posteriormente, Harvey efectuó experiencias sencillas, aunque maravillosamente claras, para determinar la dirección del flujo en los vasos sanguíneos. Ató sucesivamente una arteria y una vena en un animal vivo para observar en qué lado de este bloqueo ascendía la presión dentro del vaso sanguíneo. Descubrió así que, en las arterias, el vaso siempre se hinchaba en el lado correspondiente entre el corazón y el punto bloqueado. Esto significaba que la sangre en las arterias fluía desde el corazón hacia la periferia. Cuando ligaba una vena, la distensión tenía lugar siempre en el otro lado del punto bloqueado: por consiguiente, la sangre fluía en las venas en dirección al corazón. Otro dato que se nos ofrece en favor de este flujo unidireccional en las venas proviene del hecho que, en las de mayor tamaño, existen unas válvulas que impiden que la sangre corra alejándose del corazón. Esto había sido descubierto por el propio maestro de Harvey, el anatomista italiano Hieronymus Fabricius (mejor conocido por su nombre latinizado, Fabricius). Sin embargo, Fabricius, bajo la carga de la tradición galénica, no se atrevió a deducir de sus experimentos la inevitable conclusión, cediendo por ello la gloria a su discípulo inglés.



*El sistema circulatorio.*

Harvey seguidamente efectuó mediciones cuantitativas del flujo sanguíneo (quizá la primera vez que alguien aplicaba las matemáticas a un problema biológico). Sus mediciones demostraron que el corazón bombeaba la sangre a una velocidad tal que, en 20 minutos, su volumen expulsado era igual a la cantidad total de fluido contenida en el organismo. No parecía razonable suponer que el cuerpo fabricara nueva sangre, ni consumiera la antigua, a tal velocidad. La conclusión lógica, por lo tanto, era que la sangre debía de circular a través del organismo. Ya que fluía alejándose del corazón en las arterias y dirigiéndose hacia aquél en las venas, Harvey decidió que la sangre era bombeada por el corazón hacia las arterias, posteriormente se trasvasaba a las venas, regresando por ellas al corazón, a continuación era bombeada de nuevo a las arterias, y así sucesivamente. En otras palabras, circulaba de forma continua en un mismo sentido a través del sistema cardiovascular. Los primeros anatómistas, incluyendo a Leonardo, habían insinuado ya tal idea, pero fue Harvey realmente el primero en establecer e investigar con

detalle dicha teoría. Expuso sus ideas y experiencias en un pequeño y mal impreso libro titulado *De Motus Cordis* («relativo al movimiento del corazón»), que fue publicado en 1628 y que, desde entonces, ha sido considerado como una de las mayores obras clásicas de la Ciencia.

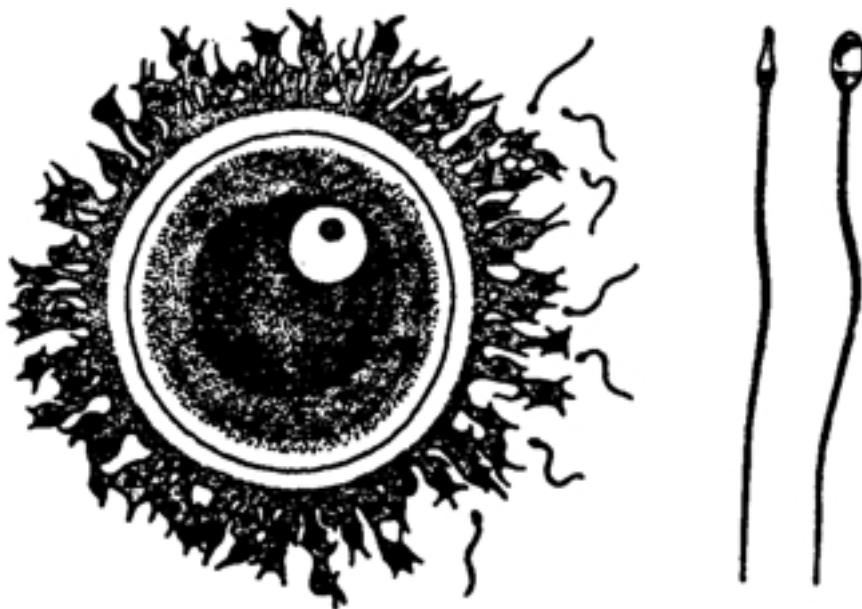
La cuestión principal que había dejado sin contestar la labor de Harvey fue: ¿Cómo pasa la sangre de las arterias a las venas? Harvey opinaba que debían de existir vasos que las conectaran de alguna manera, vasos que debían de tener un tamaño demasiado reducido para poderse ver. He aquí una reminiscencia de la teoría de Galeno sobre los pequeños orificios en la pared del corazón, pero, mientras que nunca se hallaron tales orificios -y en realidad no existen-, los vasos de conexión de Harvey fueron descubiertos tan pronto como se dispuso del microscopio. En 1661, tan sólo cuatro años después de la muerte de Harvey, un médico italiano llamado Marcello Malpighi, examinando los tejidos pulmonares de una rana con un microscopio primitivo, apreció que, con toda seguridad, existían finos vasos sanguíneos que conectaban las arterias con las venas. Malpighi los denominó «capilares», de la palabra latina que significa «similares a cabellos».

El uso de este nuevo instrumento hizo posible estudiar otras estructuras microscópicas. El naturalista holandés Jan Swammerdam descubrió los eritrocitos, mientras que el anatomista, también holandés, Regnier de Graaf descubrió los pequeños «folículos ováricos» en los ovarios de animales. Desde entonces pudieron estudiarse con todo detalle criaturas pequeñas tales como los insectos.

Los trabajos hechos con tanta precisión animaron a la realización de cuidadosas comparaciones de las estructuras de una especie con las estructuras de otras. El botánico inglés Nehemiah Grew fue el primer estudioso de importancia de la Anatomía comparada. En 1675 publicó sus estudios, en los que se comparan entre sí las estructuras del tronco de diversos árboles, y, en 1681, los estudios, comparativos también, sobre los estómagos de diversos animales.

La introducción del microscopio situó a los biólogos en un nivel más básico de la organización de los seres vivos: un nivel en el que todas las estructuras ordinarias podían ser reducidas a un denominador común. En 1665, el científico inglés Robert Hooke, utilizando un microscopio compuesto construido por él mismo, descubrió que el corcho, la corteza de cierto árbol, estaba constituido por compartimentos

extraordinariamente pequeños similares a una esponja muy fina. A estos orificios los denominó «células», comparándolas a pequeñas habitaciones tales como las celdas de un monasterio. Más tarde, otros microscopistas hallaron luego «células» similares, aunque llenas de líquido, en los tejidos vivos.



*Óvulo y espermatozoides humanos.*

En el siguiente siglo y medio se hizo gradualmente más patente a los biólogos que toda la materia viva estaba constituida por células y que cada una de éstas constituía una unidad independiente de vida. Algunas formas de vida -tal como ciertos microorganismos- estaban formados por una única célula; los de mayores dimensiones eran el resultado de muchas células en cooperación. Uno de los primeros en proponer tal punto de vista fue el fisiólogo francés René-Joachim-Henri Dutrochet. No obstante, su comunicación, publicada en 1824, pasó inadvertida, y la teoría celular ganó importancia tan sólo después de que Matthias Jakob Schleiden y Theodor Schwann, de Alemania, la formularan, independientemente, en 1838 y 1839.

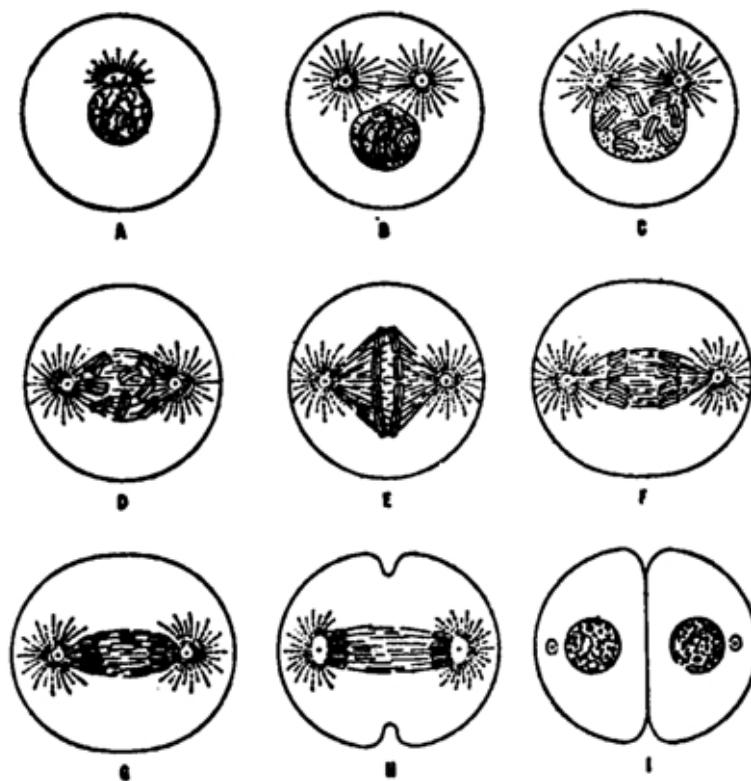
El líquido coloidal que llenaba ciertas células fue denominado «protoplasma» («la primera forma») por el fisiólogo checo Jan Evangelista Purkinje en 1839, y el botánico alemán Hugo von Mohl extendió el término para designar el contenido de

todas las células. El anatomista alemán Max Johann Sigismund Schultze destacó la importancia del protoplasma como la «base física de la vida» y demostró la semejanza esencial del protoplasma en todas las células, tanto vegetales como animales y, asimismo, tanto en criaturas muy simples como en criaturas muy complejas.

La teoría celular es, respecto a la Biología, como la teoría atómica lo es respecto a la Química y a la Física.

Su importancia en la dinámica de la vida fue establecida cuando, alrededor de 1860, el patólogo alemán Rudolf Virchow afirmó, en una sucinta frase latina, que todas las células proceden de células. Demostró que las células de los tejidos enfermos eran producidas por la división de células originalmente normales.

En aquel entonces ya resultaba evidente que todo organismo vivo, incluso los de mayores dimensiones, empezaba su vida como una célula única. Uno de los primeros microscopistas, Johann Ham, ayudante de Leeuwenhoek, había descubierto en el semen pequeños cuerpos que más tarde fueron denominados «espermatozoos» (de las palabras griegas que significan «semilla animal»). Mucho más tarde, en 1827, el fisiólogo alemán Karl Ernst von Baer identificó el óvulo, o célula huevo, de los mamíferos. Los biólogos llegaron a la conclusión de que la unión de un óvulo y un espermatozoide formaba un óvulo fertilizado, a partir del cual eventualmente se desarrollaba el animal por repetidas divisiones y subdivisiones.



*División de una célula por mitosis.*

La cuestión fundamental era: ¿Cómo se dividen las células? La respuesta a esta cuestión se encontraba en un pequeño glóbulo de material relativamente denso en el interior de la célula, cuya existencia fue dada a conocer la primera vez por Robert Brown (el descubridor del movimiento browniano) en el año 1831, y denominado «núcleo». (Para distinguirlo del núcleo del átomo, lo denominaré a partir de ahora «núcleo celular».) Si un organismo celular se dividía en dos partes, conteniendo una de ellas el núcleo celular intacto, la parte que contenía el núcleo celular era capaz de crecer y dividirse, en tanto que la otra no lo hacía. (Más tarde se descubrió también que los glóbulos rojos de los mamíferos, carentes de núcleo, tienen una existencia breve y no poseen la capacidad de crecer y dividirse. Por este motivo, en la actualidad no son considerados como verdaderas células y, por lo común, se denominan «glóbulos».) Desgraciadamente, el ulterior estudio del núcleo celular y del mecanismo de la división se mantuvo estancado durante un largo período de tiempo, debido al hecho de que la célula era más o menos transparente, de tal modo que no podían distinguirse sus subestructuras. Luego mejoró la situación,

gracias al descubrimiento de que algunos colorantes podían teñir ciertas partes de la célula, respetando a otras. Un colorante denominado «hematoxilina» (obtenido a partir del palo de Campeche) teñía de negro el núcleo celular y le permitía destacar claramente sobre el fondo de la célula. Después de que Perkin y otros químicos comenzaron a producir colorantes sintéticos, los biólogos dispusieron de toda una serie de ellos para escoger.

En 1879, el biólogo alemán Walther Flemming halló que con ciertos colorantes rojos podía teñir un material particular en el núcleo celular, material que se hallaba distribuido en éste en la forma de pequeños gránulos. Denominó a este material «cromatina» (del término griego para «color»). Examinando este material, Flemming fue capaz de apreciar algunas de las modificaciones que experimentaba durante el proceso de la división celular. En realidad, el colorante mata a la célula, pero en un corte de tejido mostrará diversas células en diferentes fases de la división celular. Son instantáneas que, consideradas conjuntamente, llegan a constituir una especie de «película animada» del proceso de la división celular.

En 1882, Flemming publicó un importante libro en el cual describe este proceso con más detalle. Al iniciarse la división celular, la cromatina se agrega para formar filamentos. La delgada membrana que limita el núcleo celular parece disolverse y, al mismo tiempo, un tenue objeto situado inmediatamente por fuera de aquél se divide en dos. Flemming denominó a este objeto el áster, de la palabra griega para «estrella», debido a que los filamentos que se desprendían de él le conferían el aspecto de un astro. Después de dividirse, las dos partes del áster se dirigían a puntos opuestos de la célula. Sus filamentos se unían al parecer a los de cromatina, que entretanto se habían dispuesto en el centro de la célula, y el áster arrastraba a la mitad de los filamentos de cromatina hacia cada una de las mitades de la célula. Como resultado, la célula se estrangulaba en su mitad y, finalmente, se dividía en dos células. Se desarrollaba entonces un núcleo celular en cada una de las dos mitades, y el material cromatínico, que era rodeado por la membrana celular, se fragmentaba de nuevo en pequeños gránulos.

Flemming denominó al proceso de división celular «mitosis», de la palabra griega para «filamento», debido al importante papel desempeñado en él por los filamentos de cromatina. En 1888, el anatomista alemán Wilhelm von Waldeyer dio al

filamento de cromatina el nombre de «cromosoma» (del griego «cuerpo coloreado»), y fue tan bien aceptado que ha persistido hasta nuestros días. No obstante, debe indicarse que los cromosomas, a pesar de su nombre, son incoloros en su estado natural, no teñido, con lo que resulta sumamente difícil distinguirlos. (A pesar de todo, fueron vistos en células de flores ya en 1848 por el botánico alemán, Wilhelm Friedrich Benedict Hofmeister.)

La observación reiterada de las células teñidas demostró que las células de cada especie de planta o animal tenían un número fijo y característico de cromosomas.

Antes de que la célula se divida en dos, durante la mitosis, se duplica el número de cromosomas, de tal modo que cada una de las dos células hijas, después de la división, tienen el mismo número que el de la célula madre original.

El embriólogo belga Eduard van Beneden descubrió, en 1885, que los cromosomas no duplicaban su número cuando se formaban las células germinales óvulo y espermatozoide. En consecuencia, cada célula óvulo y cada espermatozoide tienen sólo la mitad del número de cromosomas del que poseen las células ordinarias en el organismo. (La división celular que da lugar a espermatozoides y óvulos se denominó por lo tanto «meiosis», de una palabra griega que significa «hacer menos».) Cuando se unen un óvulo y un espermatozoide, la combinación (óvulo fertilizado) posee, sin embargo, una serie completa de cromosomas, siendo aportada la mitad de ella por la madre, a través del óvulo, y la otra mitad por el padre, mediante el espermatozoide. Seguidamente, a través del proceso normal de mitosis, este juego completo de cromosomas es transmitido a todas las células que constituyen el cuerpo del organismo que se desarrolla a partir del huevo fertilizado. Aunque los tintes nos permiten ver los cromosomas, no facilitan la distinción entre un cromosoma determinado y los demás. Generalmente, todos ellos semejan una maraña de apelmazados spaghetti. Por ello se creyó durante mucho tiempo que cada célula humana contenía veinticuatro pares de cromosomas. Fue en 1956 nada menos cuando, tras un laborioso recuento de esas células (analizadas ciertamente a conciencia), se comprobó que el número exacto era 23 pares.

Por fortuna, este problema ha desaparecido. Se ha ideado una técnica (el tratamiento con una solución de sales muy diluida) que, aplicada apropiadamente, hincha las células y dispersa los cromosomas. Entonces se les puede fotografiar y

luego se corta la fotografía en secciones, cada una de las cuales contiene un solo cromosoma. Si, seguidamente, se unen estos cromosomas por parejas y se los dispone en orden de longitud creciente, se obtendrá un «cariotipo», una imagen del contenido cromosómico de la célula con numeración consecutiva.

El cariotipo es un instrumento muy útil y sutil para las diagnosis médicas, pues la separación entre los cromosomas no es siempre perfecta. En el proceso de la división celular cualquier cromosoma puede sufrir daños o incluso romperse. Algunas veces la separación no es regular y entonces alguna de las células nacientes puede tener un cromosoma de más, mientras que a otra le faltará uno. Estas anomalías deben perjudicar el trabajo celular, a veces en tal medida que la célula no podrá funcionar. (He aquí lo que presta una exactitud aparente al proceso de la mitosis que no es tan exacto como parece, pues tan sólo ocurre que se ocultan los errores.) Tales irregularidades resultan particularmente desastrosas cuando se producen en el proceso de la meiosis, porque entonces las células-huevo o cigotos nacen con imperfecciones en el complemento-cromosoma. Si un organismo consigue desarrollarse partiendo de ese estado imperfecto (usualmente no lo consigue) cada célula de su cuerpo, tendrá la misma imperfección y el resultado será una grave dolencia congénita.

La enfermedad más frecuente de este tipo acarrea un grave retraso mental. Se la denomina «síndrome de Down» (porque el médico inglés John Langdon Haydon Down fue quien la descubrió en 1866) y su caso se repite una vez por cada mil nacimientos. Se la conoce vulgarmente por el nombre de «mongolismo» porque entre sus síntomas figuran esos párpados sesgados que recuerdan el repliegue epicántico de los pueblos asiáticos orientales. La elección de ese nombre es deplorable, pues el síndrome tiene tanto que ver con los asiáticos como con los demás.

Hasta 1959 no se descubrió la causa del síndrome de Down. Durante aquel año, tres genetistas franceses -Jerôme-Jean Lejeune, M. Gautier y P. Turpin- contaron los cromosomas en las células de tres casos y encontraron que cada uno tenía 47 cromosomas en lugar de 46. Se comprobó que el error correspondía a *tres* miembros del par cromosómático ≠ 21. Bastante más tarde, en 1967, se localizó la imagen espectral del mal. Se verificó que una niña subnormal de tres años tenía un

solo cromosoma-21. Se encontró por primera vez un ser humano con un cromosoma de menos.

Los casos de este tipo referidos a otros cromosomas parecen menos generalizados, pero siempre surgen uno u otro. Ciertos pacientes con una clase especial de leucemia muestran en sus células un fragmento cromosómico adicional apenas perceptible. Se le llama el «cromosoma Filadelfia» porque se le descubrió en un paciente hospitalizado en aquella ciudad. Generalmente, los cromosomas rotos se manifiestan con frecuencia superior a la normal en ciertas enfermedades poco comunes.

## Genes

Hacia 1860, un monje austriaco llamado Gregor Johann Mendel, que estaba demasiado ocupado con sus quehaceres monásticos para prestar atención a la excitación que el fenómeno de la división celular ocasionaba en el biólogo, había realizado pacientemente algunas experiencias en su jardín, que estaban destinadas, eventualmente, a dar sentido a la existencia de los cromosomas. Gregor Johann Mendel era un botánico aficionado, y estaba particularmente interesado en los resultados del cruzamiento de guisantes de diversas características. Su gran intuición fue estudiar una característica claramente definida en cada caso. Cruzó plantas cuyas semillas mostraban una diferente coloración (verde o amarilla), o guisantes de semillas lisas con otras de semillas rugosas, o plantas de tallo largo con otras de tallo corto, y se dedicó a observar los resultados en las plantas de las sucesivas generaciones. Con sumo cuidado, Mendel anotó estadísticamente dichos resultados, y las conclusiones a que llegó pueden resumirse esencialmente de este modo:

1. Cada característica estaba gobernada por «factores» que (en los casos estudiados por Mendel) podían existir en una de dos formas distintas. Una versión del factor para el color de las semillas, por ejemplo, causaría que estas semillas fueran verdes; la otra forma determinaría que fueran amarillas. (Por comodidad, permítasenos utilizar los términos en la actualidad vigentes. Los factores son denominados hoy en día «genes», término acuñado en 1909 por el biólogo danés Wilhelm Ludwig Johannsen a partir de una palabra griega que significa «generar», y

las diferentes formas de un gen que controlan una característica dada se denominan «alelos». Así, el gen que determina el color de las semillas poseía dos alelos, uno para las semillas verdes, y el otro para las amarillas.)

2. Cada planta tenía un par de genes para cada característica, siendo aportado cada uno de ellos por un progenitor. La planta transmitía uno de su par a una célula germinal, de tal modo que cuando las células germinales de dos plantas se unían por polinización, las nuevas plantas generadas tenían de nuevo dos genes para la característica. Los dos genes podían ser idénticos o alelos.
3. Cuando las dos plantas progenitoras aportaban alelos de un gen particular a la planta generada, un alelo podía neutralizar el efecto del otro. Por ejemplo, si una planta que producía semillas amarillas se cruzaba con una que producía semillas verdes, todos los miembros de la generación siguiente producirían semillas amarillas. El alelo amarillo del gen determinante del color de las semillas era «dominante», el alelo verde «recesivo».
4. No obstante, el alelo recesivo no resultaba destruido. El alelo verde, en el caso últimamente citado, todavía se hallaba presente, aún cuando no produjera un efecto detectable. Si se cruzaban dos plantas que contenían genes mezclados (es decir, cada una con un alelo amarillo y uno verde), algunas de las plantas generadas tendrían dos alelos verdes en el óvulo fertilizado; en este caso, las plantas que se originaran darían lugar a semillas verdes, y los descendientes de tales progenitores volverían a producir también semillas verdes. Mendel indicó que existían cuatro formas posibles de combinar los alelos de un par de progenitores híbridos, cada uno de los cuales poseyera un alelo amarillo y uno verde. Un alelo amarillo procedente del primer progenitor se combinaría con un alelo amarillo proveniente del segundo; un alelo amarillo a partir del primer progenitor se combinaría con un alelo verde procedente del segundo; un alelo verde del primero se combinaría con un alelo amarillo del segundo; y, finalmente, un alelo verde del primero se combinaría con un alelo verde del segundo. De las cuatro combinaciones, tan sólo la última daría lugar a una planta productora de semillas verdes. Suponiendo que la totalidad de las cuatro combinaciones fueran igualmente probables, la cuarta parte de las plantas de una nueva generación produciría semillas verdes. Mendel pudo comprobar que esto ocurría realmente así.

5. También demostró Mendel que las características de diferente clase -por ejemplo, color de las semillas y color de las flores- eran heredadas independientemente unas de otras. Es decir, las flores rojas podían aparecer asociadas tanto a semillas amarillas, como a semillas verdes. Lo mismo ocurría con las flores blancas.

Mendel realizó estas experiencias en los años de la década 1860-1870; las anotó con sumo cuidado y envió una copia de su trabajo a Karl Wilhelm von Nägeli, un botánico suizo de gran reputación. La reacción de Nägeli fue negativa. Von Nägeli tenía, aparentemente, predilección por las teorías más generalizadas (su propia labor teórica era semimística y estaba oscuramente expresada), y concedió escaso mérito al simple recuento de los guisantes como medio conducente a la verdad. Por añadidura, Mendel era un aficionado desconocido.

Al parecer, Mendel se descorazonó por los comentarios de Nägeli, pues regresó a sus quehaceres monásticos, engordó (demasiado para trabajar en el jardín) y abandonó sus investigaciones. Sin embargo, publicó sus trabajos en 1866 en una revista austriaca de provincias, no consiguiendo atraer la atención durante toda una generación.

Pero otros científicos se dirigían lentamente hacia las mismas conclusiones a que había llegado Mendel (a pesar de desconocerlas). Una de las sendas por la que llegaron a adquirir interés por la Genética fue el estudio de las «mutaciones», es decir, de animales de extravagante naturaleza, o monstruos, que siempre habían sido considerados como malos augurios. (La palabra «monstruo» procede de una latina que significa «peligro».) En 1791, un agricultor de Massachusetts, llamado Seth Wright, adoptó un punto de vista más práctico al contemplar una rara variedad animal que había aparecido en su rebaño de ovejas. Uno de los corderos había nacido con las extremidades extraordinariamente cortas, y se le ocurrió al sagaz yanqui que con semejantes patas no podría saltar las bajas paredes de piedra que circundaban su granja. Por ello, y deliberadamente, creó una raza de ovejas de patas cortas partiendo de su no desafortunado accidente.

Esta demostración práctica estimuló a que otros exploraran la utilidad de diversas mutaciones. A finales del siglo XIX, el horticultor norteamericano Luther Burbank consiguió una serie de éxitos al obtener cientos de nuevas variedades de plantas,

que ofrecían ciertas ventajas con respecto a las antiguas, en un sentido o en otro, y, no sólo por mutaciones, sino mediante juiciosos cruzamientos e injertos.

Mientras tanto, los botánicos intentaban hallar por su cuenta una explicación para las mutaciones, y, constituyendo quizá la más sorprendente coincidencia en la historia de la Ciencia, no menos de tres hombres, de manera independiente y en el mismo año, llegaron precisamente a las mismas conclusiones que Mendel había alcanzado una generación antes. Estos hombres fueron Hugo de Vries, holandés, Karl Erich Correns, alemán y Erich van Tschermak, austriaco. En ningún caso se conocían entre sí, ni tampoco la obra de Mendel. Los tres publicaron sus trabajos en 1900. Los tres, en una revisión final de las publicaciones anteriores en este campo, descubrieron el trabajo de Mendel, siendo grande su sorpresa. Los tres publicaron sus resultados en 1900, citando cada uno de ellos el trabajo de Mendel y atribuyendo a éste el mérito del descubrimiento, a la vez que calificaban su propio trabajo de una simple confirmación de los trabajos del monje. Inmediatamente, una serie de biólogos vieron la relación que existía entre los genes de Mendel y los cromosomas que podían verse con el microscopio. El primero en trazar un paralelo en este sentido fue el citólogo norteamericano Walter S. Sutton en 1904. Indicó que los cromosomas, al igual que los genes, aparecían a pares, uno de los cuales era heredado a partir del padre y el otro de la madre. El único inconveniente que surgía con esta analogía era que el número de cromosomas en las células de cualquier organismo era mucho menor que el número de características heredadas. El hombre, por ejemplo, tiene sólo 23 pares de cromosomas y, sin embargo, posee millares de características hereditarias. Por ello, los biólogos llegaron a la conclusión que los cromosomas no eran genes. Cada uno de ellos debía de ser una agrupación de genes. Poco después, los biólogos descubrieron una magnífica herramienta para estudiar los genes específicos. No se trataba de un instrumento físico, sino de una nueva clase de animal de laboratorio. En 1906, el zoólogo Thomas Hunt Morgan, de la Universidad de Columbia, concibió la idea de utilizar moscas de la fruta (*Drosophila melanogaster*) para las investigaciones en genética. (El término «Genética» fue inventado aproximadamente en esta época por el biólogo británico William Bateson.) Las moscas de la fruta ofrecen considerables ventajas con respecto a los guisantes (o cualquier animal común de laboratorio) para el estudio

de la herencia de los genes. Se reproducen rápidamente y son muy prolíficas; pueden alimentarse a cientos con muy poca comida, tienen tipos de características hereditarias que pueden ser observadas con facilidad, y, por último, poseen una dotación cromosómica comparativamente simple: sólo cuatro pares de cromosomas por célula.

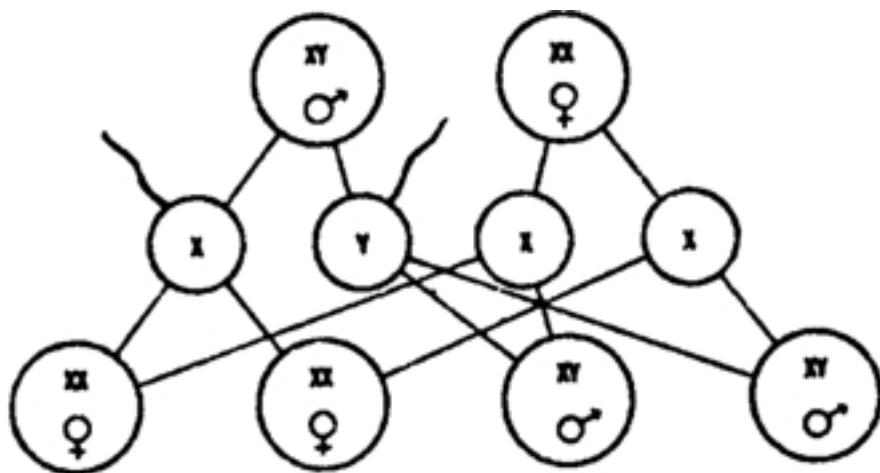
Con la mosca de la fruta, Morgan y sus colaboradores descubrieron un hecho importante por lo que se refería al mecanismo de la herencia del sexo. Hallaron que la mosca de la fruta hembra tenía cuatro pares de cromosomas perfectamente aparejados, de tal modo que todas las células-huevo, que recibían uno de cada par, eran idénticas por lo que se refería a su dotación cromosómica. Sin embargo, en el macho, uno de cada uno de los cuatro pares consistía de un cromosoma normal, llamado el «cromosoma X», y de un cromosoma menos desarrollado, que fue denominado el «cromosoma Y». Por lo tanto, cuando se forman los espermatozoides, la mitad de ellos tienen un cromosoma X y la otra mitad un cromosoma Y. Cuando un espermatozoide con el cromosoma X fertiliza un óvulo, el huevo fertilizado, con los cuatro pares aparejados, naturalmente dará lugar a una hembra. Por otra parte, un espermatozoide con un cromosoma Y producirá un macho. Ya que ambas alternativas son igualmente probables, el número de machos y hembras en las especies típicas de los seres vivientes es más o menos igual. (En algunas criaturas, especialmente en diversos pájaros, la hembra es la que tiene un cromosoma Y.) Esta diferencia cromosómica explica por qué algunos trastornos o mutaciones sólo se observan en el macho.

Si existe un gen defectuoso en uno de un par de cromosomas X, el otro miembro del par aún puede ser normal y de este modo salvar la situación. Pero, en el macho, un defecto en el cromosoma X, apareado con el cromosoma Y, por lo general, no puede ser compensado, debido a que el último contiene muy pocos genes. Por lo tanto el defecto se pondrá de manifiesto.

El ejemplo más notorio de esa enfermedad «relacionada con el sexo» es la «hemofilia», un estado morboso en que la sangre se coagula a duras penas cuando lo consigue. Los individuos hemofílicos corren constantemente el riesgo de desangrarse hasta la muerte por causas insignificantes, o bien sufren terribles agonías producidas por las hemorragias internas. Una mujer portadora de un gen

que produzca hemofilia en uno de sus cromosomas  $X$ , tiene muchas probabilidades de poseer un gen normal de posición idéntica en el otro cromosoma  $X$ . Por consiguiente no padecerá la enfermedad. Sin embargo, será un «vehículo contaminador». La mitad de los cigotos que ella forma tendrán el cromosoma  $X$  normal, y la otra mitad el cromosoma  $X$  hemofílico. Si la esperma con el cromosoma  $X$  de un macho normal fertiliza el huevo con el cromosoma  $X$  anómalo, la criatura resultante será una niña no hemofílica, aunque sí nuevamente un «vehículo contaminador»; si lo fertiliza la esperma con cromosoma  $Y$  de un macho normal, el gen hemofílico en el óvulo no encontrará ninguna resistencia por parte del cromosoma  $Y$ ; así, pues, el resultado será un niño con hemofilia. Aplicando la ley de probabilidades a los portadores de la hemofilia se llega a esta conclusión: la mitad de sus hijos serán hemofílicos, y la mitad de sus hijas serán nuevas portadoras sanas del germen.

La portadora más eminente de hemofilia en la Historia universal fue la reina Victoria de Inglaterra. Sólo fue hemofílico uno de sus cuatro hijos (el primogénito, Leopoldo). Eduardo VII -de quien descienden los últimos monarcas británicos- se salvó; así, pues, hoy día no hay hemofilia en la familia real británica. Sin embargo, dos hijas de Victoria fueron portadoras del germen. Una tuvo una hija (igualmente portadora) que contrajo matrimonio con el zar Nicolás II de Rusia. De resultas, su único hijo fue hemofílico, lo cual contribuyó a alterar la historia de Rusia y del mundo, porque aprovechando su influjo sobre el pequeño hemofílico, el monje Grigori Rasputín ganó ascendiente en Rusia y provocó un descontento general que terminaría desencadenando la revolución. La otra hija de Victoria tuvo también una hija (asimismo portadora) que se unió matrimonialmente con la casa real de España, difundiendo allí la hemofilia. Por su presencia entre los Borbones españoles y los Romanov rusos, la hemofilia recibió algunas veces el nombre de «enfermedad regia» pero no tiene ninguna conexión especial con la realeza, si se exceptúa el infortunado caso de Victoria.



### *Combinaciones de los cromosomas X e Y.*

Otro desorden menos importante relacionado con el sexo es la acromatopsia, mucho más común entre los hombres. Realmente, la ausencia de un cromosoma X puede producir entre los hombres suficiente debilidad para justificar el hecho de que las mujeres estén mejor protegidas contra la muerte desde las infecciones prenatales y suelan vivir entre tres y siete años más que los hombres como promedio. En cierto modo, los veintitrés pares completos proporcionan a las mujeres un organismo biológico más sano.

Los cromosomas *X* e *Y* (o «cromosomas sexuales») se colocan arbitrariamente al fin del cariotipo, aún cuando el cromosoma *X* figura entre los más largos. Aparentemente, las anomalías cromosómicas, tales como las del síndrome Down, son más comunes entre los cromosomas sexuales. Tal vez no sea porque los cromosomas sexuales tengan más probabilidades de verse complicados con las mitosis anormales, sino quizás porque las anomalías del cromosoma sexual tienen menos probabilidades de ser fatales, por lo cual muchos seres incipientes consiguen nacer con ellas.

El tipo de anomalía cromosómica sexual que ha despertado más interés es el del macho, cuyas células tienen un cromosoma *Y* adicional, es decir, el tipo *XYY* por así decirlo. Resulta que los varones *XYY* son bastante intratables. Generalmente, se trata de individuos altos, fornidos e inteligentes, pero caracterizados por una propensión a la ira y la violencia. Se supone que Richard Speck, el asesino de ocho enfermeras en Chicago el año 1966, pertenecía al tipo *XYY*. En octubre de 1968 se

absolvió a otro asesino en Australia alegándose que era un *XYY* y, por tanto, no responsable de sus actos. Aproximadamente, el 4 % de los reclusos en cierta prisión escocesa han resultado ser *XYY* y se calcula que la combinación *XYY* puede darse en uno de cada 3.000 hombres.

Parece, pues, plausible que se estime conveniente realizar un examen cromosómico de cada persona, e inexcusablemente de cada recién nacido. Como en el caso de otros procedimientos, sencillos teóricamente pero muy laboriosos a la hora de practicarlos, se está ensayando la realización de ese proceso con el concurso de la computadora.

La investigación con moscas de la fruta mostró que los caracteres no eran necesariamente heredados de forma independiente, como había supuesto Mendel. Ocurría que las siete características en los guisantes que él había estudiado eran gobernadas por genes en cromosomas distintos. Morgan descubrió que, cuando dos genes que gobernaban dos características diferentes se hallaban situados sobre el mismo cromosoma, aquellas características, por lo general, eran heredadas conjuntamente (del mismo modo como un pasajero en el asiento anterior de un coche y uno en el sentido posterior viajan juntos). Sin embargo, esta unión genética no es inalterable. Del mismo modo que un pasajero puede cambiar de coche, también un fragmento de un cromosoma puede, en ocasiones, unirse a otro cromosoma, intercambiándose con un fragmento del otro. Tal cruzamiento (*crossing over*) puede producirse durante la división de una célula. A consecuencia de ello, se separan caracteres ligados y, barajados de nuevo, dan lugar a una nueva ligazón. Por ejemplo, existe una variedad de la mosca de la fruta con ojos escarlata y alas rizadas. Cuando esta variedad es cruzada con una mosca de la fruta de ojos blancos y alas pequeñas, los descendientes tendrán, por lo general, ojos rojos y alas rizadas u ojos blancos y alas pequeñas. Pero el acoplamiento puede, en ocasiones, dar lugar a una mosca con ojos blancos y alas rizadas o a una con ojos rojos y alas pequeñas, a consecuencia del cruzamiento (*crossing over*). La nueva forma persistirá en las generaciones sucesivas, a menos que se produzca un nuevo cruzamiento.

Ahora imaginemos un cromosoma con un gen para los ojos rojos en un extremo y un gen para las alas rizadas en el otro. Permítasenos suponer que en la parte

central del cromosoma existen dos genes adyacentes que gobiernan otras dos características. Evidentemente, la probabilidad de que tenga lugar una rotura de ese punto particular, que separa a esos dos genes, es menor que la probabilidad de que se produzca una rotura en uno de los muchos puntos a lo largo del segmento del cromosoma que separa a los genes en los extremos opuestos. Mediante la anotación de la frecuencia de separación por cruzamiento de pares dados de características ligadas, Morgan y sus colaboradores, sobre todo Alfred Henry Sturtevant, fueron capaces de deducir la localización relativa de los genes en cuestión y, de este modo, elaboraron «mapas» cromosómicos de las localizaciones de los genes en la mosca de la fruta. La localización así determinada constituye el *locus* de un gen.

A partir de tales mapas cromosómicos y del estudio de los cromosomas gigantes, muchas veces más grande que los de tamaño ordinario, hallados en las glándulas salivares de la mosca de la fruta, se ha establecido que el insecto tiene un mínimo de 10.000 genes en un par de cromosomas. Esto significa que el gen individual debe tener un peso molecular de 60 millones. Según este hallazgo, los cromosomas algo mayores del ser humano deberían contener de 20.000 a 90.000 genes por par de cromosomas o, en conjunto, unos dos millones. Por su trabajo sobre la genética de las moscas de la fruta, Morgan recibió en 1933 el premio Nobel de Medicina y Fisiología.

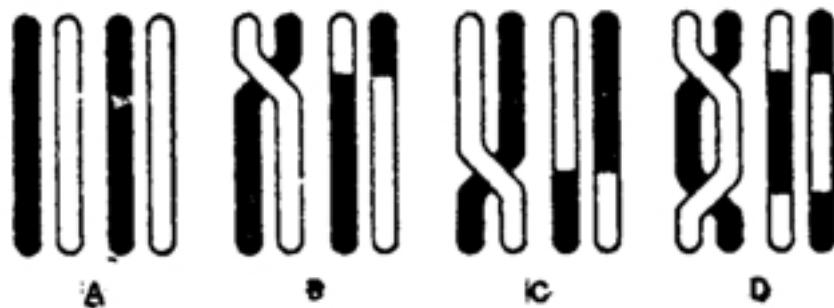
El conocimiento creciente sobre los genes permite esperar que algún día sea posible analizar y modificar la herencia genética de los individuos humanos, bien sea interceptando el desarrollo de condiciones anómalas graves o corrigiéndolas tan pronto como acusen desviaciones. Esta «ingeniería genética» requerirá mapas cromosómicos del organismo humano, lo cual implicará, evidentemente, una labor mucho más complicada que la referente a la mosca de la fruta. En 1967 se consiguió simplificar esa tarea de forma sorprendente cuando Howard Green, de la Universidad de Nueva York, compuso células híbridas con cromosomas humanos y de ratón. Relativamente pocos cromosomas humanos persistieron después de varias divisiones celulares; y se pudo localizar con más facilidad el efecto resultante de su actividad.

En 1969 se dio otro paso hacia el conocimiento y la manipulación del gen cuando el bioquímico norteamericano Jonathan Beckwith y sus colaboradores lograron aislar

un gen por primera vez en la historia. Procedía de una bacteria intestinal y controlaba un aspecto del metabolismo del azúcar.

Alguna que otra vez, con una frecuencia que puede ser calculada, tiene lugar un cambio repentino en un gen. La mutación se manifiesta por alguna característica física nueva e inesperada, tal como las extremidades cortas del cordero del agricultor Wright. Las mutaciones son relativamente poco frecuentes en la Naturaleza. En 1926, el genetista Hermann Joseph Muller, que había sido miembro del equipo de investigación de Morgan, halló una forma para aumentar artificialmente la frecuencia de las mutaciones en las moscas de la fruta, de tal modo que podía estudiarse más fácilmente la herencia de tales modificaciones. Descubrió que los rayos X podían servir para este fin; probablemente lesionaban los genes. El estudio de las mutaciones, hecho posible gracias al descubrimiento de Muller, le hicieron acreedor del premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1946.

Las investigaciones de Muller han dado origen a algunas ideas más bien inquietantes por lo que respecta al futuro de la especie humana. Si bien las mutaciones son una importante fuerza motriz en la evolución, al dar lugar en ocasiones a mejoras que permiten a una especie adaptarse mejor a su medio ambiente, dichas mutaciones beneficiosas constituyen más bien la excepción. La mayoría de las mutaciones -al menos el 99 % de ellas- reportan algún tipo de detrimiento, y algunas incluso son letales. Eventualmente, aún aquellos que sólo son ligeramente perjudiciales, desaparecen, debido a que sus portadores tampoco progresan y dan lugar a menos descendientes que los individuos sanos. Pero, entretanto, una mutación puede causar enfermedad y sufrimiento durante muchas generaciones. Además, aparecen continuamente nuevas mutaciones, y cada especie soporta una carga constante de genes defectuosos. Las diferentes variedades genéticas -incluyendo abundantes cantidades de variedades gravemente nocivas- en las poblaciones normales, quedaron bien demostradas con el trabajo del genetista ruso-americano Theodosius Dobzhansky, realizado entre 1930 y 1940. Esta diversidad impulsa la marcha de la evolución, pero la gran cantidad de genes nocivos (la «carga genética») obliga a mirar el futuro con pesimismo. Dos desarrollos modernos parecen contribuir constantemente a que esta carga sea cada vez mayor.



### *Entrecruzamientos de los cromosomas.*

En primer lugar, los avances de la Medicina y la asistencia social tienden a compensar los *handicaps* de las personas con mutaciones que implican algún detrimiento, al menos hasta el punto que se conserva la capacidad reproductora de estos individuos. Las gafas están al alcance de los individuos con defectos en la visión; la insulina conserva la vida de los que padecen diabetes (una enfermedad hereditaria), etc. Así, estas personas taradas transmiten sus genes defectuosos a las generaciones futuras. Las alternativas -permitir que los individuos defectuosos mueran jóvenes o bien esterilizarlos o aislarlos- son, por supuesto, inimaginables, salvo cuando el defecto es lo suficientemente acusado como para convertir a un individuo en algo menos que un ser humano, como ocurre en la idiotez o en la paranoia homicida. Indudablemente, la especie humana aún puede soportar su carga de genes negativamente mutados, a pesar de sus impulsos humanitarios.

Pero hay menos excusa para el segundo peligro moderno: a saber, el incremento de esa carga por una innecesaria exposición a la radiación. La investigación genética demuestra de forma incontrovertible que, para la población globalmente considerada, incluso un ligero aumento en la exposición general a la radiación implica un incremento correspondientemente pequeño de la frecuencia de la mutación, y, desde 1895, la Humanidad ha sido expuesta a tipos e intensidades de radiación de las cuales nada sabían las generaciones precedentes. La radiación solar, la radiactividad natural del suelo y los rayos cósmicos siempre han estado con nosotros. Ahora, sin embargo, empleamos, muchas veces con liberalidad, los rayos X en Medicina y en Odontología; concentraremos material radiactivo, creamos

artificialmente isótopos radiactivos de potencia radiactiva terrorífica; incluso llegamos a hacer estallar bombas nucleares. Todo esto contribuye a aumentar la radiación que incide sobre el ser humano.

Por supuesto, nadie se atrevería a sugerir que fuera abandonada la investigación en Física nuclear, o que los rayos X no fueran utilizados en Medicina y Odontología. Sin embargo, debe recomendarse seriamente el reconocimiento del peligro existente y la reducción al mínimo de la exposición a la radiación; que, por ejemplo, los rayos X sean utilizados de forma discriminada y con cuidado, y que los órganos sexuales sean protegidos de modo rutinario, durante el uso de aquéllos. Otra precaución a sugerir es que cada individuo lleve un registro de su exposición total acumulada a los rayos X, de tal modo que tenga una cierta idea de si está en peligro de exceder un límite razonable.

Por supuesto, los genetistas no estaban seguros de que los principios establecidos por las experiencias realizadas en plantas e insectos fueran necesariamente aplicables al ser humano. Después de todo, el hombre no era ni un guisante ni una mosca de la fruta. Pero los estudios directos de ciertas características del ser humano revelaron que la Genética humana seguía las mismas reglas. El ejemplo mejor conocido es el de la herencia de los tipos sanguíneos. La transfusión de sangre es una práctica muy antigua, y ya en ocasiones los médicos de antaño intentaron transfundir sangre animal a personas debilitadas por la pérdida de sangre. Pero las transfusiones, incluso las de sangre humana, a menudo eran mal toleradas, por lo que en ocasiones se llegaron a dictar leyes que las prohibían.

En el año 1890, el patólogo austriaco Karl Landsteiner descubrió finalmente que la sangre humana era de distintos tipos, algunos de los cuales presentaban incompatibilidad con los restantes. Comprobó que, en ocasiones, cuando la sangre de una persona se mezclaba con una muestra de suero (el líquido de la sangre que permanece una vez se han eliminado los glóbulos rojos y el factor coagulante) procedente de otro individuo, los glóbulos rojos de la sangre completa de la primera persona se aglutinaban. Evidentemente, una mezcla de este tipo traería muy malas consecuencias si tuviera lugar durante la transfusión, e incluso podría matar al paciente si las células aglutinadas bloqueasen la circulación sanguínea en vasos de

vital importancia. Landsteiner halló, sin embargo, que algunos tipos de sangre podían mezclarse sin causar tal aglutinación nociva.

Hacia el año 1902, Landsteiner fue capaz de anunciar que existían cuatro tipos de sangre humana, a los que llamó A, B, AB y O. Un individuo dado poseía sólo la sangre de uno de estos tipos, y, por supuesto, un tipo particular de sangre podía ser transfundido sin peligro a otra persona que tuviera el mismo tipo. Por añadidura, la sangre del tipo O podía ser transfundida sin ningún riesgo a otra persona, fuera cual fuere su tipo, en tanto la sangre A y la sangre B podían ser mezcladas con las de un paciente AB. Sin embargo, tendría lugar una aglutinación de glóbulos rojos, si la sangre AB se transfundía a un individuo A o B, al mezclarse la A y la B, o cuando una persona con el tipo O recibiera la transfusión de cualquier sangre distinta a la suya. (Por ello, debido a las posibles reacciones séricas, por lo general se administra a los pacientes únicamente la sangre de su propio tipo.) En 1930, Landsteiner (que por entonces adquirió la ciudadanía estadounidense) recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología.

Los genetistas han establecido que estos tipos de sangre (y todos los otros descubiertos desde entonces, incluso las variaciones del factor Rh), son heredadas de forma estrictamente acorde con las leyes de Mendel. Parece que existen tres alelos génicos, responsables respectivamente de la sangre A, B y O. Si ambos progenitores tienen la sangre de tipo O, todos los niños generados por éstos poseerán sangre del tipo O. Si un progenitor tiene sangre del tipo O y el otro del tipo A, la sangre de todos estos niños será del tipo A, pues el alelo A es dominante con respecto al O. El alelo B, de manera similar, es dominante con relación al alelo O. Sin embargo, los alelos B y A no muestran dominación entre sí y un individuo que posee ambos alelos tendrá sangre del tipo AB.

Las leyes de Mendel son seguidas de forma tan estricta, que los grupos sanguíneos pueden ser, y son, utilizados para determinar la paternidad. Si una madre con sangre del tipo O tiene un niño con sangre del tipo B, el padre del niño debe ser de tipo B, pues el alelo B tiene que haber procedido forzosamente de algún lado. Si el marido de dicha mujer pertenece al A o al O, es evidente que ésta ha sido infiel (o bien que ha tenido lugar un cambio de niños en el hospital). Si una mujer del tipo O con un niño del tipo B, acusa a un hombre A u O de ser el padre, es claro que se ha

confundido o bien que miente. Por otra parte, mientras que el tipo de sangre puede en ocasiones excluir una posibilidad, nunca constituye, en cambio, una prueba positiva. Si el marido de la mujer, o el hombre acusado, es del tipo B, el problema no estará totalmente resuelto. Cualquier hombre del tipo B, o cualquier hombre del tipo AB, podría haber sido el padre.

La aplicabilidad de las leyes de Mendel de la herencia a los seres humanos también ha sido confirmada por la existencia de caracteres ligados al sexo. La acromaptosia y la hemofilia (un defecto hereditario de la coagulación de la sangre) se observan de modo casi exclusivo en los varones, y son heredadas precisamente de la misma manera a como las características ligadas al sexo son heredadas en la mosca de la fruta.

Naturalmente, surge la idea de la conveniencia de prohibir a las personas con tales afecciones que tengan hijos y, de esta manera, suprimir la afección. Dirigiendo adecuadamente los cruzamientos, podría incluso llegar a mejorarse la especie humana, de modo similar a lo que se hace con el ganado. Por supuesto, ésta no es una idea nueva.

Los antiguos espartanos ya la tuvieron, e intentaron ponerla en práctica hace unos 2.500 años. En la actualidad esta idea fue revivida por un científico inglés, Francis Galton (primo de Charles Darwin). En 1883, acuñó el término «Eugenésia» para describirlo (la palabra deriva del griego y significa «buen nacimiento»).

Galton desconocía en su tiempo los hallazgos de Mendel. No comprendía que las características podían estar ausentes y ser, no obstante, transmitidas como recesivas. No comprendía tampoco que se heredaban grupos de características de forma intacta y que sería difícil eliminar una no deseable sin suprimir al propio tiempo una deseable. Ni siquiera sabía que las mutaciones podían introducir características indeseables en cada generación.

La genética humana es un tema enormemente complicado, que no es probable que se estudie en toda su extensión en un futuro previsible. El ser humano no da lugar a descendientes ni con tanta frecuencia ni en número tan grande a como lo hace la mosca de la fruta; sus descendientes no pueden ser sometidos a un control de laboratorio con fines experimentales; tiene muchos más cromosomas y características heredadas que la mosca de la fruta; las características humanas en

las que estamos más interesados, tales como el genio creador, la inteligencia, la fuerza moral, son extraordinariamente complejas e implican la interrelación de numerosos genes e influencias ambientales. Por todas estas razones, los profesionales no pueden estudiar la genética humana con la misma confianza con que abordan la genética de la mosca de la fruta.

Por lo tanto, la Eugenesia sigue siendo un sueño, confuso e insustancial, debido a la falta de conocimientos. Aquellos que en la actualidad abogan decididamente en favor de programas elaborados de Eugenesia, tienden a ser racistas o excéntricos.

¿De qué modo determina un gen la manifestación de la característica física de la cual es responsable? ¿Cuál es el mecanismo por el que da origen a semillas amarillas en los guisantes, a alas rizadas en las moscas de la fruta, o a ojos azules en los seres humanos? Hoy en día los biólogos tienen la certeza de que los genes ejercen sus efectos a través de las enzimas. Uno de los casos más evidentes es el del color de los ojos, el pelo y la piel. El color (azul o pardo, amarillo o negro, rosa o pardo, o mezclas de ellos) viene determinado por la cantidad existente del pigmento denominado melanina (de la palabra griega para «negro»), que se halla presente en el iris de los ojos, en el pelo o en la piel. La melanina se forma a partir de un aminoácido, la tirosina, a través de una serie de fases, cuya naturaleza se ha dilucidado en la mayor parte de los casos. Se hallan implicadas una serie de enzimas, y la cantidad de melanina formada dependerá de la cantidad de éstas. Por ejemplo, una de las enzimas que cataliza las dos primeras fases, es la tirosina. Seguramente, algún gen particular controla la producción de tirosinasa por las células. De este modo controlará también la coloración de la piel, el pelo y los ojos. Y, puesto que el gen es transmitido de una generación a otra, los niños naturalmente se parecerán a sus padres en el color. Si una mutación determina la aparición de un gen defectuoso que no pueda formar tirosinasa, no existirá melanina y el individuo será «albino». La ausencia de una simple enzima (y, por lo tanto, la deficiencia de un único gen) será suficiente para determinar un cambio importante en las características personales.

Establecido el hecho que las características de un organismo son controladas por su dotación de enzimas, que a su vez es controlada por los genes, se plantea la siguiente cuestión: ¿Cómo actúan los genes? Desgraciadamente, incluso la mosca

de la fruta es un organismo demasiado complejo para estudiar el problema con detalle. Pero, en 1941, los biólogos norteamericanos George Wells Beadle y Edward Lewrie Tatum iniciaron un estudio de este tipo con un organismo sencillo al que consideraron admirablemente adecuado para este fin. Se trataba de un hongo muy frecuente en la Naturaleza, el *Neurospora crassa*.

La *Neurospora* no es muy exigente por lo que a su alimentación respecta. Crecerá muy bien sobre el azúcar junto con compuestos inorgánicos que aporten nitrógeno, azufre y diversos minerales. Además del azúcar, la única sustancia orgánica que debe añadirse al medio es una vitamina denominada «biotina». En una cierta fase de su ciclo vital, el moho produce ocho esporas, todas ellas de idéntica constitución genética. Cada espora contiene siete cromosomas; como en la célula sexual de un organismo más complejo, sus cromosomas aparecen aislados, no en parejas. En consecuencia, si se cambia uno de sus cromosomas, el efecto puede ser observado, debido a que no se halla presente la pareja normal que pueda enmascarar el efecto. Por lo tanto, Beadle y Tatum fueron capaces de crear mutaciones en la *Neurospora*, exponiendo el moho a los rayos X y siguiendo luego los efectos específicos en el comportamiento de las esporas.

Si, después que el moho había recibido una dosis de radiación, las esporas todavía se desarrollaban en el medio usual de sustancias nutritivas, evidentemente no se había producido una mutación, al menos, hasta el punto de alterar las necesidades nutritivas del organismo para su crecimiento. Si las esporas no crecían en el medio usual, los experimentadores proseguían la investigación para determinar si estaban vivas o muertas, proporcionándoles un medio completo que contuviera todas las vitaminas, aminoácidos y otros principios que eventualmente pudiera precisar. Si las esporas crecían en este medio, se llegaba a la conclusión de que los rayos X habían producido una mutación que había modificado las necesidades nutritivas de la *Neurospora*. Aparentemente, ahora precisaba al menos un nuevo componente en su dieta. Para hallar cuál era éste, los experimentadores sometieron a las esporas a una dieta y luego a otra, y a otra más, en cada ocasión con algunos nuevos componentes que no se hallaban presentes en el medio completo. Podían omitir todos los aminoácidos o la totalidad de las diversas vitaminas, o todos menos uno o dos aminoácidos, o una o dos vitaminas. De esta forma fueron delimitando las

necesidades, hasta identificar exactamente qué era lo que la espora precisaba entonces en su dieta, que no estaba presente en la utilizada antes de la mutación. En ocasiones parecía que la espora mutada requería el aminoácido arginina. La «cepa salvaje» normal, había sido capaz de fabricar su propia arginina a partir del azúcar y las sales de amonio. Ahora, debido a la modificación genética, ya no podía sintetizar argirina, y, a menos que se añadiera este aminoácido al medio nutriente, no podría producir proteínas y, en consecuencia, desarrollarse.

La forma más clara para explicar una situación de este tipo era suponer que los rayos X habían alterado un gen responsable de la formación de una enzima necesaria para la síntesis de arginina. Al carecer del gen normal, la *Neurospora* ya no podía elaborar la enzima. Y, sin enzima, no producía arginina. Beadle y sus colaboradores empezaron a utilizar este tipo de información para estudiar la relación de los genes con la química del metabolismo. Era una forma para mostrar, por ejemplo, que en la elaboración de la quinina se hallaba implicado más de un gen. Al objeto de simplificar la exposición, supongamos que dos genes -el gen *A* y el gen *B*- son responsables de la formación de dos enzimas distintas, siendo ambas necesarias para la síntesis de la quinina. Entonces, una mutación en el gen *A* o en el gen *B* anularía la capacidad de la *Neurospora* para producir el aminoácido. Supongamos que irradiamos dos colonias de *Neurospora* y producimos una cepa sin arginina en cada una de aquéllas. Si tenemos suerte, un mutante tendrá un defecto en el gen *A* y un gen *B* normal, y el otro poseerá un gen *A* normal y uno *B* defectuoso. Para ver si ha ocurrido esto, crucemos los dos mutantes en la fase sexual de su ciclo vital. Si las dos cepas no difieren de esta forma, la recombinación de los cromosomas podría producir algunas esporas cuyos genes *A* y *B* fueran normales. En otras palabras, a partir de dos mutantes que son incapaces de producir arginina, obtendremos algunos descendientes que podrían elaborarla. Ocurrió, precisamente tal cosa, cuando se efectuaron las experiencias.

Fue posible explorar el metabolismo de la *Neurospora* de forma algo mas precisa que la expuesta. Por ejemplo, existían tres cepas mutantes distintas, incapaces de producir arginina en un medio ordinario. Una se desarrollaba sólo si se administraba arginina, la segunda crecía si recibía dicha arginina o un compuesto muy similar

denominado citrulina. La tercera crecía indistintamente con arginina o con citrulina, e incluso con otro compuesto similar llamado ornitina.

¿Qué conclusión puede deducirse de esto? Bien, podemos suponer que estas tres sustancias son las fases de una secuencia en la que la arginina es el producto final. Cada una requiere una enzima. Primero, la ornitina se forma a partir de algún compuesto más simple con la ayuda de una enzima; luego otra enzima convierte a la ornitina en citrulina y, finalmente, una tercera enzima convierte a la citrulina en arginina. (En realidad, el análisis químico demuestra que cada uno de los tres compuestos es ligeramente más complejo que el anterior.) Ahora bien, un mutante de *Neurospora* que carezca de la enzima que elabora ornitina, pero que posea las otras enzimas, podrá crecer si se le suministra ornitina, pues, a partir de ella, la espora podrá producir la esencial arginina. Por supuesto, también puede crecer con citrulina, a partir de lo cual puede elaborar arginina, y asimismo crecerá también, como es lógico, con la propia arginina. A mayor abundamiento, podemos razonar que la segunda cepa mutante carece de la enzima necesaria para convertir la ornitina en citrulina. Por lo tanto, esta cepa precisará de citrulina, a partir de la que podrá formar arginina, o bien se le deberá administrar la propia arginina. Finalmente, podemos concluir que el mutante que solamente crece en presencia de arginina ha perdido la enzima (y el gen) responsable de la conversión de la citrulina en arginina.

Por el análisis del comportamiento de las diversas cepas mutantes que fueron capaces de aislar, Beadle y colaboradores fundaron la ciencia de la «genética química». Dilucidaron el proceso de síntesis por organismos de muchos compuestos importantes. Beadle propuso la que se ha conocido como la «teoría de un gen-una enzima», es decir, que cada gen gobierna la formación de una sola enzima. Por su labor pionera, Beadle y Tatum compartieron (con Lederberg) el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1958.

Los descubrimientos de Beadle indujeron a los bioquímicos a la búsqueda de pruebas en favor de las modificaciones controladas por los genes en las proteínas, particularmente en mutantes humanos. Y apareció inesperadamente un caso, relacionado con la enfermedad denominada «anemia de células falciformes».

Esta enfermedad había sido comunicada por vez primera en 1910 por un médico de Chicago llamado James Bryan Herrick. Examinando con el microscopio una muestra de sangre de un joven paciente negro, halló que los glóbulos rojos, normalmente redondos, adoptaban formas irregulares, muchos de ellos la forma de media luna de la hoz. Otros médicos empezaron a observar el mismo peculiar fenómeno, casi siempre en pacientes de raza negra.

Por fin, los investigadores llegaron a la conclusión que la anemia falciforme era, en general, una enfermedad hereditaria. Seguía las leyes mendelianas de la herencia. Al parecer, en los pacientes con células falciformes existe un gen que, cuando es heredado a partir de ambos progenitores, produce estos glóbulos rojos deformados. Tales células son incapaces de transportar apropiadamente el oxígeno y tienen una vida excepcionalmente corta, de tal forma que se produce una deficiencia de glóbulos rojos en la sangre. Aquellos que heredan dicho gen a partir de ambos progenitores suelen morir durante la infancia a consecuencia de la enfermedad. Por otra parte, cuando una persona sólo posee un gen determinante de las células falciformes, a partir de uno de sus progenitores, la enfermedad no aparece. El desarrollo de células falciformes sólo se aprecia en aquellas personas sometidas a una escasa concentración de oxígeno, como ocurre en las grandes altitudes. Se considera que tales personas tienen un «carácter de células falciformes», pero no la enfermedad.

Se halló que, aproximadamente, el 9 % de los negros estadounidenses tenían este carácter y que el 0,25 % padecían la enfermedad. En algunas localidades del África Central, cerca de la cuarta parte de la población negra muestra este carácter. Aparentemente, el gen que determina las células falciformes se originó en África a consecuencia de una mutación y fue heredado desde entonces por los individuos de raza africana. Si la enfermedad es letal, ¿por qué no ha desaparecido el gen defectuoso? Los estudios llevados a cabo en África durante la década de los cincuenta dieron la respuesta. Al parecer, las personas con el carácter de células falciformes parecen tener una mayor inmunidad a la malaria que los individuos normales. Las células falciformes son, de algún modo, menos adecuadas para contener el parásito de la malaria. Se estima que en las áreas infestadas de malaria, los niños con dicho carácter tienen un 25 % más de probabilidades de

sobrevivir hasta la edad en que pueden procrear, que aquellos sin este carácter. Por lo tanto, poseer un solo gen de los que determinan la formación de células falciformes (pero no los dos genes, que causan la anemia) confiere una ventaja. Las dos tendencias opuestas -favorecimiento de la persistencia del gen defectuoso por el efecto protector de uno solo de ellos y desaparición del gen por su efecto letal, cuando es heredado a partir de ambos progenitores- crean un equilibrio que permite la persistencia del gen en un cierto porcentaje de la población. En las regiones donde la malaria no constituye un grave problema, el gen tiende a desaparecer. En América, la incidencia de los genes determinantes de la formación de células falciformes entre los negros puede haber sido originalmente del orden del 25 %. Aún suponiendo una reducción de, aproximadamente, un 15 % por cruzamiento con individuos de raza no negra, la presente frecuencia de sólo un 9 % demuestra que el gen está desapareciendo. Con toda probabilidad seguirá esta tendencia. Si África llega a verse libre de la malaria, seguramente ocurrirá allí lo mismo.

La significación bioquímica del gen determinante de la formación de células falciformes adquirió de repente una gran importancia en 1949, cuando Linus Pauling y sus colaboradores, en el Instituto de Tecnología de California (donde también estaba trabajando Beadle), demostraron que los genes afectaban a la hemoglobina de los glóbulos rojos. Las personas con dos genes determinantes de la formación de células falciformes eran incapaces de formar la hemoglobina normal. Pauling demostró este hecho mediante la técnica denominada «electroforesis», método que utiliza una corriente eléctrica para separar las proteínas gracias a las diferencias de la carga eléctrica neta existente en las diversas moléculas proteicas. (La técnica electroforética fue desarrollada por el químico sueco Ame Wilhelm Kaurin Tiselius, quien recibió el premio Nobel de Química en 1948 por esta valiosa contribución.) Pauling, por análisis electroforético, halló que los pacientes con anemia falciforme poseían una hemoglobina anormal (denominada «hemoglobina S»), que podía ser separada de la hemoglobina normal. El tipo normal fue denominado hemoglobina A (de «adulto»), para distinguirla de una hemoglobina en los fetos, denominada hemoglobina F.

Desde 1949, los bioquímicos han descubierto otra serie de hemoglobinas anormales, aparte de aquellas en las células falciformes, y las han diferenciado con

letras, existiendo la hemoglobina C hasta la hemoglobina M. Al parecer, los genes responsables de la formación de la hemoglobina han mutado en muchos alelos defectuosos, dando origen cada uno de ellos a una hemoglobina que no realiza tan eficazmente la función de transporte como lo hace la molécula en condiciones ordinarias, pero que quizás es de utilidad en alguna condición no usual. Así, del mismo modo que la hemoglobina S, cuando su presencia ha sido determinada por un solo gen, aumenta la resistencia a la malaria, la hemoglobina C, cuando también es determinada por un solo gen, incrementa la capacidad del organismo para subsistir con cantidades mínimas de hierro.

Puesto que las diversas hemoglobinas anormales difieren en su carga eléctrica, deberán ser distintas de algún modo en la disposición de los aminoácidos en la cadena peptídica, pues el orden de sucesión de los aminoácidos en ésta es responsable de la carga eléctrica de la molécula. Las diferencias suelen ser pequeñas, debido a que las hemoglobinas anormales desarrollan, después de todo, la misma función que la hemoglobina. La esperanza de establecer dónde radica la diferencia en una enorme molécula, de aproximadamente 600 aminoácidos, era muy pequeña. No obstante; el bioquímico alemán residente en Norteamérica Vernon Martin Ingram y sus colaboradores atacaron el problema de la química de las hemoglobinas anormales.

Primero fragmentaron las hemoglobinas A, S y C en péptidos de diversos tamaños, dirigiéndolas con una enzima proteolítica. Luego separaron los fragmentos de cada hemoglobina mediante la «electroforesis sobre papel», es decir, usando la corriente eléctrica para transportar las moléculas a través de una tira húmeda de papel de filtro, en vez de hacerlo a través de una solución. (Podemos suponerla como un tipo de cromatografía sobre papel en la que se hace uso de la acción separadora de la electricidad.) Una vez los investigadores hubieron realizado esta separación con los fragmentos de cada una de las tres hemoglobinas, hallaron que la única diferencia entre ellas era que un solo péptido aparecía en cada caso en diferentes lugares.

Seguidamente sometieron a este péptido a una ulterior fragmentación y análisis. Observaron que estaba constituido por nueve aminoácidos y que la disposición de éstos era exactamente la misma en las tres hemoglobinas salvo en una posición. Las estructuras correspondientes fueron:

Hemoglobina A: His- Val-Leu-Leu-Tr-Pro-Glu--Glu-Lis

Hemoglobina S: His- Val-Leu-Leu-Tr-Pro-Val-Glu-Lis

Hemoglobina C: His- Val-Leu-Leu-Tr-Pro-Lis-Glu-Lis

Podía apreciarse, pues, que la única diferencia entre las tres hemoglobinas consistía en aquel único aminoácido que ocupaba la posición siete en el péptido: era el ácido glutámico en la hemoglobina A, la valina en la hemoglobina S y la lisina en la hemoglobina C. Ya que el ácido glutámico da origen a una carga negativa, la lisina a una carga positiva y la valina no aporta ninguna carga, no es sorprendente que las tres proteínas se comporten de manera diferente en la electroforesis, pues su carga global es distinta.

Pero, ¿por qué una modificación tan ligera en la molécula determina un cambio tan drástico en el glóbulo rojo? Bien, una tercera parte del glóbulo rojo normal la constituye la hemoglobina A. Las moléculas de hemoglobina A se hallan tan densamente dispuestas en el interior de la célula, que apenas si tienen espacio para moverse libremente; es decir, se hallan a punto de precipitar la solución. Uno de los factores que determinan que una proteína precipite o no es la naturaleza de su carga. Si todas las proteínas tienen la misma carga neta, se repelen entre sí y no precipitan. Cuanto mayor sea la carga (es decir la repulsión), tanto menos probable será que las proteínas precipiten. En la hemoglobina S, la repulsión intramolecular puede ser algo menor que en la hemoglobina A, y, en su consecuencia, la hemoglobina S será menos soluble y precipitará con mayor facilidad. Cuando una célula falciforme posee un gen normal, este último puede determinar la formación de suficiente hemoglobina A para mantener, aunque a duras penas, la hemoglobina S en solución. Pero cuando los dos genes sean mutantes determinantes de la formación de células falciformes, sólo producirán hemoglobina S. Esta molécula no puede permanecer en solución. Precipita, dando lugar a cristales que deforman y debilitan los hematíes.

Esta teoría explicaría por qué la variación en simplemente un aminoácido, en cada mitad de una molécula constituida por casi 600 aminoácidos, basta para provocar una enfermedad grave, casi siempre con un precoz desenlace fatal.

El albinismo y la anemia falciforme no son los únicos defectos en el ser humano atribuidos a la ausencia de una única enzima o a la mutación de un solo gen. La fenilcetonuria, un defecto hereditario del metabolismo, causa a menudo un retraso mental. Resulta de la carencia de una enzima necesaria para convertir el aminoácido fenilanina en tirosina. Por otra parte, la galactosemia, un trastorno que es causa de cataratas y lesiones en el encéfalo y el hígado, ha sido atribuida a la ausencia de una enzima necesaria para convertir a la galactosa-fosfato en glucosafosfato. Existe un defecto que implica la ausencia de una u otra de las enzimas que controlan la escisión del glucógeno (una especie de almidón) y su conversión en glucosa, y que da como resultado la acumulación anormal de glucógeno en el hígado y en otros lugares, lo que conduce por lo general a una muerte precoz. Éstos son ejemplos de «errores congénitos del metabolismo», es decir, de una ausencia congénita de la capacidad para formar alguna enzima, de importancia más o menos vital, hallada en los seres humanos normales. Este concepto fue introducido por vez primera en Medicina por el médico británico Archibald E. Garrod, en 1908, aunque no recibió mucha atención durante una generación hasta que, a mediados de 1930, el genetista inglés John Burdon Sanderson Haldane llamó de nuevo la atención de los científicos sobre este asunto. Tales enfermedades suelen ser gobernadas por un alelo recesivo del gen que produce la enzima en cuestión. Cuando sólo se halla ausente uno de los dos genes, el normal puede seguir realizando su función y, por lo general, el individuo es capaz de llevar una vida normal (como en el caso del poseedor del carácter de célula falciforme). En general, los problemas sólo surgen cuando los dos progenitores poseen el mismo desafortunado gen y se produce además la desgracia de que ambos se combinan en un huevo fertilizado. Su hijo será entonces víctima de una especie de ruleta rusa. Probablemente todos nosotros somos portadores de nuestra carga de genes anormales, defectuosos o incluso peligrosos, generalmente enmascarados por genes normales. Se puede ahora comprender por qué los estudiosos de la genética humana están tan preocupados por lo que la radiación, o cualquier otra causa, puede añadir a esta carga.

## Ácidos Nucleicos

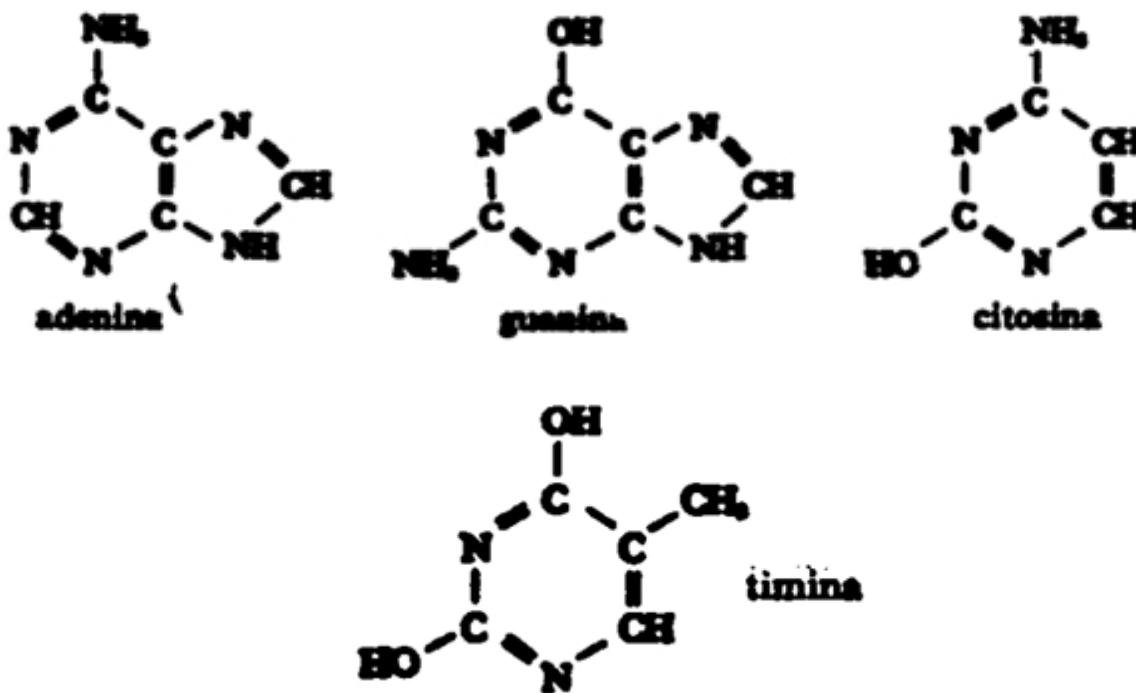
La cuestión realmente llamativa, por lo que respecta a la herencia, no son estas aberraciones espectaculares y en cierto modo raras, sino el hecho mismo de que la herencia siga estrictamente las leyes que las gobiernan. Generación tras generación, milenio tras milenio, los genes se reproducen a sí mismos, exactamente de la misma manera, Y generan idénticas enzimas, con sólo una ocasional variación accidental de la matriz. Rara vez se desvían de su función hasta el punto de introducir un único aminoácido erróneo en una gran molécula proteica. ¿Cómo consiguen elaborar copias tan exactas de ellos mismos, una y otra vez, con tan sorprendente fidelidad? Un gen está constituido por dos componentes principales. Tal vez la mitad de él sea de naturaleza proteica, pero la otra mitad no lo es. A esta parte no proteica dedicaremos ahora nuestra atención.

En 1869, un bioquímico suizo llamado Friedrich Miescher, mientras descomponía las proteínas de las células con pepsina, descubrió que este fermento no digería el núcleo de la célula. Éste se encogía algo, pero permanecía sustancialmente intacto. Por análisis químico, Miescher descubrió a continuación que el núcleo celular consistía en gran parte de una sustancia que contenía fósforo, en absoluto parecida a una proteína en sus propiedades. Denominó a la sustancia «nucleína». Fue rebautizada posteriormente con el nombre de «ácido nucleico» cuando, veinte años más tarde se apreció que era fuertemente ácida.

Miescher se dedicó al estudio de este nuevo material y, así, llegó a descubrir que los espermatozoides (que tienen muy poco material fuera del núcleo celular) eran particularmente ricos en ácido nucleico. Mientras tanto, el químico alemán Felix Hoppe-Seyler, en cuyos laboratorios Miescher había hecho sus primeros descubrimientos, y que personalmente había confirmado la labor del joven antes de permitirle que fuera publicada, aisló ácido nucleico a partir de las células de levadura. Éste parecía diferir en sus propiedades del material de Miescher, de tal modo que a la variedad de este último se la denominó «ácido timonucleico» (debido a que podía obtenerse con particular facilidad a partir del timo de los animales), y, naturalmente, a la de Hoppe-Seyler se la llamó «ácido nucleico de la levadura». Ya que el ácido timonucleico se obtuvo al principio a partir de las células animales y el ácido nucleico de la levadura sólo a partir de las células vegetales, se supuso,

durante un cierto período de tiempo, que esto podía representar una diferencia química general entre los animales y las plantas.

El bioquímico alemán Albrecht Kossel, otro discípulo de Hoppe-Seyler, fue el primero en efectuar una investigación sistemática de la estructura de la molécula del ácido nucleico. Por hidrólisis cuidadosa aisló, a partir de él, una serie de compuestos nitrogenados, que denominó «adenina», «guanina», «citosina» y «timina». En la actualidad se sabe que sus fórmulas son:



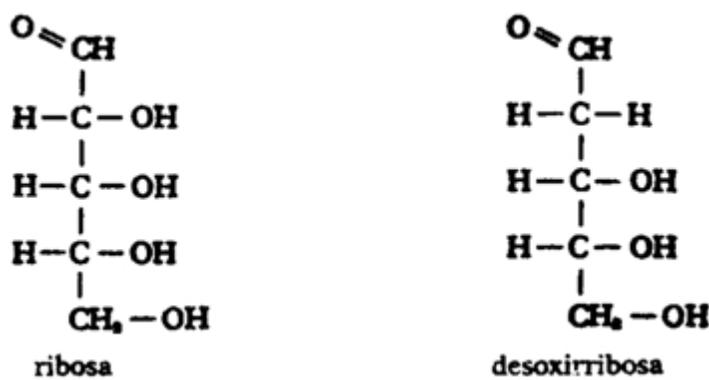
A la estructura con dos anillos en los dos primeros compuestos se la denomina «anillo purínico» y al anillo único en las otras dos se lo denomina «anillo pirimidínico». Por lo tanto, la adenina y la guanina son purinas y la citosina y la timina pirimidinas.

Por estas investigaciones, que fueron origen de una fructífera serie de descubrimientos, Kossel recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1910.

En 1911, el bioquímico estadounidense de origen ruso Phoebus Aaron Theodore Levene, un discípulo de Kossel, llevó la investigación a una fase ulterior. Kossel había descubierto en 1891 que los ácidos nucleicos contenían hidratos de carbono, pero entonces Levene demostró que los ácidos nucleicos contenían moléculas de azúcar con 5 átomos de carbono.

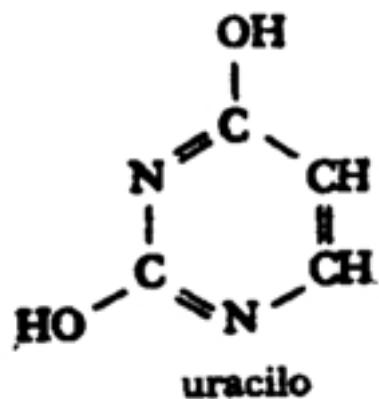
(Esto fue, en aquel tiempo, un hallazgo poco usual. Los azúcares mejor conocidos, tales como la glucosa, contenían 6 átomos de carbono.) Levene dedujo este hecho al observar que las dos variedades de ácido nucleico diferían en la naturaleza del azúcar con 5 átomos de carbono.

El ácido nucleico de la levadura contenía «ribosa», mientras que el ácido timonucleico contenía un azúcar idéntico a la ribosa, salvo por la ausencia de un átomo de oxígeno, de tal modo que este azúcar fue denominado «desoxirribosa». Sus fórmulas son:



En consecuencia, las dos variedades de ácido nucleico fueron denominadas «ácido ribonucleico» (ARN) y «ácido desoxirribonucleico» (ADN).

Además de por sus azúcares, los dos ácidos nucleicos también difieren en una de las pirimidinas. El ARN tiene «uracilo» en lugar de timina. No obstante, el uracilo es muy similar a la timina, como puede apreciarse a partir de la fórmula:



Hacia 1934 Levene fue capaz de demostrar que los ácidos nucleicos podían ser escindidos en fragmentos que contenían una purina o una pirimidina, la ribosa o la

desoxirribosa, y un grupo fosfato. A esta combinación se la denominó «nucleótido». Levene indicó que la molécula de ácido nucleico estaba constituida por nucleótidos, de la misma manera que una proteína está formada por aminoácidos. Sus estudios cuantitativos le sugirieron que la molécula consistía precisamente de cuatro unidades de nucleótidos, una conteniendo adenina, otra guanina, otra citosina y por último otra timina (en el ADN) o uracilo (en el ARN). Sin embargo, con el tiempo se apreció que lo que Levene había aislado no eran moléculas de ácido nucleico, sino fragmentos de ellas, y, más tarde, a mediados de la década de los cincuenta, los bioquímicos hallaron que los pesos moleculares de los ácidos nucleicos llegaban a ser de hasta 6 millones. Así, pues, realmente, los ácidos nucleicos tienen un tamaño molecular igual o quizás superior al de las proteínas.

La forma exacta en que los nucleótidos están constituidos y engarzados fue confirmada por el bioquímico británico Alexander Robertus Todd, quien sintetizó una serie de nucleótidos a partir de fragmentos más simples y unió cuidadosamente los nucleótidos entre sí, en condiciones que sólo permitían la formación de un determinado tipo de enlace. Por este trabajo recibió el premio Nobel de Química de 1957.

En consecuencia, la estructura general del ácido nucleico podría ser considerada como algo similar a la estructura general de las proteínas. La molécula proteica está constituida por una columna vertebral de naturaleza polipéptida, de la que emergen las cadenas laterales de los aminoácidos individuales. En los ácidos nucleicos, la porción azúcar de un nucleótido se halla unida a la porción azúcar del próximo mediante un grupo fosfato unido a ambas. Así, pues, existe en ellos un «cuerpo de azúcar fosfato», que corre a lo largo de la molécula. Desde ésta se proyectan purinas y pirimidinas, una a partir de cada nucleótido.

Mediante el uso de técnicas de coloración, los investigadores comenzaron a establecer la localización de los ácidos nucleicos en la célula. El químico alemán Robert Feulgen, empleando un colorante rojo que teñía al ADN, pero no al ARN, halló que el ADN estaba localizado en el núcleo celular, específicamente en los cromosomas. Detectó este ácido, no solamente en las células animales, sino también en las vegetales. Además, por tinción del ARN, demostró que este ácido nucleico existía tanto en las células animales como en las vegetales. En resumen,

los ácidos nucleicos eran materiales de distribución universal, que existían en todas las células vivientes.

El bioquímico sueco Torbjörn Caspersson estudió más detalladamente la cuestión, suprimiendo uno de los ácidos nucleicos (mediante una enzima que los escindía en fragmentos solubles, que podían ser eliminados de las células mediante su lavado) y concentrando el otro. Seguidamente fotografió la célula con luz ultravioleta; ya que un ácido nucleico absorbe este tipo de luz con mucha más intensidad de lo que lo hacen los otros componentes celulares, se pudo apreciar claramente la localización del ADN o del ARN, según fuera el que permanecía en la célula. El ADN aparecía localizado sólo en los cromosomas. El ARN se hallaba principalmente en ciertas partículas de citoplasma. Parte del ARN también se encontraba en el «núcleo», una estructura en el interior del núcleo. (En 1948, el bioquímico Alfred Ezra Mirsky, del «Instituto Rockefeller», demostró que pequeñas cantidades del ARN se hallaban presentes en los cromosomas, mientras que Ruth Sager demostró a su vez que el ADN podía encontrarse en el citoplasma, particularmente en los cloroplastos de las plantas.)

Las fotografías de Caspersson pusieron de manifiesto que el ADN se hallaba localizado en bandas existentes en los cromosomas. ¿Era posible que las moléculas de ADN no fueran otra cosa que genes, los cuales, hasta entonces, sólo habían tenido una existencia vaga y amorfa?

Durante los años cuarenta, los bioquímicos siguieron esta senda con creciente excitación. Consideraban particularmente significativo que la cantidad de ADN en las células del organismo fuera siempre rígidamente constante, salvo en los espermatozoides y óvulos, que contenían la mitad de esta cantidad, lo que era de esperar ya que tenían sólo la mitad del número de cromosomas de las células normales. La cantidad de ARN y de proteína en los cromosomas podía variar considerablemente, pero la cantidad de ADN permanecía fija. Éste, evidentemente, parecía indicar una estrecha relación entre el ADN y los genes.

Por supuesto, existían una serie de hechos que hablaban en contra de esta idea. Por ejemplo, ¿cuál era el papel que desempeñaban las proteínas en los cromosomas? Proteínas de diversas clases se hallaban asociadas a los ácidos nucleicos, formando una combinación denominada «núcleo proteína». Considerando la complejidad de

las proteínas y su grande y específica importancia en otras capacidades del organismo, ¿no sería la proteína la parte importante de la molécula? Podría ocurrir que el ácido nucleico no fuera más que un complemento, una porción actuante de la molécula, de forma similar a como lo hace el heme en la hemoglobina.

Pero las proteínas (conocidas como protamina e histona) halladas con más frecuencia en la nucleoproteína aislada resultaron poseer una estructura más bien simple.

Contrariamente, parecía asignarse al ADN una estructura cada vez más compleja. La cola empezaba a perseguir al perro.

En este punto se descubrieron ciertos hechos de importancia, que parecían demostrar que la cola era del perro. En estos descubrimientos se hallaba implicado el neumococo, el bien conocido microorganismo causante de la neumonía. Hacía tiempo que los bacteriólogos estudiaban dos cepas distintas de neumocos desarrollados en el laboratorio; uno con una envoltura lisa, constituida por un hidrato de carbono complejo, la otra carente de revestimiento y, por lo tanto, de aspecto rugoso. En apariencia la cepa rugosa carecía de alguna enzima necesaria para elaborar la cápsula formada por un hidrato de carbono. Sin embargo, un bacteriólogo inglés, llamado Fred Griffith, había descubierto que, si bacterias muertas de la variedad lisa se mezclaban con otras vivas de variedad rugosa y luego se inyectaban a un ratón, los tejidos del ratón inyectado contendrían eventualmente neumocos vivos de la variedad lisa. ¿Cómo podía ocurrir tal cosa? Los neumocos muertos, evidentemente, no habían resucitado. Algo debía de haber transformado a los neumocos rugosos, de tal modo que eran capaces de elaborar un revestimiento liso. ¿Qué había provocado esta transformación? Sin duda, existía algún tipo de factor aportado por las bacterias muertas de la variedad lisa.

En 1944, tres bioquímicos norteamericanos, Oswald Theodore Avery, Colin Munro Macleod y Maclyn McCarty, identificaron el principio que determinaba esta transformación. Era el ADN. Cuando aislaron a este ácido puro a partir de la cepa lisa y lo adicionaron a neumocos rugosos, aquél bastó para transformar la cepa rugosa en una lisa.

Seguidamente, los investigadores intentaron aislar otros principios

transformadores existentes en otras bacterias y que repercutieran sobre otras propiedades y, en cada caso, el principio en cuestión resultó ser una variedad del ADN. La única conclusión plausible era que el ADN podía actuar como un gen. En realidad, varias investigaciones, realizadas particularmente con virus (ver capítulo XIII), habían revelado que la proteína asociada al ADN es casi superflua desde el punto de vista genético: el ADN puede producir efectos genéticos por sí solo, bien en el cromosoma, o -en el caso de una herencia no cromosómica- en ciertos cuerpos citoplasmáticos, tales como los cloroplastos. Si el ADN es la clave de la herencia, debe poseer una estructura compleja, puesto que debe transportar un modelo elaborado, o clave de instrucciones (el «código genético»), para la síntesis de enzimas específicas. Suponiendo que está constituido por las cuatro clases de nucleótidos, éstas no pueden disponerse de una forma regular, tal como 1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4... Tal molécula sería demasiado simple como matriz de las enzimas. En realidad, el bioquímico norteamericano Erwin Chargaff y sus colaboradores hallaron, en 1948, la prueba definitiva de que la composición de los ácidos nucleicos era más complicada de lo que se había supuesto. Sus análisis mostraron que las proporciones de las mismas variaban en los diferentes ácidos nucleicos. Todo parecía revelar que las cuatro purinas y pirimidinas se hallaban distribuidas al azar a lo largo de la columna vertebral del ADN de manera similar a como las cadenas laterales de los aminoácidos se hallan dispuestas a lo largo de la columna vertebral peptídica. Pero, al parecer, ciertos hechos se repetían con regularidad. En cualquier molécula de ADN dada, el número total de purinas parecía ser siempre igual al número total de pirimidinas. Además, el número de adeninas (una purina) era siempre igual al número de timinas (una pirimidina), en tanto que el número de guaninas (la otra purina) siempre era idéntico al de citosinas (la otra pirimidina).

Podríamos simbolizar la adenina con una A, la guanina con una G, la timina con una T y la citosina con una C. En tal caso, las purinas serían A + G y las pirimidinas T + C. Los resultados obtenidos por lo que respecta a la composición de cualquier molécula dada de ADN podrían resumirse de la manera siguiente:

$$\mathbf{A} = \mathbf{T}$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{C}$$

$$\mathbf{A} + \mathbf{G} = \mathbf{T} + \mathbf{C}$$

También se apreciaron características más generales que aparecían con regularidad. Ya en el año 1938, Astbury había señalado que los ácidos nucleicos difractaban los rayos X, lo que constituía un hecho positivo en favor de la existencia de regularidades estructurales en la molécula. El bioquímico británico de origen neocelandés, Maurice Hugh Frederick Wilkins, calculó que estas regularidades se repetían a intervalos considerablemente mayores que la distancia de un nucleótido a otro. Una conclusión lógica era que la molécula de ácido nucleico adoptaba la forma de una hélice, con las espirales de la hélice formando la unidad de repetición apreciada mediante los rayos X. Esta hipótesis era sumamente atractiva debido a que Linus Pauling demostró por aquel entonces la estructura helicoidal de ciertas moléculas proteicas.

En 1953, el físico inglés Francis Harry Compton Crick y sus colaboradores, el bioquímico norteamericano (y, al mismo tiempo, «niño prodigo») James Dewey Watson, reunieron toda la información disponible y elaboraron un modelo revolucionario de la molécula del ácido nucleico -un modelo que se representó no simplemente como una hélice, sino (y éste era el punto clave) como una hélice doble- dos cuerpos de azúcar-fosfato, que arrollaban de manera similar a una escala en espiral con dos vías de ascensión, dispuestas a lo largo del mismo eje vertical. A partir de cada cadena de azúcar-fosfato emergían las purinas y pirimidinas aproximándose entre sí y formando los peldaños de esta escalera en espiral.

¿Cómo pueden hallarse dispuestas las purinas y pirimidinas a lo largo de estas cadenas paralelas? Para poder ajustar bien una purina con su anillo doble, en un lado siempre debe encarar a una pirimidina, con un solo anillo en el otro, y así constituir una estructura con tres anillos. Dos pirimidinas no se proyectarían a una distancia suficiente como para cubrir la totalidad del espacio entre las cadenas paralelas; en cambio, las dos purinas se superpondrán. Además, una adenina en una cadena siempre se halla encarada a una timina en la otra, y una guanina en una cadena siempre está encarada a una citosina en la otra. De esta forma puede explicarse el hecho que  $A = T$ ,  $G = C$  y  $A + T = G + C$ .

Este «modelo de Watson-Crick» de la estructura del ácido nucleico ha resultado ser extraordinariamente fructífero y útil, y Wilkins, Crick y Watson compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1962 en reconocimiento de su labor.

El modelo de Watson-Crick hace posible, por ejemplo, explicar cómo un cromosoma puede duplicarse a sí mismo en el proceso de la división celular. Consideramos el cromosoma como un haz de moléculas de ADN. Las moléculas pueden primero dividirse por separación de las dos hélices desdoblando la hélice doble; podríamos decir que las dos cadenas se desenrollan. Esto puede tener lugar debido a que las purinas y pirimidinas contrapuestas se mantienen unidas entre sí por enlaces de hidrógeno, lo suficientemente débiles como para ser rotos con facilidad. Cada cadena es una hemimolécula, que puede inducir la síntesis de su propio complemento perdido. Donde se encuentre una timina se enlazará una adenina; donde exista la citosina, se unirá una guanina, y así sucesivamente. Todos los materiales para elaborar las unidades y las enzimas necesarias se hallan, por otra parte, en la célula. La hemimolécula simplemente desempeña el papel de un «modelo» para que las unidades se dispongan en el orden apropiado. Las unidades eventualmente se situarán en los lugares adecuados y permanecerán ahí porque ésta es la disposición más estable.

Resumiendo, por lo tanto, cada hemimolécula induce la formación de su propio complemento, manteniéndose la unidad mediante enlaces de hidrógeno. De este modo, se sintetiza de nuevo la molécula total de ADN en su forma de hélice doble, y las dos hemimoléculas en las que se había dividido la molécula original forman así dos moléculas donde antes sólo existía una. Tal proceso, realizado en toda la longitud del ADN a lo largo de un cromosoma, creará dos cromosomas que son exactamente iguales y copias perfectas del cromosoma madre original. En ocasiones algo no se produce de un modo correcto: el impacto de una partícula subatómica o de una radiación de elevada energía, o también la intervención de ciertas sustancias químicas, puede determinar una imperfección de un lugar u otro del nuevo cromosoma. El resultado es una mutación.

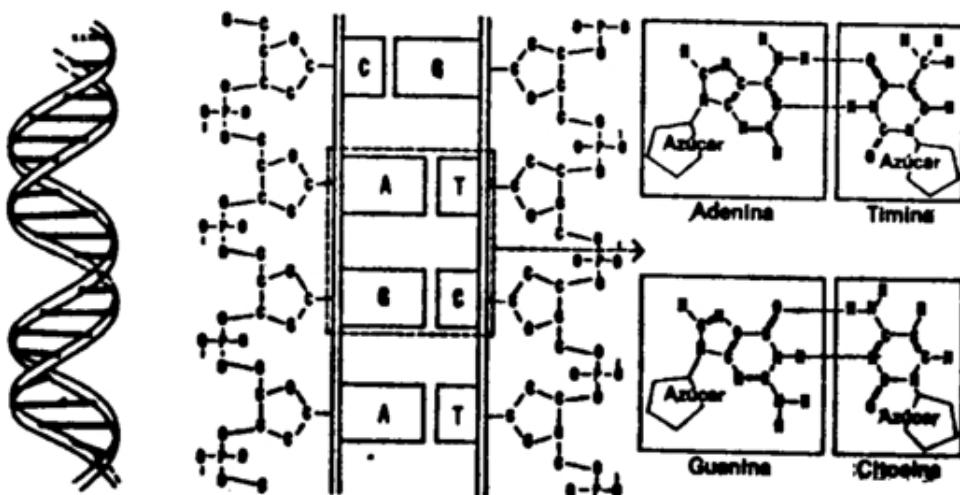
Se han ido acumulando pruebas en favor de este mecanismo de replicación. Los estudios con isótopos radiactivos, donde se emplea nitrógeno pesado para marcar a los cromosomas y se sigue el destino del material marcado durante la división

celular, tienden a corroborar la teoría. Además, se han identificado algunas de las enzimas importantes implicadas en el proceso de replicación.

En 1955, el bioquímico español Severo Ochoa aisló a partir de una bacteria (*Azto bacter vinelandii*) una enzima que era capaz de catalizar la formación del ADN a partir de los nucleótidos. En 1956, un discípulo de Ochoa, Arthur Kornberg, aisló otra enzima (a partir de la bacteria *Escherichia coli*), que catalizaba la formación del ADN a partir de nucleótidos, y Kornberg hizo lo mismo con el ADN. (Los dos investigadores compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1959.) Kornberg también mostró que su enzima, en presencia de una pequeña cantidad del ADN natural que servía como molde, podía catalizar la formación de una molécula que parecía ser idéntica al ADN natural.

En 1965, Sol Spiegelman, de la Universidad de Illinois, utilizó el ARN de un virus vivo (la más elemental de las cosas vivientes) y produjo moléculas adicionales de esa especie. Puesto que estas moléculas adicionales poseyeron las propiedades esenciales del virus, aquello fue lo más parecido hasta entonces a la creación de vida mediante el tubo de ensayo. En 1967, Kornberg y otros lo imitaron, utilizando el ADN de un virus vivo como módulo.

La cantidad de ADN asociada a las manifestaciones más elementales de la vida es mínima -una simple molécula en un virus- y aún se la puede empequeñecer. En 1967, Spiegelman indujo al ácido nucleico de un virus a replicar y seleccionar muestras a intervalos cada vez más breves, a medida que se producían las réplicas. Por ese medio contó con determinadas moléculas que le permitieron dar fin al trabajo de forma asombrosamente rápida..., porque eran más pequeñas que las normales. Lo cierto fue que redujo el virus a una sexta parte del tamaño normal y multiplicó por quince su capacidad para la réplica.



*Modelo de la molécula de ácido nucleico. El dibujo a la izquierda muestra la doble hélice; en el centro se muestra con mayor detalle una porción de ella (omitiendo los átomos de hidrógeno); a la derecha se representan las combinaciones de nucleótidos.*

Aunque el ADN es el que replica en las células, muchos de los virus más simples (subcelulares) contienen solamente ARN. Las moléculas ARN, en doble hilera, replican en esos virus. El ARN de las células forma una sola hilera y no replica.

Sin embargo, la estructura de una sola hilera y la réplica no se excluyen mutuamente. El biofísico norteamericano Robert Louis Sinsheimer descubrió un rastro de virus que contenía ADN formando una sola hilera. La molécula ADN tendría que replicar por sí misma, pero, ¿cómo lo haría con una sola hilera? La respuesta no fue difícil. La cadena simple induciría la producción de su propio complemento y éste induciría después la producción del «complemento del complemento», es decir, una copia de la cadena original.

Es evidente que la disposición en una sola cadena es menos eficiente que la disposición en cadena doble (motivo por el cual probablemente la primera existe sólo en ciertos virus muy simples, y la última en todas las restantes criaturas vivientes). En efecto, en primer lugar, una cadena sencilla debe replicarse a sí misma en dos fases sucesivas, mientras que la cadena doble lo hace en una sola fase. Segundo, ahora parece ser que sólo una de las cadenas de la molécula de ADN es la estructura operante, el borde cortante de la molécula, por así decirlo. Su complemento puede imaginarse como una vaina protectora del borde cortante. La

cadena doble representa el borde cortante protegido por la vaina, excepto cuando aquél está realizando su función; la cadena simple es el borde cortante en todo momento expuesto y sometido a un posible accidente que lo haga romo.

Sin embargo, la replicación simplemente determina la formación de una molécula de ADN. ¿Cómo realiza su trabajo, cuál es el de determinar la síntesis de una enzima específica, es decir, de una molécula proteica específica? Para formar una proteína, la molécula de ADN tiene que determinar la disposición de los aminoácidos en un cierto orden en una molécula constituida por cientos o miles de unidades. Para cada posición debe elegir el aminoácido correcto de entre, aproximadamente, 20 aminoácidos distintos. Si hubiera 20 unidades correspondientes en la molécula de ADN, el problema sería fácil. Pero el ADN está constituido por sólo cuatro sillares distintos: los cuatro nucleótidos. Reflexionando a este respecto, el astrónomo George Gamow sugirió en 1954 que los nucleótidos, en diversas combinaciones, pueden usarse como un código «genético» (de manera similar a como el punto y el guión en la clave Morse pueden combinarse de diversas maneras para representar las letras del alfabeto, los números, etc.).

Si se toman los cuatro nucleótidos distintos (A, G, C, T), de dos en dos, existirán  $4 \times 4$ , ó 16 posibles combinaciones (AA, AG, AC, AT, GA, GG, GC, GT, CA, CG, CC, CT, TA, TG, TC y TT). Éstas no son suficientes. Si se toman de tres en tres, existirán  $4 \times 4 \times 4$ , ó 64 combinaciones distintas, más que suficientes. (El lector puede distraerse anotando las diferentes combinaciones y viendo si puede hallar la 65.<sup>a</sup>) Parece como si cada diferente «terceto de nucleótidos» representara un aminoácido particular. En vista del gran número de diferentes tercetos posibles, puede ocurrir muy bien que dos, o aún tres, diferentes tercetos representen un aminoácido particular. En este caso, la clase venética sería «degenerada», según la terminología de los criptógrafos.

Esto plantea dos problemas fundamentales: ¿Qué terceto (o tercetos) corresponde a cada aminoácido? ¿Y de qué modo la información del terceto (que fue encerrada cuidadosamente en el núcleo, allí donde sólo se hallará el ADN) alcanza los lugares de formación de enzimas que se encuentran en el citoplasma? Abordemos primeramente el segundo problema y consideremos las sospechas que han recaído sobre el ARN como posible sustancia transmisora de la información. Su estructura

es muy similar a la del ADN, con diferencias que no afectan a la clave genética. El ARN tiene ribosa en lugar de desoxirribosa (un átomo de oxígeno más por nucleótido) y uracilo en lugar de timina (un grupo metílico, CH<sub>3</sub>, menos por nucleótido). Además, el ARN se halla presente principalmente en el citoplasma, pero también, en una pequeña proporción, en los propios cromosomas.

No fue difícil ver, y posteriormente demostrar, lo que ocurría en realidad. Cuando las dos cadenas enrolladas de la molécula de ADN se desenrollan, una de estas cadenas (siempre la misma, el borde cortante) replica su estructura, no sobre los nucleótidos que forman una molécula de ADN, sino sobre aquellos que forman una molécula de ARN. En este caso, la adenina de la cadena de ADN no se unirá a los nucleótidos de la timina, sino, por el contrario, a los nucleótidos del uracilo. La molécula de ARN resultante, que transporta la clave genética impresa sobre su estructura nucleotídica, puede luego abandonar el núcleo y penetrar en el citoplasma.

Ya que transmite el «mensaje» del ADN, ha sido de nominado «ARN-mensajero» o simplemente «mARN».

El bioquímico rumano George Emil Paladeo gracias a una cuidadosa investigación con el microscopio electrónico, demostró, en 1956, que el lugar de producción de enzimas en el citoplasma eran unas minúsculas partículas, ricas en ARN y por lo tanto denominadas «ribosomas». En una célula bacteriana hay 15.000 ribosomas, quizá diez veces más que en una célula de mamífero. Son las más pequeñas de las partículas subcelulares u «orgánulas». Se pudo determinar pronto que el ARN mensajero, que transporta la clave genética en su estructura, se dirige hacia los ribosomas y se sitúa en uno o más de ellos; se descubrió asimismo que la síntesis de la proteína se realiza en los ribosomas.

La siguiente etapa fue salvada por el bioquímico norteamericano Mahlon Busch Hoagland, quien investigó activamente el problema del mARN; demostró que en el citoplasma existía una variedad de pequeñas moléculas de ARN, que podían denominarse «ARN-soluble» o «sARN», debido a que sus pequeñas dimensiones les permitían hallarse libremente disueltas en el líquido citoplasmático.

En un extremo de cada molécula sARN había, un terceto especial de nucleótidos que se correspondía exactamente con otro terceto complementario en algún lugar de la

cadena mARN. Es decir, si el terceto sARN estaba compuesto por AGC se ajustaría firme y exclusivamente al terceto UCG de la mARN. En el otro extremo de la molécula sARN había un punto donde ésta se combinaría con un aminoácido específico, y también exclusivamente. Así, pues, en cada molécula sARN el terceto de un extremo comportaba un aminoácido específico en el otro. Por consiguiente un terceto complementario en la mARN significaba que sólo se adheriría allí una determinada molécula sARN portadora de cierta molécula de aminoácidos. Un número muy elevado de moléculas sARN se adherirían consecutivamente en toda la línea a los tercetos constitutivos de la estructura mARN (tercetos que se habían moldeado justamente en la molécula ADN de un determinado gen). Entonces, una vez alineados adecuadamente todos los aminoácidos, se les podría acoplar con facilidad para formar una molécula de enzima.

Como quiera que la información transmitida desde la mensajera ARN es transferible por ese conducto a la molécula proteínica de la enzima, se ha dado en llamarla «transferencia-ARN», denominación que se ha generalizado hoy día.

En 1964, un equipo dirigido por el bioquímico norteamericano Robert W. Holley analizó minuciosamente la molécula «transferencia-ARN» de la alanina (la transferencia-ARN que se adhiere a la alanina, raíz de diversos aminoácidos). Se empleó el método Sanger, es decir, de integración de la molécula en pequeños fragmentos mediante las apropiadas enzimas, para analizar seguidamente esos fragmentos y deducir cómo encajaban unos con otros. Se averiguó que la transferencia-ARN de la alanina -el primer ácido nucleico de formación natural que se analizó totalmente- está constituido por una cadena de 77 nucleótidos. Entre éstos no figuran solamente los cuatro nucleótidos característicos del ARN (A, G, C y U), sino también otros siete estrechamente asociados a ellos.

Al principio se supuso que la cadena lineal de la transferencia-ARN se doblaría por el centro como una horquilla y los dos extremos se entrecruzarían formando una doble hélice. Sin embargo, la estructura de la transferencia-ARN de alanina no se adaptó a ese modelo. En su lugar pareció estar constituido por tres bucles que le daban el aspecto de un trébol trifoliado asimétrico. En años subsiguientes se analizaron concienzudamente otras moléculas de transferencia-ARN y todas ellas parecieron tener la misma estructura de trébol trifoliado. Como recompensa por su trabajo,

Holley recibió una participación en el premio Nobel de Medicina y Fisiología el año 1968.

Por ese medio la estructura de un gen controla la síntesis de una estructura específica. Queda todavía mucho por hacer, pues los genes no siempre organizan la producción de enzimas con carácter continuo e intensivo.

Puede ser que el gen haga una labor eficiente durante algún tiempo y luego aminore el ritmo o incluso permanezca inactivo. Algunas células fabrican proteína a gran velocidad y cuando alcanzan su capacidad máxima combinan unos 15 millones de aminoácidos por cromosoma cada minuto; otras lo hacen lentamente, y aún hay otras que apenas trabajan; sin embargo, todas las células de un organismo determinado tienen la misma organización génica. Por añadidura, cada tipo de células en el cuerpo está sumamente especializado, con funciones y comportamiento característicos. Una célula individual puede sintetizar una proteína determinada con gran rapidez unas veces y pausadamente otras. Pero, por otro lado, todas ellas presentan la misma organización génica en cualquier momento.

#### Código Genético<sup>6</sup>

Primera posición		Segunda posición		Tercera posición	
		U	C	A	G
U	Fe	Ser	Tir	Cis	U
	Fe	Ser	Tir	Cis	C
	Leu	Ser	(«full stop» normal)	»«full stop»	A
	Leu	Ser	(«full stop» menos corriente)	Trip	G
C	Leu	Pro	His	Arg	U
	Leu	Pro	His	Arg	C

<sup>6</sup> Código genético. En la primera columna de la izquierda están las iniciales de las cuatro bases ARN (uracilo, citosina, adenina, guanina) que representan la primera letra del tercero; la segunda letra se representa por las iniciales de la columna superior, en tanto que la tercera aunque no menos importante letra aparece en la columna final de la derecha. Por ejemplo, la tirosina (Tir) se codifica tanto como UAU o UAC. Los aminoácidos codificados por cada terceto se abrevian del modo siguiente: Fe, fenilalanina; Leu, leucina; Ileu, isoleucina; Met, metionina, Val, valina; Ser, serina; Pro, prolina; Tre, treonina; Ala, alanina; Tir, tirosina; His, histidina; Glun, glutamina; Aspn, asparagina; lis, lisina; asp, ácido aspártico; Glu, ácido glutámico; Cis, cisteína; Trip, triptófano; Arg, arginina; Gli, glicina.

	Leu	Pro	Glun	Arg	A
	Leu	Pro	Glun	Arg	G
A	Ileu	Tre	Aspn	Ser	U
	Ileu	Tre	Aspn	Ser	C
	Ileu?	Tre	Lis	Arg	A
	Met	Tre	Lis	Arg	G
	(letra mayúscula )				
G	Val	Ala	Asp	Gli	U
	Val	Ala	Asp	Gli	C
	Val	Ala	Glu	Gli	A
	Val	Ala	Glu	Gli	G
	(letra mayúscula )				

Es evidente que las células tienen métodos para interceptar u abrir paso a las moléculas ADN de los cromosomas. Mediante ese esquema de interceptación y desobstrucción, células diferentes pero con idénticos modelos génicos pueden producir distintas combinaciones de proteínas, mientras que una célula particular con un modelo genético inalterable produce combinaciones distintas muy raras veces. En 1961, Jacob y Monod opinaron que cada gen tiene su propio represor, cifrado por un «gen regulador». Este represor -dependiente de su geometría que puede alterarse dentro de la célula según las circunstancias- interceptará o dará paso libre al gen. En 1967 se consiguió aislar ese represor y se descubrió que era una pequeña proteína. Jacob y Monod, junto con un colaborador, André Michael Lwoff, recibieron por su trabajo el premio Nobel de Medicina y Fisiología el año 1965. Ahora bien, la afluencia de información no sigue una dirección única, es decir, desde el gen a la enzima. Hay también una «realimentación». Así. Pues, hay un gen que promueve la formación de una enzima, cataliza una reacción y transforma el aminoácido treonina en otro aminoácido, la isoleucina. La presencia de esta

isoleucina sirve por alguna razón desconocida para activar al represor que entonces reprime paulatinamente la acción del mismo gen que ha producido la específica enzima causante de esa presencia. En otras palabras, cuanto más aumenta la concentración de isoleucina menos cantidad se forma; si la concentración disminuye, el gen tendrá paso libre y se formará más isoleucina. La maquinaria química dentro de la célula -genes, represores, enzimas, «productos acabados»- es normalmente compleja y sus interrelaciones muy intrincadas. No parece que sea posible por ahora descubrir rápida y totalmente ese esquema. (Véase página anterior.)

Pero, preguntémonos entretanto acerca de otra cuestión: ¿Con qué aminoácido se corresponde cada terceto? El comienzo de esa respuesta llegó en 1961, gracias al trabajo de los bioquímicos norteamericanos Marshall Warren Nirenberg y J. Heinrich Matthaei. Ambos empezaron utilizando el ácido nucleico sintético, elaborado con arreglo al sistema de Ochoa, es decir, partiendo exclusivamente de los nucleótidos uracilos. Este «ácido poliuridílico» estaba constituido por una larga cadena de...UUUUUUU..., y sólo podía poseer un terceto, el UUU.

Nirenberg y Mattahaei agregaron este ácido poliuridílico a un sistema que contenía varios aminoácidos, enzimas, ribosomas y todos los restantes componentes necesarios para sintetizar las proteínas. De esa mezcla se desprendió una proteína constituida únicamente por el aminoácido fenilalanina, lo cual significó que el UUU equivalía a la fenilalanina. Así se elaboró el primer apartado del «diccionario de los tercetos».

El siguiente paso fue preparar un nucleótido en cuya composición preponderaran los nucleótidos de uridina más una pequeña porción de adenina. Ello significó que, junto con el terceto UUU, podría aparecer ocasionalmente un codón UVA o AUU o UAU. Ochoa y Nirenberg demostraron que, en tal caso, la proteína formada era mayormente fenilalanina, si bien solía contener asimismo leucina, isoleucina y tirosina, es decir, otros tres aminoácidos.

Mediante métodos similares a ése se amplió progresivamente el diccionario. Se comprobó que el código adolecía de cierta redundancia, pues, por ejemplo, GAU y GAC podían representar el ácido aspártico y la glicina estaba representada nada menos que por GUU, GAU, GUC GUA y GUG. Por añadidura, hubieron algunas

puntualizaciones. El terceto AUG no representaba únicamente el aminoácido metionina, sino que al parecer comportaba también el comienzo de una cadena. Era una «letra mayúscula» por así decirlo. Asimismo UAA y UAC marcaban el fin de una cadena: eran «períodos».

En 1967 se completó el diccionario. Nirenberg y su colaborador, el químico americano de origen indio Har Gobind Khorana (así como Holley) fueron galardonados con el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1968.

Las posibles implicaciones de una verdadera comprensión de la clave genética y de la manera como ésta es modificada de un tejido a otro y de una célula a otra, causan vértigos. Probablemente no ha ocurrido nada tan excitante en las ciencias biológicas en todo un siglo.

### **El Origen de la Vida**

Una vez dilucidada la estructura y significación de las moléculas de ácido nucleico, nos encontramos tan próximos a los fundamentos de la vida como en la actualidad nos es posible. Aquí seguramente se halla la sustancia primigenia de la propia vida. Sin el ADN, los organismos vivos no podrían reproducirse, y la vida, tal como la conocemos, no podría haberse iniciado. Todas las sustancias de la materia viva -las enzimas y todas las demás cuya producción es catalizada por las enzimas- dependen en última instancia del ADN. Así, pues, ¿cómo se inició el ADN y la vida? Ésta es una pregunta que la Ciencia siempre ha titubeado en responder. En los últimos años, un libro, titulado precisamente *El origen de la vida*, del bioquímico ruso A. I. Oparin, ha permitido centrar mucho más el problema. El libro fue publicado en la Unión Soviética en 1924, y su traducción inglesa apareció en 1936. En él, el problema del origen de la vida es tratado por vez primera con detalle, a partir de un punto de vista totalmente científico.

La mayor parte de las culturas primitivas humanas desarrollaron mitos sobre la creación de los primeros seres humanos (y algunas veces también de otras formas de vida) por los dioses o los demonios. Sin embargo, la formación de la propia vida fue rara vez considerada como una prerrogativa únicamente divina. Al menos, las formas más inferiores de vida podrían originarse de forma espontánea, a partir de la materia inerte, sin la intervención sobrenatural. Por ejemplo, los insectos y gusanos

podían originarse de la carne en descomposición, las ranas a partir del lodo, los ratones a partir del trigo roído. Esta idea se basaba en la observación del mundo real, pues la carne descompuesta, para elegir el ejemplo más evidente, daba indudablemente origen a cresas. Fue muy natural suponer que dichas cresas se formaban a partir de la carne.

Aristóteles creyó en la existencia de la «generación espontánea». Así lo hicieron también grandes teólogos de la Edad Media, tales como santo Tomás de Aquino. Igualmente abundaron en esta opinión William Harvey e Isaac Newton. Después de todo, la evidencia que se ofrece a nuestros propios ojos es difícil de rechazar.

El primero en poner en tela de juicio esta creencia y someterla a una experimentación fue el médico italiano Francesco Redi. En 1668, decidió comprobar si las cresas realmente se formaban a partir de la carne en descomposición. Colocó fragmentos de carne en una serie de tarros y luego recubrió algunos de ellos con una fina tela, dejando a los restantes totalmente al descubierto. Las cresas se desarrollaron sólo en la carne de los tarros descubiertos, a los que tenían libre acceso las moscas. Redi llegó a la conclusión que las cresas se habían originado a partir de huevos microscópicamente pequeños, depositados sobre la carne por las moscas. Sin las moscas y sus correspondientes huevos, insistió, la carne nunca podría haber producido cresas, independientemente del tiempo que se estuviera descomponiendo y pudriendo.

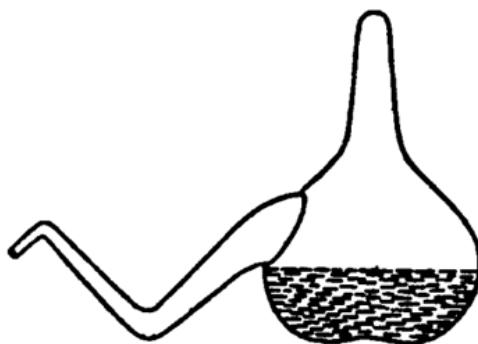
Los experimentadores que siguieron a Redi confirmaron este hecho, y murió así la creencia de que ciertos organismos visibles se originaban a partir de la materia muerta. Pero, cuando se descubrieron los microbios, poco después de la época de Redi, muchos científicos decidieron que al menos estas formas de vida debían de proceder de la materia muerta. Incluso en tarros recubiertos por una fina tela, la carne pronto empezaba a contener numerosos microorganismos. Durante los dos siglos que siguieron a las experiencias de Redi, permaneció aún viva la creencia de la posibilidad de la generación espontánea de los microorganismos.

Fue otro italiano, el naturalista Lazzaro Spallanzani, quien por vez primera puso seriamente en duda esta hipótesis. En 1765, dispuso dos series de recipientes que contenían pan. Una de estas series la mantuvo en contacto con el aire. La otra, a la que había hervido para matar a todos los organismos presentes, fue cerrada, al

objeto de evitar que cualquier organismo que pudiera hallarse suspendido en el aire entrara en contacto con el pan. El pan de los recipientes de la primera serie pronto contuvo microorganismos, pero el pan hervido y aislado permaneció estéril. Esto demostró, para satisfacción de Spallanzani, que incluso la vida microscópica no se originaba a partir de la materia inanimada. Incluso aisló una bacteria y afirmó que se había dividido en dos bacterias.

Los defensores de la generación espontánea no estaban convencidos. Mantenían que la ebullición destruía algún «principio vital» y que éste era el motivo por el cual no se desarrollaba vida microscópica en los recipientes cerrados y hervidos de Spallanzani. Pasteur zanjó la cuestión, al parecer de forma definitiva. Ideó un recipiente con un largo cuello de cisne, que presentaba la forma de una S horizontal. Por la abertura no tapada, el aire podía penetrar en el recipiente, pero no lo podían hacer las partículas de polvo y los microorganismos, ya que el cuello curvado actuaba como una trampa, igual que el sifón de una alcantarilla. Pasteur introdujo algo de pan en el recipiente, conectó el cuello en forma de S, hirvió el caldo hasta emitir vapor (para matar cualquier microorganismo en el cuello, así como en el caldo) y esperó a ver qué ocurría. El caldo permaneció estéril. Así, pues, no existía ningún principio vital en el aire. Aparentemente, la demostración de Pasteur puso fin de forma definitiva a la teoría de la generación espontánea.

Todo esto sembró un germen de intranquilidad en los científicos. Después de todo, ¿cómo se había originado la vida, si no era por creación divina o por generación espontánea? Hacia finales del siglo XIX, algunos teóricos adoptaron la otra posición extrema, al considerar que la vida era eterna. La teoría más popular fue la propuesta por Svante Arrhenius (el químico que había desarrollado el concepto de la ionización). En 1907 publicó el libro titulado *La creación de mundos*, en el cual describía un Universo donde la vida siempre había existido y que emigraba a través del espacio, colonizando continuamente nuevos planetas. Viajaba en forma de esporas, que escapaban de la atmósfera de un planeta por movimiento al azar y luego eran impulsadas a través del espacio por la presión de la luz procedente del sol.



*Matraz de Pasteur para el experimento sobre la generación espontánea.*

En modo alguno debe despreciarse esta presión de la luz como una posible fuerza impulsadora. La existencia de la presión de radiación había sido predicha en primer lugar por Maxwell, a partir de bases teóricas, y, en 1899, fue demostrada experimentalmente por el físico ruso Piotr Nikolaievich Lebedev.

Según Arrhenius, estas esporas se desplazarían impulsadas por la radiación luminosa a través de los espacios interestelares, y lo harían hasta morir o caer en algún planeta, donde podrían dar lugar a vida activa y competir con formas de vida ya existentes, o inocular vida al planeta si éste estaba inhabitado pero era habitable.

A primera vista, esta teoría ofrece un cierto atractivo. Las esporas bacterianas, protegidas por un grueso revestimiento, son muy resistentes al frío y a la deshidratación, y es concebible que se conserven durante un prolongado período de tiempo en el vacío del espacio. Asimismo tienen las dimensiones apropiadas para ser más afectadas por la presión externa de la radiación solar, que por el empuje centrípeto de su gravedad. Pero la sugerencia de Arrhenius se desmoronó ante el obstáculo, que representaba la luz ultravioleta. En 1910, los investigadores observaron que dicha luz mataba rápidamente las esporas bacterianas; y en los espacios interplanetarios la luz ultravioleta del sol es muy intensa (por no hablar de otras radiaciones destructoras, tales como los rayos cósmicos, los rayos X solares, y zonas cargadas de partículas, por ejemplo los cinturones de Van Allen que rodean a la Tierra). Conceiblemente pueden existir en algún lugar esporas que sean resistentes a las radiaciones, pero las esporas constituidas por proteínas y ácido nucleico, tales como las que nosotros conocemos, evidentemente no soportarían la prueba que aquéllas implican.

Desde luego, en 1966, algunos microorganismos particularmente resistentes a bordo de la cápsula *Géminis IX* quedaron expuestos a la radiación del espacio cósmico y sobrevivieron seis horas bajo los demoledores rayos solares no tamizados por una capa atmosférica. Pero aquí no estamos hablando de exposición durante algunas horas, sino durante meses y años.

Podríamos denominar «Atmósfera I» a esa atmósfera altamente hidrogenada. Mediante la fotodisociación se transformaría lentamente en una atmósfera de anhídrido carbónico y nitrógeno o «Atmósfera II». Después de eso se formaría una capa ozónica en la atmósfera superior y el cambio espontáneo subsistiría. ¿Habrá sido posible, entonces, que la vida se haya formado en una u otra de esas atmósferas primigenias? Consideremos, por ejemplo, la Atmósfera II. El anhídrido carbónico es soluble en agua, y mientras la Tierra estuviese bañada por la Atmósfera II el océano sería un inmenso depósito de agua carbónica. La radiación ultravioleta desde el Sol al nivel del mar sería mucho más intensa que hoy día mientras la Atmósfera II abordase las últimas fases de su formación y antes de que la capa ozónica ocupara definitivamente su lugar. Lo que es más, el suelo terrestre tendría entonces una cantidad mucho mayor que ahora de átomos radiactivos. ¿Pudo haber germinado en tales condiciones la materia orgánica?

Según opina H. C. Urey, la vida comenzó con la Atmósfera I. En 1952, Stanley Lloyd Miller, por entonces un universitario recién graduado que trabajaba en los laboratorios Urey, hizo circular agua, amoníaco, metano e hidrógeno a través de una descarga eléctrica (para simular la radiación ultravioleta del Sol). Al cabo de una semana analizó su solución por medio de la cromatografía y descubrió que, aparte de las sustancias elementales sin átomos de nitrógeno, contenía también glicina y alanina, los dos aminoácidos más simples, así como rastros de uno o dos más complicados.

El experimento de Miller fue significativo por muchas razones. En primer lugar, esos compuestos se habían formado con rapidez y en cantidades sorprendentes. Una sexta parte del metano empleado para iniciar la operación había pasado a formar compuestos orgánicos más complejos, aunque desde entonces había transcurrido una semana justa.

Además, las moléculas orgánicas constituidas mediante el experimento de Miller eran del tipo también presente en los tejidos vivientes. El camino seguido por las moléculas simples a medida que ganaban complejidad, parecía apuntar directamente hacia la vida. Esa marcada querencia hacia la vida se manifestó de forma consistente en ulteriores experimentos más elaborados. Apenas se formaron en cantidad apreciable, las moléculas no tomaron ni por un instante la dirección desusada de lo exánime.

Así, por ejemplo. P. H. Abelson asumió el trabajo inicial de Miller, practicando varios experimentos similares con materias básicas integradas por gases y combinaciones diferentes. Resultó que mientras empleó moléculas conteniendo átomos de carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, se formaron los aminoácidos que se encuentran normalmente en las proteínas. Además, las descargas eléctricas tampoco fueron la única fuente eficaz de energía. En 1949, dos científicos alemanes, Wilhelm Groth y H. von Weyssenhoff, proyectaron un experimento en donde se podía utilizar como alternativa la luz ultravioleta; también obtuvieron aminoácidos.

Por si se dudara todavía de que la querencia hacia la vida fuera la línea de menor resistencia, en la última década de los años sesenta se descubrieron moléculas cada vez más complicadas que representaban las primeras fases de esa evolución en las nubes gaseosas del espacio exterior (véase capítulo II)<sup>7</sup>. Bien pudiera ser, pues, que cuando la Tierra empezara a tomar forma con las nubes de polvo y gas, estuviese ya en sus primeras fases la creación de moléculas complejas.

Tal vez la Tierra haya tenido una reserva de aminoácidos en su primera formación. Allá por 1970 se encontraron pruebas a favor de esa hipótesis. El bioquímico cingalés Cyril Ponnamperuma examinó un meteorito que había caído en Australia el 28 de septiembre de 1969. Concienzudos análisis evidenciaron leves vestigios de cinco aminoácidos: glicina, alanina, ácido glutámico, valina y prolina. No hubo actividad óptica en estos aminoácidos, por tanto no se formaron mediante procesos vitales (de ahí que su presencia no fuera el resultado de la contaminación terrestre) sino mediante procesos químicos similares a los que tuvieron lugar en la probeta de Miller.

---

<sup>7</sup> Capítulo II de Introducción a la Ciencia. Volumen I: Ciencias físicas. (N. de Xixoxux)

¿Podrían progresar los químicos en el laboratorio más allá de la fase «aminoácido»? Un método para lograrlo consistiría en comenzar con mayores muestras de materias primas y someterlas a la energía durante períodos más largos. Ello produciría un número creciente de productos cada vez más complicados, pero las mezclas de tales productos adquirirían incesantemente mayor complejidad y ofrecería creciente resistencia al análisis.

En su lugar, los químicos principiaron por unas fases ulteriores, y emplearon como nuevas materias primas los productos formados en experimentos preliminares. Así, por ejemplo, entre los productos de Miller figuró el ácido cianhídrico. En 1961, el bioquímico español Juan Oró agregó ácido cianhídrico a la mezcla básica. Obtuvo una mezcla más rica en aminoácidos e incluso algunos péptidos cortos. Asimismo formó purinas, en particular la adenina, un componente vital de los ácidos nucleicos.

En 1962, Oró empleó formaldehído como una de sus materias primas y produjo ribosa y desoxirribosa, asimismo componentes de los ácidos nucleicos.

En realidad, en 1963, Cyril Ponnamperuma efectuó experiencias similares a aquellas de Miller, utilizando haces de electrones como fuente de energía, y descubrió que se formaba adenina. Junto con Ruth Mariner y Carl Sagan, añadió adenina a una solución de ribosa y, bajo la acción de la luz ultravioleta, se formó «adenosina», una molécula formada de adenina y ribosa unidas entre sí. Si también se hallaba presente el fosfato, éste se unía para formar el trifosfato de adenosina (TFA), que, como se indicó en el capítulo XI, es esencial para los mecanismos de intercambio de energía en los tejidos vivos. En 1965 se consiguió un «dinucleótido», es decir, dos cadenas juntas de nucleótidos. Pueden originarse productos adicionales, si sustancias tales como la cianamida ( $CNNH_2$ ) y el etano ( $CH_3CH_3$ ) -sustancias que pueden muy bien haberse hallado presentes en la era primordial- se añaden a las mezclas empleadas por los diversos experimentadores en este campo. Así, pues, no existe realmente un problema, ya que las modificaciones químicas y físicas normales acaecidas en el océano y la atmósfera primordiales pueden haber actuado de tal modo que se elaboraran proteínas y ácidos nucleicos.

Cualquier compuesto formado en el océano sin vida tendería a permanecer en él y a acumularse. No existían organismos grandes o pequeños, que los consumieran o

causaran su descomposición. Además, en la atmósfera original no existía oxígeno libre que oxidara o degradara las moléculas. Los únicos factores importantes que tendían a degradar las moléculas complejas habrían sido las muy intensas radiaciones ultravioleta y de origen radiactivo que las generaron. Pero las corrientes oceánicas podrían haber transportado gran parte del material a un puerto seguro, las profundidades medias en el mar, lejos de la superficie irradiada por los rayos ultravioleta y del suelo oceánico radiactivo. Además, Ponnamperuma y sus colaboradores han calculado que casi el 1 % del océano original puede haber estado constituido por esos compuestos orgánicos formados. Si así fuera, esto representaría una masa de más de mil billones de toneladas. Evidentemente, ésta es una cantidad importante para que las fuerzas naturales puedan operar en ella, y en tal enorme masa incluso sustancias de la máxima complejidad posible podrían haber sido elaboradas en un período de tiempo no demasiado largo (particularmente considerando que, para este fin, se dispone de dos mil millones de años). Por lo tanto, no existe una barrera lógica que impida suponer además que de los compuestos simples en el océano y la atmósfera primordiales surgieron con el tiempo, a concentraciones cada vez mayores, los aminoácidos más complicados, así como azúcares simples; aquellos aminoácidos se combinaron para formar péptidos; aquellas purinas, pirimidinas, azúcares y fosfato se combinaron para formar nucleótidos; y que, gradualmente, con el transcurso del tiempo, se crearon proteínas y ácidos nucleicos. Luego llegó el momento en que se alcanzó la fase decisiva: la formación, a través de una serie de combinaciones casuales, de una molécula de ácido nucleico capaz de inducir una replicación. Ese instante jalonó el comienzo de la vida.

Así, pues, un período de «evolución química» precedió a la evolución de la propia vida.

Al parecer, una simple molécula viva puede haber sido suficiente para iniciar la vida y dar origen a toda la amplia variedad de seres vivos, del mismo modo como una célula fertilizada puede dar origen a un organismo enormemente complejo. En la «sopa» orgánica que constituyó el océano en aquel entonces, las primeras moléculas vivas pudieron haber dado lugar por replicación a miles de millones de moléculas similares a ellas mismas en un breve período de tiempo. Mutaciones

ocasionales pudieron crear formas ligeramente modificadas de la molécula, y aquellas que de algún modo fueron más eficaces que las restantes debieron multiplicarse a expensas de sus vecinas y remplazar a las formas «antiguas». Si un grupo fue más eficiente en el agua caliente y otro en el agua fría, se debieron originar dos variedades, cada una limitada al ambiente al que se adaptaba mejor. De este modo, debió ponerse en movimiento la «evolución orgánica».

Aún cuando al principio existieron independientemente varias moléculas vivas, es muy probable que la más eficiente desplazara a las otras, de tal modo que muy bien pueda haber ocurrido que la vida actual proceda de una única molécula original. A pesar de la presencia y gran diversidad de seres vivos, todos ellos se ajustan al mismo plan básico. Sus células poseen un metabolismo muy similar. Además es altamente significativo que las proteínas de todos los seres vivos estén constituidas por L-aminoácidos, en vez de por D-aminoácidos. Es posible que la nucleoproteína original, a partir de la que deriva toda la vida, estuviera casualmente constituida por L-aminoácidos, y dado que los D no podían asociarse con los L para formar una cadena estable, lo que comenzó por casualidad persistió por replicación hasta alcanzar una absoluta universalidad. (Esto implica que los D-aminoácidos se hallan ausentes en la Naturaleza. Existen en las paredes celulares de las bacterias y en algunos compuestos antibióticos. Sin embargo, éstos son casos realmente excepcionales.) Desde luego, el paso desde una molécula viviente al tipo de vida que conocemos hoy, es todavía inmenso. Exceptuando los virus, toda la vida está estructurada con células, y una célula, por muy pequeña que pueda parecer a escala humana, es enormemente compleja tanto por su estructura como por sus relaciones recíprocas. ¿Cuál fue el principio de esto? Las investigaciones del bioquímico norteamericano Sidney W. Fox han arrojado bastante luz sobre el problema planteado por el origen de las células. A él le parecía que la Tierra primigenia debió haber estado muy caldeada y que la energía del calor pudo haber sido suficiente para formar compuestos complejos a partir de los más simples. Deseando demostrarlo, Fox emprendió un experimento en 1958: calentó una mezcla de aminoácidos y observó que todos ellos formaban largas cadenas semejantes a las de las moléculas proteínicas. Las enzimas que engullían las

proteínas ordinarias hicieron lo mismo con aquellos «proteinoides» y, por tanto, se los pudo utilizar como alimento de bacterias.

Lo más sorprendente fue esto: cuando Fox disolvió los proteinoides en agua caliente y dejó enfriar la solución, descubrió que todos ellos se agrupaban en diminutas «microsferas» cuyo tamaño era aproximadamente el de una bacteria pequeña. Aunque dichas microsferas no vivían, tal como se entiende usualmente este concepto, se comportaban igual que las células, al menos en ciertos aspectos (por ejemplo, las rodeaba una especie de membrana). Agregando determinados elementos químicos a la solución, Fox logró que las microsferas se hincharan y contrajeran tal como lo hacen las células ordinarias. Las microsferas echaron brotes que a veces parecieron crecer para romperse luego. También se separaron, se dividieron en dos, y se apiñaron formando cadenas.

Quizás en tiempos primarios esos minúsculos agregados de materias, sin vida propiamente dicha, constituyeran diversas variedades. Algunas serían especialmente ricas en ADN y excelentes para la réplica, aunque sólo tendrían una capacidad moderada para almacenar energía. Otros agregados manipularían bien la energía, pero darían réplicas tibias. A su debido tiempo, agrupaciones de tales agregados cooperarían entre sí, cada cual supliendo las deficiencias del otro hasta formar la célula moderna, un elemento mucho más eficiente que cualquiera de sus partes. Esa célula moderna tendría ya núcleo -rico en ADN, pero incapaz de manejar por sí solo el oxígeno- y numerosos mitocondrios con una notable disposición para manipular el oxígeno aunque incapaces de reproducirse en ausencia del núcleo. (Los mitocondrios pueden haber sido otrora entidades independientes, como lo demuestra el hecho de que poseen todavía pequeñas porciones de ADN.) Durante la existencia de las Atmósferas I y II, las formas primitivas de vida pudieron existir solamente a fuerza de desintegrar sustancias químicas complejas en otras más simples y almacenar la energía desarrollada. Las sustancias complejas se reconstruyeron gracias a los efectos de la radiación ultravioleta solar. Una vez se formó totalmente la Atmósfera II y la capa ozónica ocupó el lugar asignado, se presentó el peligro de la inanición, pues entonces dio fin el suministro de radiación ultravioleta.

Sin embargo, por aquella época se formaron algunos agregados similares a los mitocondrios que contenían clorofila, la antecesora del moderno cloroplasto. En 1966, los bioquímicos canadienses G. W. Hodson y B. L. Baker empezaron a trabajar con pirrol y paraformaldehído (los cuales se pueden formar empleando sustancias todavía más simples, como las utilizadas en los experimentos del tipo Miller) y demostraron que se formaban anillos de porfirina -la estructura básica de la clorofila- tras un mero caldeamiento suave de tres horas.

El ineficaz empleo de la luz visible por los primitivos agregados clorofílicos debe de haber sido incluso preferible al procedimiento de sistemas no clorofílicos durante el período formativo de la capa ozónica. La luz visible podría atravesar fácilmente el ozono, y su deficiente energía (comparada con la ultravioleta) bastaría para activar el sistema clorofílico.

Los primeros organismos que consumieron clorofila no habrán sido probablemente más complicados que los cloroplastos individuales de nuestros días. En realidad, un grupo de organismos unicelulares y fotosintetizadores denominados «algas verdiazules» cuenta con dos mil especies (aunque no todos sean verdiazules, sí lo fueron los primeros sometidos a estudio). Éstos son células muy simples, más bien se diría bacterias por su estructura si no contuvieran clorofila. Las algas verdiazules pueden haber sido los descendientes más elementales del cloroplasto original; por otra parte, las bacterias lo habrán sido de los cloroplastos que perdieron su clorofila y tendieron al parasitismo o se nutrieron de los tejidos muertos y sus componentes. Cuando los cloroplastos se multiplicaron en los antiguos mares, el anhídrido carbónico se consumió gradualmente y el oxígeno molecular ocupó su lugar. Entonces se formó nuestra atmósfera, la Atmósfera III. Las células vegetales ganaron progresivamente eficiencia, cada una llegó a contener numerosos cloroplastos. Al propio tiempo, las células elaboradas sin clorofila no podrían haber existido sobre la base precedente, pues las células vegetales arrebataron a los océanos todas sus reservas alimenticias y éstas ya no se formaron más excepto dentro de dichas células. No obstante, las células sin clorofila pero con un elaborado equipo mitocondrial capaz de manejar eficientemente células complejas y almacenar la energía producida por su disgregación, pudieron haber vivido ingiriendo las células vegetales y despojando las moléculas que estas últimas habían construido

laboriosamente. Así se originó la célula animal del presente día. A su debido tiempo los organismos adquirieron suficiente complejidad para dejar los vestigios fósiles (vegetales y animales) que conocemos actualmente.

Entretanto, el medio ambiente terrestre ha cambiado de forma radical, desde el punto de vista de la creación de nueva vida. La vida ya no puede originarse y desarrollarse merced a un proceso de evolución puramente química. Por un simple hecho, las formas de energía que la hicieron surgir en un principio -la energía de las radiaciones ultravioleta y de la radiactividad- han cesado prácticamente.

Por otro lado, las formas de vida bien establecidas consumirían con gran rapidez cualquier molécula orgánica que se originara de forma espontánea. Por estas dos razones no existe virtualmente la posibilidad de un resurgimiento independiente de lo inanimado en lo animado (salvo por alguna futura intervención del ser humano, si llega alguna vez a descubrir el procedimiento). Hoy en día la generación espontánea es tan improbable, que puede ser considerada como básicamente imposible.

### **La Vida en Otros Mundos**

Si se acepta el punto de vista de que la vida se originó simplemente como expresión de las leyes físicas y químicas, se deduce que con toda probabilidad la vida no se halla limitada al planeta Tierra. ¿Cuáles son, por tanto, las posibilidades de vida en el Universo? Comenzando por los lugares más próximos a casa podemos eliminar la Luna con absoluta tranquilidad porque allí falta el aire o el agua de modo perceptible. Se ha especulado con la posibilidad de que existan formas muy primitivas de vida en algunas grietas profundas donde tal vez sean concebibles las huellas de aire y agua. El astrónomo británico V. A. Firsoff ha alegado en su libro *Strange World of the Moon* que bajo la superficie lunar puede haber agua y que los gases absorbidos sobre la superficie cubierta de polvo pueden originar una «atmósfera» muy tenue que quizás sustentará una vida más o menos exótica. Urey adujo que el bombardeo meteórico de una Tierra primigenia pudo haber salpicado con agua la Luna, dándole temporalmente lagos y corrientes fluviales. Ciertamente las fotografías lunares del *Lunar Orbiter* han mostrado señales que parecen a veces cuencas de antiguos ríos.

Sin embargo, las rocas traídas desde la Luna por las sucesivas expediciones a nuestro satélite, iniciada en 1969, han mostrado una ausencia absoluta de agua y materia orgánica. Desde luego, son simples rocas de superficie y tal vez resultara distinto si se recogieran algunas subyacentes a varios metros bajo esa superficie. Pese a todo, las pruebas en nuestro poder parecen indicar que no hay vida de ninguna clase -ni la más elemental siquiera- en la Luna.

Venus parece un candidato mejor situado para la vida, aunque sólo sea por su masa (pues, en cuestión de tamaño, se asemeja mucho a la Tierra) y por el hecho irrefutable de que posee una atmósfera, e incluso más densa que la nuestra. En 1959, Venus eclipsó a la brillante estrella Regulus. Gracias a ello se pudo observar cómo atravesaba esa viva luz de Regulus la atmósfera venusiana, y adquirir así nuevos conocimientos referentes a su profundidad y densidad. El astrónomo norteamericano Donald Howard Menzel recogió suficientes datos para poder anunciar que el diámetro del cuerpo sólido de Venus medía 6.057,6 km, es decir, 112 menos que el más aproximado de los cálculos precedentes.

La atmósfera venusiana parece ser principalmente de anhídrido carbónico. Venus no tiene oxígeno libre perceptible, pero esa falta no representa una barrera infranqueable para la vida. Como ya expliqué anteriormente, la Tierra mantuvo vida probablemente durante infinidad de tiempo antes de poseer oxígeno libre en su atmósfera (aunque, a buen seguro, esa vida sería sumamente primitiva).

Hasta épocas bastante recientes no se descubrió vapor en el aire de Venus, y ello fue un fatal impedimento para la posibilidad de vida allí. A los astrónomos les incomodó sobremanera la imposibilidad de encontrar agua en Venus, pues esa circunstancia les impedía satisfactoriamente la presencia de una envoltura nubosa sobre el planeta. Entonces, en 1959, Charles B. Moore, del laboratorio de la «Arthur D. Little Company», ascendió en un aerostato a 24 km de altura, es decir hasta la estratosfera sobre casi toda la atmósfera terrestre interferente, y tomó fotografías de Venus con un telescopio. Su espectro mostró en la banda infrarroja que la atmósfera externa de Venus contenía tanto vapor de agua como la terrestre.

Sin embargo, las posibilidades de vida en Venus sufrieron otra caída de brúces, y esta vez aparentemente definitiva, por causa de su temperatura superficial. Radioondas procedentes de Venus indicaron que su temperatura de superficie

podría superar largamente el punto de ebullición del agua. Sin embargo, quedó la esperanza de que esas radioondas indicadoras de temperaturas procedieran de la atmósfera externa venusiana y que, por consiguiente la superficie del planeta tuviera una temperatura más soportable.

No obstante, esa esperanza se esfumó en diciembre de 1962 cuando la sonda americana a Venus, el *Mariner II*, se acercó a la posición de Venus en el espacio y escudriñó su superficie buscando fuentes de radioondas. Los resultados de esos análisis demostraron claramente que la superficie venusiana estaba demasiado caliente para conservar un océano. Las nubes retenían todas sus reservas de agua. La temperatura de Venus -que tal vez supere incluso los 500º C a juzgar por las temperaturas de superficie transmitidas desde una sonda soviética en diciembre de 1970- parece eliminar efectivamente toda posibilidad de vida, según la conocemos nosotros. También debemos eliminar a Mercurio, más próximo al Sol que Venus, más pequeño, caliente asimismo y carente de atmósfera.

Sin duda, Marte representa una posibilidad más prometedora. Tiene una atmósfera tenue de anhídrido carbónico y nitrógeno, y parece poseer suficiente agua para formar delgadas capas de hielo (su grosor es, probablemente, de unos 2,5 cm a lo sumo) que se crean y derriten con las estaciones. Las temperaturas marcianas son bajas pero no demasiado para la vida, y posiblemente no más inclemtes que las de la Antártica. Incluso esa temperatura alcanza ocasionalmente unos 27º C muy reconfortantes en el ecuador marciano durante las horas más cálidas del día estival. La posibilidad de vida en Marte ha intrigado al mundo entero durante casi un siglo. En 1877, el astrónomo italiano Giovanni Virginio Schiaparelli detectó unas líneas finas y rectas en la superficie del planeta. Él las denominó «canali». Esta palabra italiana significa «cauces», pero fue traducida erróneamente como canales, lo cual hizo deducir a la gente que aquellas líneas eran canales artificiales, construidos quizá para acarrear agua desde los ventisqueros a otros lugares necesitados de irrigación. El astrónomo norteamericano Percival Lowell abogó enérgicamente por esa interpretación de las marcas; los suplementos dominicales de los periódicos (así como las historias de ciencia ficción) armaron gran revuelo sobre la «evidencia» de vida inteligente en Marte.

Realmente se formularon serias dudas sobre la existencia misma de aquellas señales. Muchos astrónomos no las habían visto jamás pese a sus concienzudas tentativas; otros las habían visto sólo en brevísimos instantes. Había quienes creían en una ilusión óptica ocasionada por el afanoso deseo de ver algo intentando forzar los límites de la visión humana. Sea como fuere, ningún astrónomo cree que Marte pueda mantener formas avanzadas de vida.

Sin embargo, resta la posibilidad de que Marte mantenga formas simples de vida. Por ejemplo, sobre la superficie de Marte se ven grandes manchas que cambian con las estaciones, extendiéndose en el hemisferio donde es verano y contrayéndose en el hemisferio donde reina el invierno. ¿Podría ser esto un signo que indicara la existencia de vida vegetal en una forma simple? Ciertos experimentos de laboratorio han demostrado que algunos líquenes y microorganismos, aún estando adaptados al ambiente terrestre y no al marciano, pueden vivir y medrar bajo temperaturas y en una atmósfera que, según se cree, simulan las del medio ambiente marciano.

Tales esperanzas empezaron también a esfumarse como resultado de la prueba marciana realizada por el *Mariner IV*, lanzado el 28 de noviembre de 1964. Este artefacto pasó en 1965 a 9.654 km de Marte y envió fotografías de su superficie, estas no mostraron canal alguno; pero sí se evidenció por primera vez que la superficie marciana estaba sembrada profusamente de cráteres en forma parecida a la lunar. Se infirió de ello que la atmósfera de Marte no sólo era tenue y desecada hoy día sino que, probablemente, lo habría sido siempre.

Información adicional sobre la superficie marciana obtenida por otro «objeto volador» más alambicado todavía en 1969, sirvió solamente para empeorar aún más las cosas. Aquella atmósfera era incluso más tenue de lo que se había temido, y la temperatura más baja. La temperatura reinante en el polo sur marciano parecía no superar los  $-113^{\circ}$  C, y las «cumbres nevadas» en las que se había confiado tanto para justificar la presencia de agua, estaban formadas probablemente por anhídrido carbónico sólido. Aunque no se puede hablar con certeza hasta tomar contacto con la superficie marciana, hoy parece muy probable que la vida, tal como la conocemos nosotros, no exista en Marte.

Respecto a los demás cuerpos planetarios más allá de Marte (o satélites o planetoides), parece ser que las condiciones son más rigurosas todavía. No

obstante, Carl Sagan ha opinado que la atmósfera de Júpiter debe producir un efecto de invernáculo tan potente que tal vez dé origen a temperaturas moderadas con las cuales pueda haber alguna especie de vida. Esto pareció menos prometedor cuando se averiguó que Júpiter radiaba tres veces más energía que la recibida desde el Sol, lo cual hizo pensar en otra fuente de energía (quizá contracción planetaria), cuya acción elevaría las temperaturas hasta niveles superiores a los supuestos. Ahora bien, esto sigue siendo pura especulación, y a falta de una sonda planetaria en la vecindad de Júpiter, lo mejor es callarse.

Cabe llegar, pues, a la conclusión de que en lo referente al Sistema Solar, la Tierra y únicamente la Tierra parece ser morada de la vida. Pero el Sistema Solar no está solo. ¿Cuáles son las posibilidades de vida en otros espacios del Universo? El número total de estrellas en el Universo conocido se calcula que es por lo menos de 1.000.000.000.000.000.000 (mil trillones). Nuestra propia galaxia contiene más de cien mil millones. Si todas las estrellas se han desarrollado por el mismo tiempo de proceso que aquel que se considera que ha creado nuestro propio Sistema Solar (es decir, la condensación de una gran nube de polvo y gas), entonces es muy probable que ninguna estrella exista de forma solitaria, sino que cada una sea parte de un sistema local que contenga más de un cuerpo celeste. Sabemos que existen muchas estrellas dobles, que giran en torno a un centro común, y se calcula que, al menos, de cada tres estrellas una pertenece a un sistema que contiene dos o más estrellas.

En nuestra opinión, lo que realmente precisamos encontrar es un sistema múltiple en el cual un número de miembros sea demasiado pequeño para generar luz propia y sean planetas más bien que estrellas. Si bien (por el momento) no disponemos de medios para detectar directamente cualquier planeta que se encuentra fuera de nuestro propio sistema solar, incluso en los sistemas estelares más cercanos, podemos no obstante obtener pruebas indirectas de su presencia. Esto se ha efectuado en el Observatorio Sproul del «Swarthmore College» bajo la dirección del Astrónomo holandés-americano Peter van de Kamp.

En 1943, pequeñas irregularidades de una de las integrantes del sistema de estrellas dobles, 61 del Cisne, mostraron que debía de existir un tercer componente, demasiado pequeño para generar luz. Este tercer componente, el 61 del Cisne C,

debe de tener aproximadamente 8 veces la masa de Júpiter y por lo tanto (suponiendo la misma densidad), dos veces su diámetro. En 1960, un planeta de tamaño similar se localizó girando alrededor de la pequeña estrella Lalande 21185 (localizado, al menos, en el sentido de que su existencia era la forma más lógica de explicar las irregularidades en el movimiento de la estrella). En 1963, un detallado estudio de la estrella de Barnard indicó la presencia de un planeta, que sólo tenía una vez y media la masa de Júpiter.

La estrella de Barnard es la segunda más próxima a la nuestra, la Lalande 21185 es la tercera más próxima, y la 61 del Cisne la duodécima más cercana. Que existieran tres sistemas planetarios en íntima proximidad al nuestro sería extraordinariamente poco probable, a menos que dichos sistemas planetarios fueran muy comunes en general. Por supuesto, en las vastas distancias estelares, solo los planetas de mayores dimensiones podrían ser detectados y aún así con dificultad. Donde existen planetas superjovianos, parece muy razonable (e incluso inevitable) suponer que también deben de existir planetas más pequeños.

Pero, aún suponiendo que todas o la mayoría de las estrellas poseen sistemas planetarios, y que muchos de estos planetas son similares a la Tierra en tamaño, debemos saber qué criterios han de satisfacer tales planetas para poder ser habitables. Un científico del espacio, el norteamericano Stephen H. Dole, ha hecho un estudio particular de este problema en su libro *Habitable Planets for Man*, publicado en 1964, y ha llegado a ciertas conclusiones que, aunque especulativas, son razonables.

Señala, en primer lugar, que una estrella debe tener un cierto tamaño para poder poseer un planeta habitable. Cuanto más grande es la estrella, tanto menor es su vida, y, si excede de unas ciertas dimensiones, no vivirá lo suficiente como para permitir que un planeta recorra las prolongadas etapas de su evolución química, antes del desarrollo de formas de vida complejas. Una estrella demasiado pequeña no puede calentar suficientemente a un planeta, a menos que éste se halle situado muy próximo a ella, con lo que sufriría periódicos efectos perjudiciales. Dole llega a la conclusión de que sólo las estrellas de las clases espectrales F2 a K1 son adecuadas para el mantenimiento de planetas con nivel de habitabilidad suficiente para la Humanidad; planetas que puedan ser colonizados (si el viaje entre las

estrellas fuera algún día practicable) sin un esfuerzo excesivo. Existen, según los cálculos de Dole, 17 mil millones de tales estrellas en nuestra galaxia.

Una estrella con estas características podría poseer un planeta habitable o no poseer ninguno. Dole calcula la probabilidad de que una estrella de tamaño adecuado pueda tener un planeta de la masa conveniente y a la distancia correcta, con un apropiado período de rotación y una órbita adecuadamente regular, y, haciendo lo que le parece una razonable estimación, llega a la conclusión de que probablemente hay 600.000.000 de planetas habitables solamente en nuestra galaxia, conteniendo ya cada uno de ellos alguna forma de vida.

Si estos planetas habitables estuvieran más o menos homogéneamente distribuidos por la galaxia, Dole estima que debería existir un planeta habitable por cada 50.000 años-luz cúbicos. Esto significa que el planeta habitable más próximo a nosotros puede distar de la Tierra unos 27 años-luz, y que a unos 100 años-luz de distancia, deben encontrarse también un total de 50 planetas habitables.

Dole cita a continuación 14 estrellas distantes de nosotros a lo sumo 22 años-luz, que pueden poseer planetas habitables y sopesa las probabilidades de que esto pueda ser así en cada caso. Llega a la conclusión de que la mayor probabilidad de planetas habitables se da precisamente en las estrellas más cercanas a nosotros, las dos estrellas similares al Sol del sistema Alfa Centauro, la Alfa Centauro A y la Alfa Centauro B. Según estima Dole, estas dos estrellas compañeras tienen, consideradas en conjunto, una posibilidad entre diez de poseer planetas habitables. La probabilidad total para el conjunto de las 14 estrellas vecinas es de aproximadamente 2 entre 5.

Si consideramos la vida como la consecuencia de las reacciones químicas descritas en el apartado anterior, podemos ver que su desarrollo es inevitable en cualquier planeta similar a la Tierra. Por supuesto, un planeta puede poseer vida y, no obstante, no poseer aún vida inteligente. No tenemos forma de hacer siquiera una conjetura razonable acerca de la probabilidad del desarrollo de la inteligencia sobre un planeta, y en este sentido, Dole, por ejemplo, tiene el buen acierto de no hacer ninguna. Después de todo, nuestra propia Tierra, el único planeta habitable que realmente conocemos y podemos estudiar, existió durante al menos dos mil millones de años con vida, ciertamente, pero sin vida inteligente.

Es posible que las marsopas y algunas otras especies emparentadas con ellas sean inteligentes, pero, por su condición de criaturas marinas, carecen de extremidades y no han podido desarrollar el uso del fuego; en consecuencia, su inteligencia, caso de que exista, no ha podido dirigirse en el sentido de una tecnología desarrollada. Es decir, si sólo consideramos la vida terrestre, entonces hace sólo aproximadamente un millón de años que la Tierra ha sido capaz de albergar una criatura viva con una inteligencia superior a la de un mono.

Además, esto significa que la Tierra ha poseído vida inteligente durante 1/2.000 (como burda aproximación) del tiempo en que ha tenido vida de algún tipo. Si podemos afirmar que, de todos los planetas que contienen vida, uno de cada 2.000 posee vida inteligente, esto representaría que, de los 640 millones de planetas habitables de los que habla Dole, en 320.000 podría darse vida inteligente. Puede muy bien ocurrir que no estemos en absoluto solos en el Universo.

Hasta muy recientemente, esta clase de posibilidad era considerada con seriedad únicamente en las novelas de ciencia ficción. Aquellos de mis lectores que saben que he escrito algunas novelas de este tipo hace algún tiempo, y que pueden tildar mis afirmaciones aquí como excesivamente entusiastas, les puedo asegurar que hoy en día muchos astrónomos aceptan como muy probable la existencia de vida inteligente en otros planetas.

En realidad, los científicos de los Estados Unidos aceptan esta posibilidad con la suficiente seriedad como para haber iniciado una investigación, bajo la dirección de Frank D. Drake, el llamado Proyecto Ozma (cuyo nombre deriva de uno de los libros para niños del Mago de Oz), que se propone registrar posibles señales de radio procedentes de otros mundos. La idea es intentar distinguir algún tipo de regularidad en las ondas de radio que proceden del espacio. Si detectan señales que siguen un cierto orden, distintas a aquellas al azar procedentes de estrellas emisoras de ondas de radio o de materia excitada en el espacio, podría suponerse que tales señales representan mensajes a partir de alguna inteligencia extraterrestre. Por supuesto, aunque tales mensajes fueran recibidos, la comunicación con dicha inteligencia distante constituiría un problema. Los mensajes pueden haber estado mucho tiempo en camino, y una respuesta también precisaría

muchos años para alcanzar a la emisora distante, ya que el planeta potencialmente habitable más próximo se encuentra a una distancia de 4 1/3 años-luz.

Las regiones del firmamento mencionadas en un momento u otro en el curso del Proyecto Ozma incluían las direcciones en las que se encuentran Épsilon de Erídano, Tau de la Ballena. Ómicron-2 de Erídano. Epsilón de Indio, Alfa de Centauro, 70 de Ophiuco y 61 del Cisne. Sin embargo, después de dos meses de resultados negativos, el proyecto fue abandonado.

No obstante, la idea no ha muerto ni mucho menos. A causa de la vastedad del Universo, aún no podemos detectar la evidencia de vida e incluso es posible que nunca lleguemos a hacerlo. De todos modos, precisamente a causa de la vastedad del Universo, es forzoso que exista vida, hasta en forma inteligente, quizás en millones de variantes.

Y si nosotros no conseguimos dar con ellos, los extraterrestres nos encontrarán a nosotros.

## Capítulo 13

### LOS MICROORGANISMOS

#### Bacterias

Antes del siglo XVII, los seres vivientes más pequeños conocidos eran insectos diminutos. Naturalmente, se daba por sentado que no existía organismo alguno más pequeño. Poderes sobrenaturales podían hacer invisibles a los seres vivientes (todas las culturas así lo creían de una u otra forma), pero nadie pensaba, por un instante, que existieran criaturas de tamaño tan pequeño que no pudieran verse.

Si el hombre hubiera llegado siquiera a sospecharlo, acaso se iniciara mucho antes en el uso deliberado de instrumentos de aumento. Incluso los griegos y los romanos sabían ya que objetos de cristal de ciertas formas reflejaban la luz del sol en un punto dado, aumentando el tamaño de los objetos contemplados a través de ellos. Por ejemplo, así ocurría con una esfera de cristal hueca llena de agua. Ptolomeo trató sobre la óptica del espejo ustorio, y escritores árabes, tales como Alhakén, ampliaron sus observaciones en el año 1.000 de la Era Cristiana.

Robert Grosseteste, obispo inglés, filósofo y sagaz científico aficionado, fue el primero en sugerir, a principios del siglo XIII, el uso pacífico de dicho instrumento. Destacó el hecho de que las lentes -así llamadas por tener forma de lentejas- podían ser útiles para aumentar aquellos objetos demasiado pequeños para verlos de forma conveniente. Su discípulo, Roger Bacon, actuando de acuerdo con dicha sugerencia, concibió las gafas para mejorar la visión deficiente.

Al principio tan sólo se hicieron lentes convexos para corregir la vista cansada (hipermetropía). Hasta 1400 no se concibieron lentes cóncavos para corregir la vista corta o miopía. La invención de la imprenta trajo consigo una demanda creciente de gafas, y hacia el siglo XVI la artesanía de las gafas se había convertido en hábil profesión, llegando a adquirir especial calidad en los Países Bajos.

(Benjamín Franklin inventó, en 1760, los lentes bifocales, utilizables tanto para la hipermetropía como para la miopía. En 1827, el astrónomo británico, George Biddell Airy, concibió los primeros lentes para corregir el astigmatismo, que él mismo padecía. Y alrededor de 1888, un médico francés introdujo la idea de las lentes de contacto, que algún día convertirían en más o menos anticuadas las gafas

corrientes.) Pero volvamos a los artesanos holandeses de gafas. Según se cuenta, en 1608, el aprendiz de uno de estos artesanos, llamado Hans Lippershey, se divertía durante uno de sus ratos de ocio contemplando los objetos a través de dos lentes, situados uno detrás de otro. Su asombro fue grande al descubrir que, manteniéndolos algo distanciados entre sí, los objetos lejanos parecían estar al alcance de la mano. El aprendiz apresuróse a comunicar su descubrimiento a su amo, y Lippershey procedió a construir el primer «telescopio» colocando ambos lentes en un tubo para mantener entre ellos la distancia adecuada. El príncipe Mauricio de Nassau, comandante en jefe de los ejércitos holandeses sublevados contra España, al percatarse del valor militar de aquel instrumento se esforzó por mantenerlo en secreto.

Sin embargo, no contaba con Galileo. Habiendo llegado hasta él rumores sobre cristales capaces de acortar las distancias, aunque enterado tan sólo de que ello se lograba con lentes, descubrió rápidamente el principio y construyó su propio telescopio; el de Galileo quedó terminado seis meses después del de Lippershey.

Galileo descubrió asimismo que reajustando las lentes de su telescopio podía aumentar el tamaño de los objetos que se encontraban cerca, por lo cual en realidad era un «microscopio». Durante las décadas siguientes, varios científicos construyeron microscopios. Un naturalista italiano llamado Francesco Stelluti estudió con uno de ellos la anatomía de los insectos; Malpighi descubrió los capilares, y Hooke, las células en el corcho.

Pero la importancia del microscopio no se apreció en todo su valor hasta que Anton van Leeuwenhoek, mercader en la ciudad de Delft, se hiciera cargo de él (véase página 39). Algunas de las lentes de Van Leeuwenhoek aumentaban hasta doscientas veces el tamaño original.

Van Leeuwenhoek examinó todo tipo de objetos en forma absolutamente indiscriminada, describiendo cuanto veía con minucioso detalle en cartas dirigidas a la «Royal Society» de Londres. La democracia de la ciencia se apuntó un triunfo al ser designado el mercader miembro de la hidalga «Royal Society». Antes de morir, el humilde artesano de microscopios de Delft recibió la visita de la reina de Inglaterra y de Pedro *el Grande*, zar de todas las rusias.

A través de sus lentes, Van Leeuwenhoek descubrió los espermatozoides, los hematíes y llegó hasta ver fluir la sangre por los tubos capilares en la cola de un renacuajo, y lo que aún es más importante, fue el primero en contemplar seres vivientes demasiado diminutos para ser observados a simple vista. Descubrió aquellos «animáculos» en 1675, en el agua estancada. Analizó también las diminutas células del fermento y, llegando ya al límite del poder amplificador de sus lentes, logró finalmente, en 1676, divisar los «gérmenes» que hoy conocemos como bacterias.

El microscopio fue perfeccionándose con gran lentitud y hubo de transcurrir siglo y medio antes de poder estudiar con facilidad objetos del tamaño de los gérmenes.

Por ejemplo, hasta 1830 no pudo concebir el óptico inglés Joseph Jackson Lister un «microscopio acromático» capaz de eliminar los anillos de color que limitaban la claridad de la imagen. Lister descubrió que los glóbulos rojos (descubiertos por vez primera como gotas sin forma, por el médico holandés Jan Swammerdam, en 1658) eran discos bicóncavos, semejantes a diminutas rosquillas con hendiduras en lugar del orificio. El microscopio acromático constituyó un gran avance, y en 1878, un físico alemán, Ernst Abbe, inició una serie de perfeccionamientos que dieron como resultado lo que podríamos denominar el moderno microscopio óptico.

Los miembros del nuevo mundo de la vida microscópica fueron recibiendo gradualmente nombres. Los «animáculos» de Van Leeuwenhoek eran en realidad animales que se alimentaban de pequeñas partículas y que se trasladaban mediante pequeños apéndices (flagelos), por finísimas pestañas o por flujo impulsor de protoplasma (seudópodos). A estos animales se les dio el nombre de «protozoos» (de la palabra griega que significa «animales primarios»), y el zoólogo alemán, Karl Theodor Ernst Siebold, los identificó como seres unicelulares.

Los «gérmenes» eran ya otra cosa; mucho más pequeños que los protozoos y más rudimentarios. Aún cuando algunos podían moverse, la mayor parte permanecían inactivos, limitándose a crecer y a multiplicarse. Con la sola excepción de su carencia de clorofila, no acusaban ninguna de las propiedades asociadas con los animales. Por dicha razón, se los clasificaba usualmente entre los hongos, plantas carentes de clorofila y que viven de materias orgánicas. Hoy día, la mayoría de los biólogos muestran tendencia a no considerarlos como planta ni animal, sino que los

clasifican en un sector aparte, totalmente independiente. «Germen» es una denominación capaz de inducir a error. Igual término puede aplicarse a la parte viva de una semilla (por ejemplo el «germen de trigo»), a las células sexuales (germen embrionario), a los órganos embrionarios o, de hecho, a cualquier objeto pequeño que posea potencialidad de vida.

El microscopista danés Otto Frederik Müller consiguió, en 1773, distinguir lo suficientemente bien a aquellos pequeños seres para clasificarlos en dos tipos: «bacilos» (voz latina que significa «pequeños vástagos») y «espirilo» (por su forma en espiral). Con la aparición del microscopio acromático, el cirujano austriaco Theodor Billroth vio variedades aún más pequeñas a las que aplicó el término de «cocos» (del griego «baya»). Fue el botánico alemán, Ferdinand Julius Cohn, quien finalmente aplicó el nombre de «bacterias» (también voz latina que significa pequeño «vástago»).

Pasteur popularizó el término general «microbio» (vida diminuta), para todas aquellas formas de vida microscópica, vegetal, animal y bacterial. Pero pronto fue aplicado dicho vocablo a la bacteria, que por entonces empezaba a adquirir notoriedad. Hoy día, el término general para las formas microscópicas de vida es el de «microorganismo».

Pasteur fue el primero en establecer una conexión definitiva entre los microorganismos y la enfermedad, creando así la moderna ciencia de la «bacteriología» o, para utilizar un término más generalizado, de la «microbiología», y ello tuvo lugar por la preocupación de Pasteur con algo que más bien parecía tratarse de un problema industrial que médico. En la década de 1860, la industria francesa de la seda se estaba arruinando a causa de una epidemia entre los gusanos de seda. Pasteur, que ya salvó a los productores vitivinícolas de Francia, se encontró también enfrentado con aquel problema. Y de nuevo, haciendo inspirado uso del microscopio, como hiciera antes al estudiar los cristales asimétricos y las variedades de las células del fermento, Pasteur descubrió microorganismos que infectaban a los gusanos de seda y a las hojas de morera que les servían de alimento. Recomendó la destrucción de todos los gusanos y hojas infectadas y empezar de nuevo con los gusanos y hojas libres de infección. Se puso en práctica aquella drástica medida con excelentes resultados.

Con tales investigaciones, Pasteur logró algo más que dar nuevo impulso a la sericultura: generalizó sus conclusiones y enunció la «teoría de los gérmenes patógenos», que constituyó, sin duda alguna, uno de los descubrimientos más grandes que jamás se hicieran (y esto, no por un médico, sino por un químico, como estos últimos se complacen en subrayar).



*Tipos de bacterias: coco, A); bacilos, B), y espirilos, C). Cada uno de estos tipos tiene una serie de variedades.*

Antes de Pasteur los médicos poco podían hacer por sus pacientes, a no ser recomendarles descanso, buena alimentación, aires puros y ambiente sano, tratando, ocasionalmente, algunos tipos de emergencias. Todo ello fue ya propugnado por el médico griego Hipócrates («el padre de la Medicina»), 400 años a. de J.C. Fue él quien introdujo el enfoque racional de la Medicina, rechazando las flechas de Apolo y la posesión demoníaca para proclamar que, incluso la epilepsia denominada por entonces la «enfermedad sagrada», no era resultado de sufrir la influencia de algún dios, sino simplemente un trastorno físico y como tal debía ser tratado. Las generaciones posteriores jamás llegaron a olvidar totalmente la lección. No obstante, la Medicina avanzó con sorprendente lentitud durante los dos milenarios siguientes. Los médicos podían incidir forúnculos, soldar huesos rotos y prescribir algunos remedios específicos que eran simplemente producto de la sabiduría del pueblo, tales como la quinina, extraída de la corteza del árbol chinchona (que los

indios peruanos masticaban originalmente para curarse la malaria) y la digital, de la planta llamada dedalera (un viejo remedio de los antiguos herbolarios para estimular el corazón). Aparte de esos escasos tratamientos y de la vacuna contra la viruela (de la que trataré más adelante), muchas de las medicinas y tratamientos administrados por los médicos después de Hipócrates tenderían más bien a incrementar el índice de mortalidad que a reducirlo.

En los dos primeros siglos y medio de la Era de la Ciencia, constituyó un interesante avance el invento, en 1819, del estetoscopio por el médico francés René-Théophile-Hyacinthe Laennec. En su forma original era poco más que un tubo de madera destinado a ayudar al médico a escuchar e interpretar los latidos del corazón, los perfeccionamientos introducidos desde entonces lo han convertido en un instrumento tan característico e indispensable para el médico como lo es la regla de cálculo para un ingeniero.

Por tanto, no es de extrañar que hasta el siglo XIX, incluso los países más civilizados se vieran azotados de forma periódica por plagas, algunas de las cuales ejercieron efecto trascendental en la Historia. La plaga que asolara Atenas, y en la que murió Pericles durante las guerras del Peloponeso, fue el primer paso hacia la ruina final de Grecia. La caída de Roma se inició, probablemente, con las plagas que barrieron el Imperio durante el reinado de Marco Aurelio. En el siglo XIV se calcula que la peste negra mató a una cuarta parte de la población de Europa; esta plaga y la pólvora contribuyeron, juntas, a destruir las estructuras sociales de la Edad Media.

Es evidente que las plagas no terminaron al descubrir Pasteur que las enfermedades infecciosas tenían su origen y difusión en los microorganismos. En la India, aún es endémico el cólera; y otros países insuficientemente desarrollados se encuentran intensamente sometidos a epidemias. Las enfermedades siguen constituyendo uno de los mayores peligros en épocas de guerra. De vez en cuando, se alzan nuevos organismos virulentos y se propagan por el mundo; desde luego, la gripe pandémica de 1918 mató alrededor de unos quince millones de personas, la cifra más alta de mortandad alcanzada por cualquier otra plaga en la historia de la Humanidad y casi el doble de los que murieron durante la Primera Guerra Mundial recién terminada.

Sin embargo, el descubrimiento de Pasteur marcó un hito de trascendental importancia. El índice de mortalidad empezó a decrecer de forma sensible en Europa y los Estados Unidos, aumentando las esperanzas de supervivencia. Gracias al estudio científico de las enfermedades y de su tratamiento, que se iniciara con Pasteur, hombres y mujeres, en las regiones más avanzadas del mundo, pueden esperar ahora un promedio de vida de setenta años, en tanto que antes de Pasteur ese promedio era únicamente de cuarenta años en las condiciones más favorables y acaso tan sólo de veinticinco años cuando esas condiciones eran desfavorables. Desde la Segunda Guerra Mundial, las probabilidades de longevidad han ido ascendiendo de forma rápida incluso en las regiones menos adelantadas del mundo incluso antes de que, en 1865, Pasteur anticipara la teoría de los gérmenes, un médico vienes, llamado Ignaz Philipp Semmelweiss, realizó el primer ataque efectivo contra las bacterias, ignorando desde luego contra qué luchaba. Trabajaba en la sección de maternidad de uno de los hospitales de Viena donde el 12 % o más de las parturientas morían de algo llamado fiebres «puerperales» (en lenguaje vulgar, «fiebres del parto»). Semmelweiss observaba, inquieto, que de aquellas mujeres que daban a luz en su casa, con la sola ayuda de comadronas ignorantes, prácticamente ninguna contraía fiebres puerperales. Sus sospechas se acrecentaron con la muerte de un médico en el hospital, a raíz de haberse inferido un corte mientras procedía a la disección de un cadáver. ¿Acaso los médicos y estudiantes procedentes de las secciones de disección transmitían de alguna forma la enfermedad a las mujeres que atendían y ayudaban a dar a luz? Semmelweiss insistió en que los médicos se lavaran las manos con una solución de cloruro de cal. Al cabo de un año, el índice de mortalidad en las secciones de maternidad había descendido del 12 al 1 %.

Pero los médicos veteranos estaban furiosos. Resentidos por la sugerencia de que se habían portado como asesinos y humillados por todos aquellos lavados de manos, lograron expulsar a Semmelweiss del hospital. (A ello contribuyó la circunstancia de que este último fuese húngaro y el hecho de haberse sublevado Hungría contra los gobernantes austriacos.) Semmelweiss se fue a Budapest, donde consiguió reducir el índice de mortalidad materna, en tanto que en Viena volvía a incrementarse durante una década aproximadamente. Pero el propio Semmelweiss

murió de fiebres puerperales en 1865, a causa de una infección accidental, a los cuarenta y siete años de edad, precisamente poco antes de que le fuera posible contemplar la reivindicación científica de sus sospechas con respecto a la transmisión de enfermedades. Fue el mismo año en que Pasteur descubriera microorganismos en los gusanos de seda enfermos y en que un cirujano inglés, llamado Joseph Lister (hijo del inventor del microscopio acromático), iniciara, de forma independiente, el ataque químico contra los gérmenes.

Lister recurrió a la sustancia eficaz del fenol (ácido carbólico). Lo utilizó por primera vez en las curas a un paciente con fractura abierta. Hasta aquel momento, cualquier herida grave casi invariablemente se infectaba. Como es natural, el fenol de Lister destruyó los tejidos alrededor de la herida, pero, al propio tiempo, aniquiló las bacterias. El paciente se recuperó de forma notable y sin complicación alguna.

A raíz de este éxito, Lister inició la práctica de rociar la sala de operaciones con fenol. Acaso resultara duro para quienes tenían que respirarlo, pero empezó a salvar vidas. Como en el caso de Semmelweiss, hubo oposición, pero los experimentos de Pasteur habían abonado el terreno para la antisepsia y Lister se salió fácilmente con la suya.

El propio Pasteur tropezaba con dificultades en Francia (a diferencia de Lister, carecía de la etiqueta unionista de Doctor en Medicina), pero logró que los cirujanos hirvieran sus instrumentos y desinfectaran los vendajes. La esterilización con vapor, «a lo Pasteur», sustituyó a la desagradable rociada con fenol de Lister. Se investigaron y se encontraron antisépticos más suaves capaces de matar las bacterias, sin perjudicar innecesariamente los tejidos. El médico francés Casimir-Joseph Davaine informó, en 1873, sobre las propiedades antisépticas del yodo y de la «tintura de yodo» (o sea, yodo disuelto en una combinación de alcohol y agua), que hoy día es de uso habitual en los hogares, este y otros productos similares se aplican automáticamente a todos los rasguños. No admite dudas el elevadísimo número de infecciones evitadas de esta forma.

De hecho, la investigación para la protección contra las infecciones iba orientándose cada vez más a prevenir la entrada de los gérmenes («asepsia») que a destruirlos una vez introducidos, como se hacía con la antisepsia. En 1890, el cirujano americano William Stewart Halstead introdujo la práctica de utilizar guantes de

goma esterilizados durante las operaciones; para 1900, el médico británico William Hunter había incorporado la máscara de gasa para proteger al paciente contra los gérmenes contenidos en el aliento del médico.

Entretanto, el médico alemán Robert Koch había comenzado a identificar las bacterias específicas responsables de diversas enfermedades. Para lograrlo, introdujo una mejora vital en la naturaleza del tipo de cultivo (esto es, en la clase de alimentos en los que crecían las bacterias). Mientras Pasteur utilizaba cultivos líquidos, Koch introdujo el elemento sólido. Distribuía muestras aisladas de gelatina (que más adelante fue sustituida por el agar-agar, sustancia gelatinosa extraída de las algas marinas). Si se depositaba con una aguja fina tan sólo una bacteria en un punto de esa materia, se desarrollaba una auténtica colonia alrededor del mismo, ya que sobre la superficie sólida del agar-agar, las bacterias se encontraban imposibilitadas de moverse o alejarse de su progenitora, como lo hubieran hecho en el elemento líquido. Un ayudante de Koch, Julius Richard Petri, introdujo el uso de cápsulas cóncavas con tapa a fin de proteger los cultivos de la contaminación por gérmenes bacteriológicos flotantes en la atmósfera; desde entonces han seguido utilizándose a tal fin las «cápsulas de Petri».

De esa forma, las bacterias individuales darían origen a colonias que entonces podrían ser cultivadas de forma aislada y utilizadas en ensayos para observar las enfermedades que producirían sobre animales de laboratorio. Esa técnica no sólo permitió la identificación de una de terminada infección, sino que también posibilitó la realización de experimentos con los diversos tratamientos posibles para aniquilar bacterias específicas.

Con sus nuevas técnicas, Koch consiguió aislar un bacilo causante del ántrax y, en 1882, otro que producía la tuberculosis. En 1884, aisló también la bacteria que causaba el cólera. Otros siguieron el camino de Koch, Por ejemplo, en 1883, el patólogo alemán Edwin Klebs aisló la bacteria causante de la difteria. En 1905, Koch recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología.

Una vez identificadas las bacterias, el próximo paso lo constituía el descubrimiento de las medicinas capaces de aniquilarlas sin matar al propio tiempo al paciente. A dicha investigación consagró sus esfuerzos el médico y bacteriólogo alemán, Paul

Ehrlich, que trabajara con Koch. Consideró la tarea como la búsqueda de una «bala mágica», que no dañaría el cuerpo aniquilando tan sólo las bacterias.

Ehrlich mostró su interés por tinturas que colorearan las bacterias. Esto guardaba estrecha relación con la investigación de las células. La célula, en su estado natural, es incolora y transparente, de manera que resulta en extremo difícil observar con detalle su interior. Los primeros microscopistas trataron de utilizar colorantes que tiñeran las células, pero dicha técnica sólo pudo ponerse en práctica con el descubrimiento, por parte de Perkin, de los tintes de anilinas (véase capítulo X). Aunque Ehrlich no fue el primero que utilizara los tintes sintéticos para colorear, en los últimos años de la década de 1870 desarrolló la técnica con todo detalle, abriendo así paso al estudio de Flemming sobre mitosis y al de Feulgen del ADN en los cromosomas (véase capítulo XII).

Pero Ehrlich tenía también otras bazas en reserva. Consideró aquellos tintes como posibles bactericidas. Era factible que una mancha que reaccionara con las bacterias más intensamente que con otras células, llegara a matar las bacterias, incluso al ser inyectada en la sangre en concentración lo suficientemente baja como para no dañar las células del paciente. Para 1907, Ehrlich había descubierto un colorante denominado «rojo tripán», que serviría para teñir los tripanosomas, organismos responsables de la temida enfermedad africana del sueño, transmitida a través de la mosca tse-tsé. Al ser inyectado en la sangre a dosis adecuadas, el rojo tripán aniquilaba los tripanosomas sin matar al paciente.

Pero Ehrlich no estaba satisfecho; quería algo que aniquilara de forma más radical los microorganismos. Suponiendo que la parte tóxica de la molécula del rojo tripán estaba constituida por la combinación «azo», o sea, un par de átomos de nitrógeno ( $-N = N-$ ), hizo suposiciones sobre lo que podría lograrse con una combinación similar de átomos de arsénico ( $-As = As-$ ). El arsénico es químicamente similar al nitrógeno, pero mucho más tóxico. Ehrlich empezó a ensayar compuestos de arsénico, uno tras otro, en forma casi indiscriminada, numerándolos metódicamente a medida que lo hacía. En 1909, un estudiante japonés de Ehrlich, Sahachiro Hata, ensayó el compuesto 606, que fracasara contra los tripanosomas, en la bacteria causante de la sífilis. Demostró ser letal para dicho microbio (denominado «espiroqueta» por su forma en espiral).

Ehrlich se dio cuenta inmediatamente de que había tropezado con algo mucho más importante que una cura para la tripanosomiasis, ya que, al fin y al cabo, se trataba de una enfermedad limitada, confinada a los trópicos. Hacía ya más de cuatrocientos años que la sífilis constituía un azote secreto en Europa, desde tiempos de Cristóbal Colón. (Se dice que sus hombres la contrajeron en el Caribe; en compensación, Europa obsequió con la viruela a los indios.) No sólo no existía curación para la sífilis, sino que una actitud gazmoña había cubierto la enfermedad con un manto de silencio, permitiendo así que se propagara sin restricciones.

Ehrlich consagró el resto de su vida (murió en 1915) a tratar de combatir la sífilis con el compuesto 606 o «Salvarsán» como él lo llamara («arsénico inocuo»). La denominación química es la de arsfenamina. Podía curar la enfermedad, pero su uso no carecía de riesgos, y Ehrlich hubo de imponerse a los hospitales para que lo utilizaran en forma adecuada.

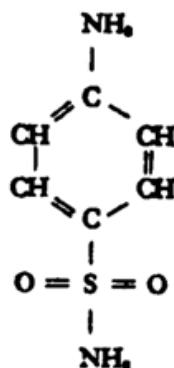
Con Ehrlich se inició una nueva fase de la quimioterapia. Finalmente, en el siglo xx, la Farmacología -el estudio de la acción de productos químicos independientes de los alimentos, es decir, los «medicamentos»-, adquirió carta de naturaleza como auxiliar de la medicina. La arsfenamina fue la primera medicina sintética, frente a los remedios vegetales, como la quinina o los minerales de Paracelso y de quienes le imitaban.

Como era de esperar, al punto se concibieron esperanzas de que podrían combatirse todas las enfermedades con algún pequeño antídoto, bien preparado y etiquetado. Pero durante la cuarta parte de siglo que siguiera al descubrimiento de Ehrlich, la suerte no acompañó a los creadores de nuevas medicinas. Tan sólo logró éxito la síntesis, por químicos alemanes, de la «plasmoquina», en 1921, y la «atebrina», en 1930; podían utilizarse como sustitutivos de la quinina contra la malaria (prestaron enormes servicios a los ejércitos aliados en las zonas selváticas, durante la Segunda Guerra Mundial, con ocasión de la ocupación de Java por los japoneses, ya que ésta constituía la fuente del suministro mundial de quinina que, al igual que el caucho, se había trasladado de Sudamérica al Sudeste asiático).

En 1932, al fin se obtuvo algún éxito. Un químico alemán, llamado Gerhard Domagk había estado inyectando diversas tinturas en ratones infectados. Ensayó un nuevo colorante rojo llamado «Prontosil» en ratones infectados con el letal estreptococo

hemolítico, ¡el ratón sobrevivió! Se lo aplicó a su propia hija, que se estaba muriendo a causa de una gravísima estreptococia hemolítica. Y también sobrevivió. Al cabo de tres años, el «Prontosil» había adquirido renombre mundial como medicina capaz de detener en el hombre la estreptococia.

Pero, cosa extraña, el «Prontosil» no aniquilaba los estreptococos en el tubo de ensayo, sino tan sólo en el organismo. En el Instituto Pasteur de París, J. Trefouel y sus colaboradores llegaron a la conclusión de que el organismo debía transformar el «Prontosil» en alguna otra sustancia capaz de ejercer efecto sobre las bacterias. Procedieron a aislar del «Prontosil» el eficaz componente denominado «sulfanilamida». En 1908 se había sintetizado dicho compuesto y, considerándosele inútil, fue relegado al olvido. La estructura de la sulfanilamida es:



Fue la primera de las «medicinas milagrosas». Ante ella fueron cayendo las bacterias, una tras otra. Los químicos descubrieron que, mediante la sustitución de varios grupos por uno de los átomos hidrógeno en el grupo que contenía azufre, podían obtener una serie de compuestos, cada uno de los cuales presentaba propiedades antibactericidas ligeramente diferentes. En 1937, se introdujo la «sulfpiridina»; en 1939, el «sulfatiazol», y en 1941, la «sulfadiacina». Los médicos tenían ya para elegir toda una serie de sulfamidas para combatir distintas infecciones. En los países más adelantados en Medicina descendieron de forma sensacional los índices de mortalidad a causa de enfermedades bacteriológicas, en especial la neumonía neumocócica.

En 1939, Domagk recibió el premio Nobel de Medicina y fisiología. Al escribir la carta habitual de aceptación, fue rápidamente detenido por la Gestapo; el gobierno nazi, por razones propias peculiares, se mostraba opuesto a toda relación con los

premios Nobel. Domagk consideró lo más prudente rechazar el premio. Una vez terminada la Segunda Guerra Mundial, libre ya de aceptar el premio, Domagk se trasladó a Estocolmo para recibirla en forma oficial.

Los medicamentos a base de sulfamidas gozaron tan sólo de un breve período de gloria, ya que pronto quedaron relegados al olvido por el descubrimiento de un arma antibacteriológica de mucha mayor potencia, los antibióticos.

Toda materia viva (incluido el hombre), acaba siempre por retornar a la tierra para convertirse en podredumbre y descomponerse. Con la materia muerta y los despojos de los seres vivos van los gérmenes de las muchas enfermedades que infectan a esas criaturas. Entonces, ¿por qué la tierra se encuentra, por lo general, tan notablemente limpia de todo germe infeccioso? Muy pocos de ellos (el bacilo del ántrax es uno de esos raros gérmenes) sobreviven en el suelo. Hace unos años, los bacteriólogos empezaron a sospechar que la tierra contenía microorganismos o sustancias capaces de destruir las bacterias.

Ya en 1877, por ejemplo, Pasteur había advertido que algunas bacterias morían en presencia de otras y, si esto es así, el suelo ofrece una gran variedad de organismos en los que investigar la muerte de otros de su clase. Se estima que cada hectárea de terreno contiene alrededor de 900 kg de mohos, 450 kg de bacterias, 90 kg de protozoos, 45 kg de algas y 45 kg de levadura.

René Jules Dubos, del Instituto Rockefeller, fue uno de los que llevó a cabo una deliberada investigación de tales bactericidas. En 1939, aisló de un microorganismo del suelo, el *Bacillus brevis*, una sustancia llamada «tirotricina», de la que a su vez aisló dos compuestos destructores de bacterias a los que denominó «gramicidina» y «tirocidina». Resultaron ser péptidos que contenían D-aminoácidos, el auténtico modelo representativo de los L-aminoácidos ordinarios contenidos en la mayor parte de las proteínas naturales.

La gramicidina y la tirocidina fueron los primeros antibióticos producidos como tales. Pero doce años antes se había descubierto un antibiótico que demostraría ser incommensurablemente más importante... aún cuando se habían limitado a hacerlo constar en un documento científico.

El bacteriólogo británico Alexander Fleming se encontró una mañana con que algunos cultivos de estafilococos (la materia común que forma el pus) que dejara

sobre un banco estaban contaminados por algo que había destruido las bacterias. En los platillos de cultivos aparecían claramente unos círculos en el punto donde quedaran destruidos los estafilococos. Fleming, que mostraba interés por la antisepsia (había descubierto que una enzima de las lágrimas llamada «lisosoma» poseía propiedades antisépticas), trató al punto de averiguar lo que había matado a la bacteria, descubriendo que se trataba de un moho común en el pan, *Penicillium notatum*. Alguna sustancia producida por dicho moho resultaba letal para los gérmenes. Como era usual, Fleming publicó sus resultados en 1929, pero en aquella época nadie le prestó demasiada atención.

Diez años después, el bioquímico británico Howard Walter Florey y su colaborador de origen alemán, Ernst Boris Chain, se mostraron intrigados ante aquel descubrimiento ya casi olvidado y se consagraron a aislar la sustancia antibactericida. Para 1941 habían obtenido un extracto que se demostró clínicamente efectivo contra cierto número de bacterias «grampositivas» (bacteria que retiene una tintura, desarrollada en 1884 por el bacteriólogo danés Hans Christian Joachim Gram).

A causa de la guerra, Gran Bretaña no se encontraba en situación de producir el medicamento, por lo que Florey se trasladó a los Estados Unidos y colaboró en la realización de un programa para desarrollar métodos de purificación de la penicilina y apresurar su producción con tierra vegetal. Al término de la guerra se encontraba ya en buen camino la producción y uso a gran escala de la penicilina. Ésta no sólo llegó a suplantar casi totalmente a las sulfamidas, sino que se convirtió -y aún sigue siéndolo- en uno de los medicamentos más importantes en la práctica de la Medicina. Es en extremo efectiva contra gran número de infecciones, incluidas la neumonía, la gonorrea, la sífilis, la fiebre puerperal, la escarlatina y la meningitis. (A la escala de efectividad se la llama «espectro antibiótico».) Además, está prácticamente exenta de toxicidad o de efectos secundarios indeseables, excepto en aquellos individuos alérgicos a la penicilina.

En 1945, Fleming, Florey y Chain recibieron, conjuntamente, el premio Nobel de Medicina y Fisiología.

Con la penicilina se inició una elaborada búsqueda, casi increíble, de otros antibióticos. (El vocablo fue ideado por el bacteriólogo Selman A. Waksman, de la

Rutgers University.)

En 1943, Waksman aisló de un moho del suelo, del género *Streptomyces*, el antibiótico conocido como «estreptomicina». Ésta atacaba las bacterias «gramnegativas» (aquellas que perdían con facilidad el colorante de Gram).

Su mayor triunfo lo consiguió contra el bacilo de la tuberculosis. Pero la estreptomicina, a diferencia de la penicilina, es tóxica y debe usarse con gran cautela.

Waksman recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1952, por su descubrimiento de la estreptomicina.

En 1947, se aisló otro antibiótico, el cloranfenicol, del género *Streptomyces*. Ataca no sólo a ciertos organismos más pequeños, en especial a los causantes de la fiebre tifoidea y la psitacosis (fiebre del loro). Pero, a causa de su toxicidad, es necesario un cuidado extremado en su empleo.

Luego llegaron toda una serie de antibióticos de «amplio espectro», encontrados al cabo de minuciosos exámenes de muchos millares de muestras de tierra, aureomicina, terramicina, acromicina, y así sucesivamente. El primero de ellos, la aureomicina, fue aislado por Benjamin Minge Duggar y sus colaboradores, en 1944, apareciendo en el mercado en 1948. Estos antibióticos se denominan «tetraciclinas», porque en todos los casos su molécula está compuesta por cuatro anillos, uno al lado de otro. Son efectivos contra una amplia gama de microorganismos y especialmente valiosos porque su toxicidad es relativamente baja. Uno de sus efectos secundarios más molestos se debe a la circunstancia de que, al romper el equilibrio de la flora intestinal, entorpecen el curso natural de la acción intestinal y a veces producen diarrea.

Después de la penicilina (que resulta mucho menos onerosa), las tetraciclinas constituyen en la actualidad los medicamentos más recetados y comunes en caso de infección. Gracias a todos los antibióticos en general, los índices de mortalidad en muchos casos de enfermedades infecciosas han descendido a niveles satisfactoriamente bajos.

(Desde luego, los seres humanos que se conservan vivos por el incesante dominio del hombre sobre las enfermedades infecciosas, corren un peligro mucho mayor de sucumbir a trastornos del metabolismo. Así, durante los últimos ocho años, la

incidencia de diabetes, la dolencia más común de ese género, se ha decuplicado.) No obstante, el mayor contratiempo en el desarrollo de la quimioterapia ha sido el acelerado aumento en la resistencia de las bacterias. Por ejemplo, en 1939, todos los casos de meningitis y de neumonía neumocócica reaccionaron favorablemente a la administración de sulfamidas.

Veinte años después, tan sólo en la mitad de los casos tuvieron éxito. Los diversos antibióticos también empezaron a perder efectividad con el transcurso del tiempo. No es que la bacteria «aprenda» a resistir, sino que entre ellas se reproducen mutantes resistentes, que se multiplican al ser destruidas las cadenas «normales». El peligro es aún mayor en los hospitales donde se utilizan de forma constante antibióticos y donde los pacientes tienen, naturalmente, una resistencia a la infección por debajo de la normal. Algunas nuevas cadenas de estafilococos ofrecen una resistencia especialmente tenaz a los antibióticos. El «estafilococo hospitalario» es hoy día motivo de seria preocupación, por ejemplo, en las secciones de maternidad, y en 1961 se le dedicaron grandes titulares cuando una neumonía, favorecida por ese tipo de bacterias resistentes, estuvo a punto de causar la muerte a la estrella de cine Elizabeth Taylor.

Afortunadamente, cuando un antibiótico fracasa, acaso otro pueda todavía atacar a las bacterias resistentes. Nuevos antibióticos y modificaciones sintéticas de los antiguos, tal vez puedan ofrecer remedio contra las mutaciones. Lo ideal sería encontrar un antibiótico al que ningún mutante fuera inmune. De esa forma no quedarían supervivientes determinadas bacterias, las cuales, por tanto, no podrían multiplicarse. Se ha obtenido cierto número de esos candidatos. Por ejemplo, en 1960 se desarrolló una penicilina modificada, conocida como «estaficilina». En parte es sintética y, debido a que su estructura es extraña a la bacteria, su molécula no se divide ni su actividad queda anulada por enzimas, como la «penicilinasa» (que Chain fuera el primero en descubrir). En consecuencia, la estaficilina destruye las cadenas resistentes; por ejemplo, se utilizó para salvar la vida de la artista Elizabeth Taylor.

Pero aún así también han aparecido cadenas de estafilococos resistentes a las penicilinas sintéticas. Es de suponer que ese círculo vicioso se mantendrá eternamente.

Nuevos aliados contra las bacterias resistentes los constituyen algunos otros nuevos antibióticos y versiones modificadas de los antiguos. Sólo cabe esperar que el enorme progreso de la ciencia química logre mantener el control sobre la tenaz versatilidad de los gérmenes patógenos.

El mismo problema del desarrollo de cadenas resistentes surge en la lucha del hombre contra otros enemigos más grandes, los insectos, que no sólo le hacen una peligrosa competencia en lo que se refiere a los alimentos, sino que también propagan las enfermedades. Las modernas defensas químicas contra los insectos surgieron en 1939, con el desarrollo por un químico suizo, Paul Müller, del producto químico «dcloro-difenil-tricloroetano», comúnmente conocido por las iniciales «DDT». Por su descubrimiento, se le concedió a Müller el premio Nobel de Medicina y Fisiología, en 1948.

Por entonces, se utilizaba ya el DDT a gran escala, habiéndose desarrollado tipos resistentes de moscas comunes. Por tanto, es necesario desarrollar continuamente nuevos «insecticidas», o «pesticidas» para usar un término más general que abarque los productos químicos utilizados contra las ratas y la cizaña. Han surgido críticas respecto a la superquímica en la batalla del hombre contra otras formas de vida. Hay quienes se sienten preocupados ante la posible perspectiva de que una parte cada vez mayor de la población conserve la vida tan sólo gracias a la química; temen que si, llegado un momento, fallara la organización tecnológica del hombre, aún cuando sólo fuera temporalmente, tendría lugar una gran mortandad al caer la población víctima de las infecciones y enfermedades contra las cuales carecerían de la adecuada resistencia natural.

En cuanto a los pesticidas, la escritora científica americana, Rachel Louise Carson, publicó un libro, en 1962, *Silent Spring* (Primavera silenciosa), en el que dramáticamente llama la atención sobre la posibilidad de que, por el uso indiscriminado de los productos químicos, la Humanidad pueda matar especies indefensas e incluso útiles, al mismo tiempo que aquellas a las que en realidad trata de aniquilar. Además, Rachel Carson sostenía la teoría de que la destrucción de seres vivientes, sin la debida consideración, podría conducir a un serio desequilibrio del intrincado sistema según el cual unas especies dependen de otras y que, en definitiva, perjudicaría al hombre en lugar de ayudarle. El estudio de ese

encadenamiento entre las especies se denomina «ecología», y no existe duda alguna de que la obra de Rachel Carson anima a un nuevo y minucioso examen de esa rama de la Biología.

Desde luego, la respuesta no debe implicar el abandono de la tecnología ni una renuncia total a toda tentativa para dominar los insectos (pues se pagaría un precio demasiado alto en forma de enfermedades e inanición), sino idear métodos más específicos y menos dañinos para la estructura ecológica en general. Los insectos tienen también sus enemigos. Estos enemigos, bien sean parásitos de insectos o insectívoros, deben recibir el apropiado estímulo. Se pueden emplear también sonidos y olores para repeler a los insectos y hacerles correr hacia su muerte.

También se les puede esterilizar mediante la radiación. Sea como fuere, debe dedicarse el máximo esfuerzo para establecer un punto de partida en la lucha contra los insectos.

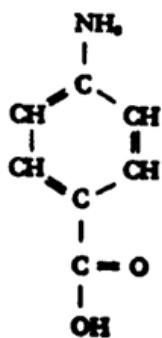
Una prometedora línea de ataque, organizada por el biólogo americano Carroll Milton Williams, consiste en utilizar las propias hormonas de los insectos. El insecto tiene una metamorfosis periódica y pasa por dos o tres fases bien definidas: larva, crisálida y adulto. Las transiciones son complejas y tienen lugar bajo el control de las hormonas. Así, una de ellas, llamada «hormona juvenil», impide el paso a la fase adulta hasta el momento apropiado.

Mediante el aislamiento y aplicación de la hormona juvenil, se puede interceptar la fase adulta durante el tiempo necesario para matar al insecto. Cada insecto tiene su propia hormona juvenil y sólo ella le hace reaccionar. Así pues, se podría emplear una hormona juvenil específica para atacar a una determinada especie de insecto sin perjudicar a ningún otro organismo del mundo. Guiándose por la estructura de esa hormona, los biólogos podrían incluso preparar sustitutivos sintéticos que serían mucho más baratos y actuarían con idéntica eficacia.

En suma, la respuesta al hecho de que el progreso científico puede tener algunas veces repercusiones perjudiciales, no debe implicar el abandono del avance científico, sino su sustitución por un avance aún mayor aplicado con prudencia e inteligencia.

En cuanto al trabajo de los agentes quimioterapéuticos, cabe suponer que cada medicamento inhibe, en competencia, alguna enzima clave del microorganismo.

Esto resulta más evidente en el caso de las sulfamidas. Son muy semejantes al «ácido paraminobenzoico» (generalmente escrito ácido p-aminobenzoico), que tiene la estructura:



El ácido p-aminobenzoico es necesario para la síntesis del «ácido fólico», sustancia clave en el metabolismo de las bacterias, así como en otras células. Una bacteria que asimile una molécula de sulfanilamida en lugar de ácido p-aminobenzoico ya es incapaz de producir ácido fólico, porque la enzima que se necesita para el proceso ha sido puesta fuera de combate. En consecuencia, la bacteria cesa de crecer y multiplicarse. Las células del paciente humano permanecen, por otra parte, inalterables, obtienen el ácido fólico de los alimentos y no tienen que sintetizarlo. De esta forma en las células humanas no existen enzimas que se inhiban con concentraciones moderadas de sulfamidas.

Incluso cuando una bacteria y la célula humana posean sistemas similares existen otras formas de atacar, relativamente, la bacteria. La enzima bacteriológica puede mostrarse más sensible a determinado medicamento, que la enzima humana de tal manera que una dosis determinada puede aniquilar a la bacteria sin dañar gravemente las células humanas. O también un medicamento de cualidades específicas puede penetrar la membrana de la bacteria, pero no la de la célula humana.

¿Actúan también los antibióticos mediante inhibición competitiva de enzimas? En este caso, la respuesta es menos clara. Pero existe buena base para creer que, al menos con algunos de ellos, ocurre así.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la gramicidina y la tirocidina contienen el D-aminoácido «artificial». Acaso se interpongan a las enzimas que forman compuestos de los L-aminoácidos naturales. Otro antibiótico péptido, la bacitracina,

contiene ornitina; por ello, quizás inhibía a las enzimas a utilizar arginina, a la que se asemeja la ornitina. La situación es similar con la estreptomicina; sus moléculas contienen una extraña variedad de azúcar capaz de interferir con alguna enzima que actúe sobre uno de los azúcares normales de las células vivas. Asimismo, el cloranfenicol se asemeja al aminoácido fenilalanina; igualmente, parte de la molécula penicilina se parece al aminoácido cisteína. En ambos casos existe gran probabilidad de inhibición competitiva.

La evidencia más clara de acción competitiva por un antibiótico que hasta ahora se había presentado, nos la ofrece la «piromicina», sustancia producida por un moho *Streptomyces*. Este compuesto presenta una estructura muy semejante a la de los nucleótidos (unidades constructoras de los ácidos nucleicos); Michael Yarmolinsky y sus colaboradores de la «Johns Hopkins University» han demostrado que la puromicina, en competencia con el ARN-transfer, interfiere en la síntesis de proteínas. Por su parte, la estreptomicina interfiere con el ARN-transfer, forzando la mala interpretación del código genético y la formación de proteínas inútiles. Por desgracia, ese tipo de interferencia la hace tóxica para otras células además de la bacteria, al impedir la producción normal de las proteínas necesarias. De manera que la piromicina es un medicamento demasiado peligroso para ser utilizado igual que la estreptomicina.

## Virus

Para la mayoría de la gente acaso resulte desconcertante el hecho de que los «medicamentos milagrosos» sean tan eficaces contra las enfermedades bacteriológicas y tan poco contra las producidas por virus. Si después de todo, los virus sólo pueden originar enfermedades si logran reproducirse, ¿por qué no habría de ser posible entorpecer el metabolismo de los virus, como se hace con las bacterias? La respuesta es muy sencilla e incluso evidente, con sólo tener en cuenta el sistema de reproducción de los virus. En su calidad de parásito absoluto, incapaz de multiplicarse como no sea dentro de una célula viva, el virus posee escaso metabolismo propio, si es que acaso lo tiene. Para hacer fenocopias depende totalmente de las materias suministradas por la célula que invade, y, por tanto, resulta, difícil privarle de tales materias o entorpecer su metabolismo sin destruir la

propia célula, Hasta fecha muy reciente no descubrieron los biólogos los virus, tras la serie de tropiezos con formas de vida cada vez más simples. Acaso resulte adecuado iniciar esta historia con el descubrimiento de las causas de la malaria. Un año tras otro, la malaria probablemente ha matado más gente en el mundo que cualquier otra dolencia infecciosa, ya que, hasta épocas recientes alrededor del 10 % de la población mundial padecía dicha enfermedad, que causaba tres millones de muertes al año. Hasta 1880 se creía que tenía su origen en el aire contaminado (*mala aria* en italiano) de las regiones pantanosas. Pero entonces, un bacteriólogo francés, Charles-Louis-Alphonse Laveran, descubrió que los glóbulos rojos de los individuos atacados de malaria estaban infestados con protozoos parásitos del género *Plasmodium*. (Laveran fue galardonado con el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1907, por este descubrimiento.) En los primeros años de la década de 1890, un médico británico llamado Patrick Manson, que dirigiera el hospital de una misión en Hong Kong, observó que en las regiones pantanosas pululaban los mosquitos al igual que en la atmósfera insana y sugirió que acaso los mosquitos tuvieran algo que ver con la propagación de la malaria. En la India, un médico británico, Ronald Ross, aceptó la idea y pudo demostrar que el parásito de la malaria pasaba en realidad parte del ciclo de su vida en mosquitos del género *Anopheles*. El mosquito recogía el parásito chupando la sangre de una persona infectada y luego se lo transmitía a toda persona que picaba.

Por su trabajo al sacar a luz, por vez primera, la transmisión de una enfermedad por un insecto «vector», Ross recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología, en 1902. Fue un descubrimiento crucial de la medicina moderna, por demostrar que se puede combatir una enfermedad matando al insecto que la transmite. Basta con desecar los pantanos donde se desarrollan los mosquitos, con eliminar las aguas estancadas, con destruir los mosquitos por medio de insecticidas y se detendrá la enfermedad. Desde la Segunda Guerra Mundial, de esta forma se han visto libres de malaria extensas zonas del mundo, y la cifra de muertes por esta enfermedad ha descendido, por lo menos, en una tercera parte.

La malaria fue la primera enfermedad infecciosa cuya trayectoria se ha seguido hasta un microorganismo no bacteriológico (en este caso, un protozoo). Casi al mismo tiempo se siguió la pista a otra enfermedad no bacteriológica con una causa

similar. Se trataba de la mortal fiebre amarilla, que en 1898, durante una epidemia en Río de Janeiro, mataba nada menos que casi al 95 % de los que la contrajeron. En 1899, al estallar en Cuba una epidemia de fiebre amarilla, se desplazó a aquel país, desde los Estados Unidos, una comisión investigadora, encabezada por el bacteriólogo Walter Reed, para tratar de averiguar las causas de la enfermedad. Reed sospechaba que, tal como acababa de demostrarse en el caso del transmisor de la malaria, se trataba de un mosquito vector. En primer lugar, dejó firmemente establecido que la enfermedad no podía transmitirse por contacto directo entre los pacientes y los médicos o a través de la ropa de vestir o de cama del enfermo. Luego, algunos de los médicos se dejaron picar deliberadamente por mosquitos que con anterioridad habían picado a un hombre enfermo de fiebre amarilla. Contrajeron la enfermedad, muriendo uno de aquellos valerosos investigadores, Jesse William Lazear. Pero se identificó al culpable como el mosquito *Aedes aegypti*. Quedó controlada la epidemia en Cuba, y la fiebre amarilla ya no es una enfermedad peligrosa en aquellas partes del mundo en las que la Medicina se encuentra más adelantada.

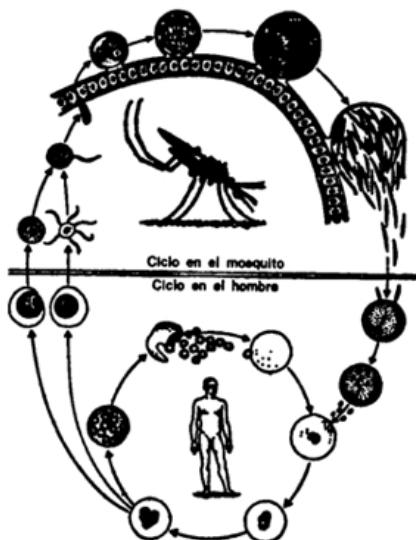
Como tercer ejemplo de una enfermedad no bacteriológica tenemos la fiebre tifoidea. Esta infección es endémica en África del Norte y llegó a Europa vía España durante la larga lucha de los españoles contra los árabes.

Comúnmente conocida como «plaga», es muy contagiosa y ha devastado naciones. Durante la Primera Guerra Mundial, los ejércitos austriacos hubieron de retirarse de Serbia a causa del tifus, cuando el propio ejército serbio no hubiera logrado rechazarlos. Los estragos causados por el tifus en Polonia y Rusia durante esa misma guerra y después de ella (unos tres millones de personas murieron a causa de dicha enfermedad) contribuyeron tanto a arruinar a esas naciones como la acción militar.

Al iniciarse el siglo xx, el bacteriólogo francés Charles Nicolle, por entonces al frente del «Instituto Pasteur» de Túnez, observó que, mientras el tifus imperaba en la ciudad, en el hospital nadie lo contraía. Los médicos y enfermeras estaban en contacto diario con los pacientes atacados de tifus y el hospital se encontraba abarrotado; sin embargo, en él no se produjo contagio alguno de la enfermedad. Nicolle analizó cuánto ocurría al llegar un paciente al hospital y le llamó la atención

el hecho de que el cambio más significativo se relacionaba con el lavado del paciente y el despojarle de sus ropas infestadas de piojos.

Nicolle quedó convencido de que aquel parásito corporal debía ser el vector del tifus. Demostró con experimentos lo acertado de su suposición. En 1928, recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología por su descubrimiento. Gracias a dicho descubrimiento y a la aparición del DDT, la fiebre tifoidea no repitió su mortífera transmisión durante la Segunda Guerra Mundial. En enero de 1944, se comenzó a usar el DDT contra el parásito corporal. Se roció en masa a la población de Nápoles y los piojos murieron. Por vez primera en la Historia se contuvo una epidemia de tifus invernal (cuando la abundancia de ropa, que no se cambia con frecuencia, hace casi segura y casi universal la invasión de piojos). En Japón se contuvo una epidemia similar a finales de 1945 después de la ocupación americana. La Segunda Guerra Mundial se convirtió casi en única entre todas las guerras de la Historia, gracias al dudoso mérito de haber aniquilado más gente con cañones y bombas que las fallecidas por enfermedad.



*Ciclo vital del microorganismo de la malaria.*

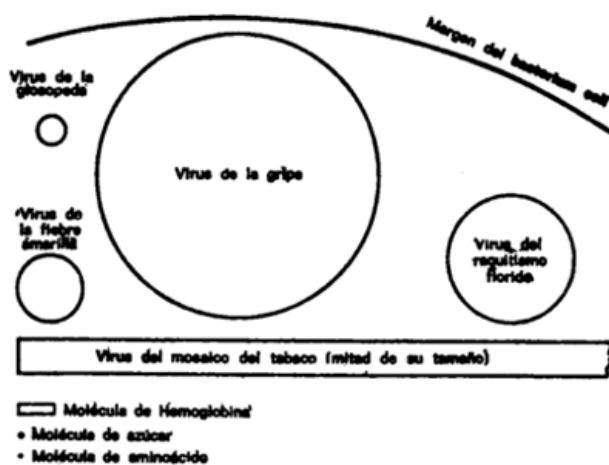
El tifus, al igual que la fiebre amarilla, tiene su origen en un agente más pequeño que una bacteria; ahora habremos de introducirnos en el extraño y maravilloso reino poblado de organismos subbacteriológicos.

Para tener una ligera idea de las dimensiones de los objetos en ese mundo, considerémoslos en orden de tamaño decreciente. El óvulo humano tiene un diámetro de unas cien micras (cien millonésimas de metro) y apenas resulta visible

a simple vista. El paramecio, un gran protozoo, que a plena luz puede verse mover en una gota de agua, tiene aproximadamente el mismo tamaño. Una célula humana ordinaria mide solo 1/10 de su tamaño (alrededor de diez micras de diámetro), y es totalmente invisible sin microscopio. Aún más pequeño es el hematíe que mide unas siete micras de diámetro máximo. La bacteria, que se inicia con especies tan grandes como las células ordinarias, decrece a niveles más diminutos; la bacteria de tipo medio en forma de vástago mide tan sólo dos micras de longitud y las bacterias más pequeñas son esferas de un diámetro no superior a 4/10 de micra. Apenas pueden distinguirse con un microscopio corriente.

Al parecer, los organismos han alcanzado a tal nivel el volumen más pequeño posible en que puede desarrollarse toda la maquinaria de metabolismo necesaria para una vida independiente. Cualquier organismo más pequeño ya no puede constituir una célula con vida propia y ha de vivir como parásito. Por así decirlo, tiene que desprenderse de casi todo el metabolismo enzimático. Es incapaz de crecer o multiplicarse sobre un suministro artificial de alimento, por grande que éste sea; en consecuencia, no puede cultivarse en un tubo de ensayo como se hace con las bacterias. El único lugar en que puede crecer es en una célula viva, que le suministra las enzimas de que carece. Naturalmente, un parásito semejante crece y se multiplica a expensas de la célula que lo alberga.

Un joven patólogo americano llamado Howard Taylor Ricketts fue el descubridor de la primera subbacteria. En 1909 se encontraba estudiando una enfermedad llamada fiebre manchada de las Montañas Rocosas, propagada por garrapatas (artrópodos chupadores de sangre, del género de las arañas más que de los insectos). Dentro de las células infectadas encontró «cuerpos de inclusión», que resultaron ser organismos muy diminutos llamados hoy día «rickettsia» en su honor. Durante el proceso seguido para establecer pruebas de este hecho, el descubridor contrajo el tifus y murió en 1910 a los 38 años de edad.



*Tamaños relativos de sustancias simples y proteínas, así como de diversas partículas y bacterias. (Una pulgada y media de esta escala = 1/10.000 de milímetro en su tamaño real.)*

La rickettsia es aún lo bastante grande para poder atacarla con antibióticos tales como el cloranfenicol y las tetraciclinas. Su diámetro oscila desde cuatro quintos a un quinto de micra. Al parecer, aún poseen suficiente metabolismo propio para diferenciarse de las células que los albergan en su reacción a los medicamentos. Por tanto, la terapéutica antibiótica ha reducido en forma considerable el peligro de las enfermedades rickettsiósicas.

Por último, al final de la escala se encuentran los virus. Superan a la rickettsia en tamaño; de hecho, no existe una divisoria entre la rickettsia y los virus. Pero el virus más pequeño es, desde luego, diminuto. Por ejemplo, el virus de la fiebre amarilla tiene un diámetro que alcanza tan sólo un 1/50 de micra. Los virus son demasiado pequeños para poder distinguirlos en una célula y para ser observados con cualquier clase de microscopio óptico. El tamaño promedio de un virus es tan sólo un 1/1.000 del de una bacteria promedio.

Un virus está prácticamente desprovisto de toda clase de metabolismo. Depende casi totalmente del equipo enzimático de la célula que lo alberga. Algunos de los virus más grandes se ven afectados por determinados antibióticos, pero los medicamentos carecen de efectividad contra los virus diminutos.

Ya se sospechaba la existencia de virus mucho antes de que finalmente llegaran a ser vistos. Pasteur, en el curso de sus estudios sobre hidrofobia, no pudo encontrar organismo alguno del que pudiera sospecharse con base razonable que fuera el

causante de la enfermedad. Y antes de decidirse a admitir que su teoría sobre los gérmenes de las enfermedades estaba equivocada, Pasteur sugirió que, en tal caso, el germe era sencillamente demasiado pequeño para ser visto. Y tenía razón.

En 1892, un bacteriólogo ruso, Dmitri Ivanovski, mientras estudiaba el «mosaico del tabaco», enfermedad que da a las hojas de la planta del tabaco una apariencia manchada, descubrió que el jugo de las hojas infectadas podía transmitir la enfermedad si se le aplicaba a las hojas de plantas saludables. En un esfuerzo por acorralar a los gérmenes, coló el jugo con filtros de porcelana, cuyos agujeros eran tan finos que ni siquiera las bacterias más diminutas podían pasar a través de ellos. Pero aún así el jugo filtrado seguía contagiando a las plantas de tabaco. Ivanovski llegó a la conclusión de que sus filtros eran defectuosos y que en realidad dejaban pasar las bacterias.

Un bacteriólogo holandés, Martinus Willem Beijerinck, repitió el experimento en 1897 y llegó a la conclusión de que el agente transmisor de la enfermedad era lo suficientemente pequeño para pasar a través del filtro. Como nada podía ver en el fluido claro y contagioso con ningún microscopio, y como tampoco podía hacerlo desarrollarse en un cultivo de tubo de ensayo, pensó que el agente infeccioso debía ser una molécula pequeña, acaso tal vez del tamaño de una molécula de azúcar. Beijerinck nombró al agente infeccioso «virus filtrable» (virus es un vocablo latino que significa «veneno»).

Aquel mismo año, un bacteriólogo alemán, Friedrich August Johannes Löffler, descubrió que el agente causante de la fiebre aftosa (la glosopeda) entre el ganado pasaba también a través del filtro, y en 1901, Walter Reed, en el curso de sus investigaciones sobre la fiebre amarilla, descubrió que el agente infeccioso origen de dicha enfermedad era también un virus filtrable.

En 1914, el bacteriólogo alemán Walther Kruse demostró la acción del frío en los virus.

En 1931, se sabía que alrededor de cuarenta enfermedades (incluidos sarampión, parotiditis, varicela, poliomielitis e hidrofobia) eran causadas por virus, pero aún seguía siendo un misterio la naturaleza de tales virus. Pero entonces un bacteriólogo inglés, William J. Elford, empezó finalmente a capturar algunos en filtros y a demostrar que, al menos, eran partículas materiales de alguna especie.

Utilizó membranas finas de colodión, graduadas para conservar partículas cada vez más pequeñas y así prosiguió hasta llegar a membranas lo suficientemente finas para separar al agente infeccioso de un líquido. Por la finura de la membrana capaz de retener al agente de una enfermedad dada, fue capaz de calibrar el tamaño de dicho virus. Descubrió que Beijerinck se había equivocado; ni siquiera el virus más pequeño era más grande que la mayor parte de las moléculas. Los virus más grandes alcanzaban aproximadamente el tamaño de la rickettsia.

Durante algunos de los años siguientes, los biólogos debatieron la posibilidad de que los virus fueran partículas vivas o muertas. Su habilidad para multiplicarse y transmitir enfermedades sugería, ciertamente, que estaban vivas. Pero, en 1935, el bioquímico americano Wendell Meredith Stanley presentó una prueba que parecía favorecer en alto grado la tesis de que eran partículas «muertas». Machacó hojas de tabaco sumamente infectadas con el virus del mosaico del tabaco y se dedicó a aislar el virus en la forma más pura y concentrada que le fue posible, recurriendo, a tal fin, a las técnicas de separación de proteínas. El éxito logrado por Stanley superó toda esperanza, ya que logró obtener el virus en forma cristalina. Su preparado resultó tan cristalino como una molécula cristalizada y, sin embargo, era evidente que el virus seguía intacto; al ser disuelto de nuevo en el líquido seguía tan infeccioso como antes. Por su cristalización del virus, Stanley compartió, en 1946, el premio Nobel de Química con Sumner y Northrop, los cristalizadores de enzimas (véase el capítulo II).

Aún así, durante los veinte años que siguieron al descubrimiento de Stanley, los únicos virus que pudieron ser cristalizados fueron los «virus de las plantas», en extremo elementales (o sea, los que infectan las células de las plantas). Hasta 1955 no apareció cristalizado el primer «virus animal». En ese año, Carlton E. Schwerdt y Frederick L. Schaffer cristalizaron el virus de la poliomielitis.

El hecho de poder cristalizar los virus pareció convencer a muchos, entre ellos al propio Stanley, de que se trataba de proteínas muertas. Jamás pudo ser cristalizado nada en que alentara la vida, pues la cristalización parecía absolutamente incompatible con la vida. Esta última era flexible, cambiante, dinámica; un cristal era rígido, fijo, ordenado de forma estricta, y, sin embargo, era inmutable el hecho de que los virus eran infecciosos, de que podían crecer y multiplicarse, aún después

de haber sido cristalizados. Y tanto el crecimiento como la reproducción fueron siempre considerados como esencia de vida.

Y al fin se produjo la crisis cuando dos bioquímicos británicos, Frederick Ch. Bawden y Norman W. Pirie demostraron que el virus del mosaico del tabaco contenía ácido ribonucleico! Desde luego, no mucho; el virus estaba construido por un 94 % de proteínas y tan sólo un 6 % de ARN. Pero, pese a todo, era, de forma tajante, una nucleoproteína. Y lo que es más, todos los demás virus demostraron ser nucleoproteínas, conteniendo ARN o ADN, e incluso ambos.

La diferencia entre ser nucleoproteína o, simplemente, proteína es prácticamente la misma que existe entre estar vivo o muerto. Resultó que los virus estaban compuestos de la misma materia que los genes y estos últimos constituyen la esencia propia de la vida. Los virus más grandes tienen toda la apariencia de ser series de genes o cromosomas «sueltos». Algunos llegan a contener 75 genes, cada uno de los cuales regula la formación de algún aspecto de su estructura: Una fibra aquí, un pliegue allí. Al producir mutaciones en el ácido nucleico, uno u otro gen puede resultar defectuoso, y de este modo, puedan ser determinadas tanto su función como su localización. El análisis genético total (tanto estructural como funcional) de un virus es algo factible, aunque, por supuesto, esto no representa más que un pequeño paso hacia un análisis similar total de los organismos celulares, con su equipo genético mucho más elaborado.

Podemos representar a los virus en la célula como un invasor que, dejando a un lado los genes supervisores, se apoderan de la química celular en su propio provecho, causando a menudo en el proceso la muerte de la célula o de todo el organismo huésped. A veces puede darse el caso de que un virus sustituya a un gen o a una serie de genes por los suyos propios, introduciendo nuevas características, que pueden ser transmitidas a células hijas. Este fenómeno se llama *transducción*.

Si los genes; contienen las propiedades de la «vida» de una célula, entonces los virus son cosas vivas. Naturalmente que depende en gran modo de cómo definamos la vida. Por nuestra parte, creo que es justo considerar viva cualquier molécula de nucleoproteína capaz de dar respuesta, y según esa definición, los virus están tan vivos como los elefantes o los seres vivientes.

Naturalmente, nunca son tan convincentes las pruebas indirectas de la existencia de virus, por numerosas que sean, como el contemplar uno. Al parecer, el primer hombre en posar la mirada sobre un virus fue un médico escocés llamado John Brown Buist. En 1887, informó que en el fluido obtenido de una ampolla por vacunación había logrado distinguir con el microscopio algunos puntos diminutos. Es de presumir que se tratara de los virus de la vacuna, los más grandes que se conocen.

Para ver bien, o incluso para ver simplemente, un virus típico, se necesita algo mejor que un microscopio ordinario. Ese algo mejor fue inventado, finalmente, en los últimos años de la década de 1930; se trata del microscopio electrónico; este aparato puede alcanzar ampliaciones de hasta 100.000 y permite contemplar objetos tan pequeños de hasta 1/1.000 de micra de diámetro.

El microscopio electrónico tiene sus inconvenientes. El objeto ha de colocarse en un vacío y la deshidratación, que resulta inevitable, puede hacerle cambiar de forma. Un objeto tal como una célula tiene que hacerse en extremo delgada. La imagen es tan sólo bidimensional; además los electrones tienden a atravesar una materia biológica, de manera que no se mantiene sobre el fondo.

En 1944, un astrónomo y físico americano, Robley Cook Williams y el microscopista electrónico Ralph Walter Graystone Wyckoff, trabajando en colaboración, concibieron una ingeniosa solución a estas últimas dificultades.

A Williams se le ocurrió, en su calidad de astrónomo, que al igual que los cráteres y montañas de la Luna adquieren relieve mediante sombras cuando la luz del sol cae sobre ellos en forma oblicua, podrían verse los virus en tres dimensiones en el microscopio electrónico si de alguna forma pudiera lograrse el que reflejaran sombras. La solución que se les ocurrió a los experimentadores fue la de lanzar metal vaporizado obliquamente a través de las partículas de virus colocadas en la platina del microscopio. La corriente de metal dejaba un claro espacio -una «sombra»- detrás de cada partícula de virus. La longitud de la sombra indicaba la altura de la partícula bloqueadora, y al condensarse el metal en una fina película, delineaba también claramente las partículas de virus sobre el fondo.

De esa manera, las fotografías de sombras de diversos virus denunciaron sus formas. Se descubrió que el virus de la vacuna era algo semejante a un barril.

Resultó ser del grueso de unas 0,25 micras, aproximadamente el tamaño de la más pequeña de las rickettsias. El virus del mosaico del tabaco era semejante a un delgado vástago de 0,28 micras de longitud por 0,015 micras de ancho. Los virus más pequeños, como los de la poliomielitis, la fiebre amarilla y la fiebre aftosa (glosopeda), eran esferas diminutas, oscilando su diámetro desde 0,025 hasta 0,020 micras. Esto es considerablemente más pequeño que el tamaño calculado de un solo gen humano. El peso de estos virus es tan sólo alrededor de 100 veces el de una molécula promedio de proteína. Los virus del mosaico del bromo, los más pequeños conocidos hasta ahora, tienen un peso molecular de 4,5. Es tan sólo una décima parte del tamaño del mosaico del tabaco y acaso goce del título de la «cosa viva más pequeña».

En 1959, el citólogo finlandés Alvar P. Wilska concibió un microscopio electrónico que utilizaba electrones de «velocidad reducida». Siendo menos penetrantes que los electrones de «velocidad acelerada», pueden revelar algunos de los detalles internos de la estructura de los virus. Y en 1961, el citólogo francés Gaston DuPouy ideó la forma de colocar las bacterias en unas cápsulas, llenas de aire, tomando de esta forma vistas de las células vivas con el microscopio electrónico. Sin embargo, en ausencia del metal proyector de sombras se perdía detalle.

Los virólogos han comenzado en la actualidad a separar los virus y a unirlos de nuevo. Por ejemplo, en la Universidad de California, el bioquímico germano americano Heinz Fraenkel-Conrat, trabajando con Robley Williams, descubrió que un delicado tratamiento químico descomponía la proteína del virus del mosaico del tabaco en unos 2.200 fragmentos consistentes en cadenas peptídicas formadas cada una por 158 aminoácidos y con pesos moleculares individuales de 18.000. En 1960 se descubrió totalmente la exacta composición aminoácida de estas unidades virus-proteína. Al disolverse tales unidades, tienden a soldarse para formar otra vez el vástago largo y cóncavo (en cuya forma existen en el virus original). Se mantienen juntas las unidades con átomos de calcio y magnesio.

En general, las unidades virus-proteína, al combinarse, forman dibujos geométricos. Las del virus del mosaico del tabaco que acabamos de exponer forman segmentos de una hélice. Las sesenta subunidades de la proteína del virus de la poliomielitis

están ordenadas en 12 pentágonos. Las veinte subunidades del virus iridiscente *Tipula* están ordenadas en una figura regular de veinte lados, un icosaedro.

La proteína del virus es cóncava. Por ejemplo, la hélice de la proteína del virus del mosaico del tabaco está formada por 130 giros de la cadena peptídica, que producen en su interior una cavidad larga y recta. Dentro de la concavidad de la proteína se encuentra la posición del ácido nucleico del virus. Puede ser ADN o ARN, pero, en cualquier caso, está formada por un mínimo de 6.000 nucleótidos.

Fraenkel-Conrat separó el ácido nucleico y la porción de proteínas en los virus del mosaico del tabaco y trató de averiguar si cada una de esas porciones podía infectar independientemente la célula. Quedó demostrado que individualmente no podían hacerlo, pero cuando unió de nuevo la proteína y el ácido nucleico quedó restaurado hasta el 50 % del poder infeccioso original de la muestra de virus.

¿Qué había ocurrido? A todas luces, una vez separados la proteína y el ácido nucleico del virus ofrecían toda la apariencia de muertos; y, sin embargo, al unirlos nuevamente, al menos parte de la materia parecía volver a la vida. La Prensa vitoreó el experimento de Fraenkel-Conrat como la creación de un organismo vivo creado de materia inerte. Estaban equivocados, como veremos a continuación.

Al parecer, había tenido lugar una nueva combinación de proteína y ácido nucleico. Y por lo que podía deducirse, cada uno de ellos desempeñaba un papel en la infección. ¿Cuáles eran las respectivas funciones de la proteína y el ácido nucleico y cuál de ellas era más importante? Fraenkel-Conrat realizó un excelente experimento que dejó contestada la pregunta. Mezcló la parte de proteína correspondiente a una cadena del virus con la porción de ácido nucleico de otra cadena. Ambas partes se combinaron para formar un virus infeccioso icon una mezcla de propiedades! Su virulencia (o sea, el grado de potencia para infectar las plantas de tabaco) era igual a la de la cadena de virus que aportara la proteína; la enfermedad a que dio origen (o sea la naturaleza del tipo de mosaico sobre la hoja) era idéntica a la de la cadena de virus que aportara el ácido nucleico.

Dicho descubrimiento respondía perfectamente a lo que los virólogos ya sospechaban con referencia a las funciones respectivas de la proteína y el ácido nucleico. Al parecer, cuando un virus ataca a una célula, su caparazón o cubierta proteínica le sirve para adherirse a la célula y para abrir una brecha que le permita

introducirse en ella. Entonces, su ácido nucleico invade la célula e inicia la producción de partículas de virus.

Una vez que el virus de Fraenkel-Conrat hubo infectado una hoja de tabaco, las nuevas generaciones de virus que fomentara en las células de la hoja resultaron ser no un híbrido, sino una réplica de la cadena que contribuyera al ácido nucleico. Reproducía dicha cadena no sólo en el grado de infección, sino también en el tipo de enfermedad producida. En otras palabras, el ácido nucleico había dictado la construcción de la nueva capa proteínica del virus. Había producido la proteína de su propia cadena, no la de otra cadena con la cual le combinaran para formar el híbrido.

Esto sirvió para reforzar la prueba de que el ácido nucleico constituía la parte «viva» de un virus, o, en definitiva, de cualquier nucleoproteína. En realidad, Fraenkel-Conrat descubrió en ulteriores experimentos que el ácido nucleico puro del virus puede originar por sí solo una pequeña infección en una hoja de tabaco, alrededor del 0,1 % de la producida por el virus intacto. Aparentemente, el ácido nucleico lograba por sí mismo abrir brecha de alguna forma en la célula.

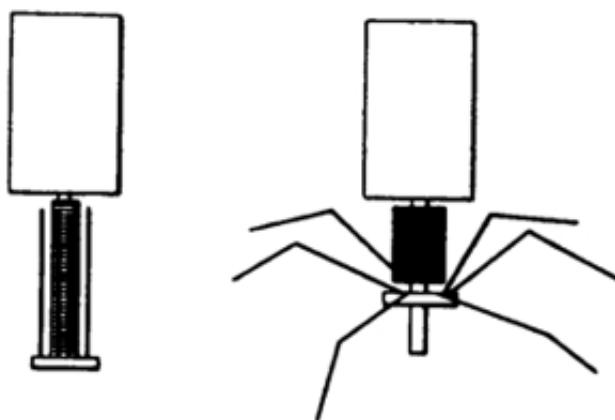
De manera que el hecho de unir el ácido nucleico y la proteína para formar un virus no da como resultado la creación de vida de una materia inerte; la vida ya está allí en forma de ácido nucleico. La proteína sirve simplemente para proteger el ácido nucleico contra la acción de enzimas hidrolizantes («nucleasas») en el ambiente y para ayudarle a actuar con mayor eficiencia en su tarea de infección y reproducción. Podemos comparar la fracción de ácido nucleico a un hombre y la fracción proteína a un automóvil. La combinación facilita el trabajo de viajar de un sitio a otro. El automóvil jamás podría hacer el viaje por sí mismo. El hombre podría hacerlo a pie (y ocasionalmente lo hace), pero el automóvil representa una gran ayuda.

La información más clara y detallada del mecanismo por el cual los virus infectan una célula procede de los estudios sobre los virus denominados, bacteriófagos, descubiertos, por vez primera, por el bacteriólogo inglés Frederick William Twort, en 1915 y, de forma independiente, por el bacteriólogo canadiense Felix Hubert d'Hérelle, en 1917. Cosa extraña, estos virus son gérmenes que van a la caza de

gérmenes, principalmente bacterias. D'Hérelle les adjudicó el nombre de «bacteriófagos», del griego «devorador de bacteria».

Los bacteriófagos se prestan maravillosamente al estudio, porque pueden ser cultivados en un tubo de ensayo juntamente con los que los albergan. El proceso de infección y multiplicación procede como a continuación se indica.

Un bacteriófago típico (comúnmente llamado «fago» por quienes trabajan con el animal de rapiña) tiene la forma de un diminuto renacuajo, con una cabeza romana y una cola. Con el microscopio electrónico, los investigadores han podido ver que el fago lo primero que hace es apoderarse de la superficie de una bacteria con su cola. Cabe suponer que lo hace así porque el tipo de carga eléctrica en la punta de la cofa (determinada por aminoácidos cargados) se adapta al tipo de carga en ciertas porciones de la superficie de la bacteria. La configuración de las cargas opuestas que se atraen, en la cola y en la superficie de la bacteria, se adaptan en forma tan perfecta que se unen algo así como con el clic de un perfecto engranaje. Una vez que el virus se ha adherido a su víctima con la punta de su cola, practica un diminuto orificio en la pared de la célula, quizás por mediación de una enzima que hiende las moléculas en aquel punto. Por lo que puede distinguirse con el microscopio electrónico, allí nada está sucediendo. El fago, o al menos su caparazón visible, permanece adherido a la parte exterior de la bacteria. Dentro de la célula bacterial tampoco existe actividad visible. Pero al cabo de veinte minutos la célula se abre derramando hasta 200 virus completamente desarrollados.



*Modelo de bacteriófago T-2, un virus con forma de renacuajo que se alimenta de otros gérmenes, en su forma «cerrada» (izquierda). Y «abierta» (derecha).*

Es evidente que tan sólo el caparazón de la proteína del virus atacante permanece fuera de la célula. El ácido nucleico contenido dentro del caparazón del virus se derrama dentro de la bacteria a través del orificio practicado en su pared por la proteína. El bacteriólogo americano Alfred Day Hershey demostró por medio de rastreadores radiactivos que la materia invasora es tan sólo ácido nucleico sin mezcla alguna visible de proteína. Marcó los fagos con átomos de fósforo y azufre radiactivos (cultivándolos en bacterias a la que se incorporaron esos radioisótopos por medio de su alimentación). Ahora bien, tanto las proteínas como los ácidos nucleicos tienen fósforo, pero el azufre sólo aparecerá en las proteínas, ya que el ácido nucleico no lo contiene.

Por tanto, si un fago marcado con ambos rastreadores invadiera una bacteria y su progenie resultara con fósforo radiactivo, pero no con radioazufre, el experimento indicaría que el virus paterno del ácido nucleico había entrado en la célula, pero no así la proteína. La ausencia de azufre radiactivo indicaría que todas las proteínas de la progenie del virus fueron suministradas por la bacteria que lo albergaba. De hecho, el experimento dio este último resultado; los nuevos virus contenían fósforo radiactivo (aportado por el progenitor), pero no azufre radiactivo.

Una vez más quedó demostrado el papel predominante del ácido nucleico en el proceso de la vida. Aparentemente, tan sólo el ácido nucleico del fago se había introducido en la bacteria y una vez allí dirigió la formación de nuevos virus -con proteína y todo- con las materias contenidas en la célula. Ciertamente, el virus de la patata, huso tuberculoso, cuya pequeñez es insólita, parece ser ácido nucleico sin envoltura proteínica.

Por otra parte, es posible que el ácido nucleico no fuera absolutamente vital para producir los efectos de un virus. En 1967 se descubrió que una enfermedad de la oveja, denominada «scrapie», tenía por origen unas partículas con un peso molecular de 700.000, es decir, considerablemente inferiores a cualquier otro virus conocido, y, lo que es más importante, carentes de ácido nucleico. La partícula puede ser un «represor», que altera la acción del gen en la célula hasta el punto de promover su propia formación. Así, el invasor no sólo utiliza para sus propios designios las enzimas de la célula, sino incluso los genes. Esto tiene fundamental

importancia para el hombre debido al hecho de que la enfermedad humana denominada esclerosis múltiple puede estar relacionada con la «scrapie».

## Inmunidad

Los virus constituyen los enemigos más formidables del hombre, sin contar el propio hombre. En virtud de su íntima asociación con las propias células del cuerpo, los virus se han mostrado absolutamente invulnerables al ataque de los medicamentos o a cualquier otra arma artificial, y aún así, el hombre ha sido capaz de resistir contra ellos, incluso en las condiciones más desfavorables. El organismo humano está dotado de impresionantes defensas contra la enfermedad.

Analicemos la peste negra, la gran plaga del siglo XIV. Atacó a una Europa que vivía en una aterradora suciedad, carente de cualquier concepto moderno de limpieza e higiene, sin instalación de cañerías de desagüe, sin forma alguna de tratamiento médico razonable, una población aglutinada e indefensa. Claro que la gente podía huir de las aldeas infestadas, pero el enfermo fugitivo tan sólo servía para propagar las epidemias más lejos y con mayor rapidez. Pese a todo ello, tres cuartas partes de la población resistieron con éxito los ataques de la infección. En tales circunstancias, lo realmente asombroso no fue que muriera uno de cada cuatro, sino que sobrevivieran tres de cada cuatro.

Es evidente que existe eso que se llama la resistencia natural frente a cualquier enfermedad. De un número de personas expuestas gravemente a una enfermedad contagiosa, algunos la sufren con carácter relativamente débil, otros enferman de gravedad y un cierto número muere. Existe también lo que se denomina inmunidad total, a veces congénita y otras adquirida. Por ejemplo, un solo ataque de sarampión, paperas o varicela, deja por lo general inmune a una persona para el resto de su vida frente a aquella determinada enfermedad.

Y resulta que esas tres enfermedades tienen su origen en un virus. Y, sin embargo, se trata de infecciones relativamente de poca importancia, rara vez fatales. Corrientemente, el sarampión produce tan sólo síntomas ligeros, al menos en los niños. ¿Cómo lucha el organismo contra esos virus, fortificándose luego de forma que, si el virus queda derrotado, jamás vuelve a atacar? La respuesta a esa

pregunta constituye un impresionante episodio de la moderna ciencia médica, y para iniciar el relato hemos de retroceder a la conquista de la viruela.

Hasta finales del siglo XVIII, la viruela era una enfermedad particularmente temible, no sólo porque resultaba con frecuencia fatal, sino también porque aquellos que se recuperaban quedaban desfigurados de modo permanente. Si el caso era leve, dejaba marcado el rostro; un fuerte ataque podía destruir toda belleza e incluso toda huella de humanidad. Un elevado porcentaje de la población ostentaba en sus rostros la marca de la viruela. Y quienes aún no la habían sufrido vivían con el constante temor de verse atacados por ella.

En el siglo XVII, la gente, en Turquía, empezó a infectarse voluntariamente y de forma deliberada de viruela con la esperanza de hacerse inmunes a un ataque grave.

Solían arañarse con el suero de ampollas de una persona que sufriera un ataque ligero. A veces producían una ligera infección, otras la desfiguración o la muerte que trataran de evitar. Era una decisión arriesgada, pero nos da una idea del horror que se sentía ante dicha enfermedad el hecho de que la gente estuviera dispuesta a arriesgar ese mismo horror para poder huir de él.

En 1718, la famosa beldad Lady Mary Wortley Montagu tuvo conocimiento de dicha práctica durante su estancia en Turquía, acompañando a su marido enviado allí por un breve período como embajador británico, e hizo que inocularan a sus propios hijos. Pasaron la prueba sin sufrir daño. Pero la idea no arraigó en Inglaterra, quizás, en parte, porque se consideraba a Lady Montagu notablemente excéntrica. Un caso similar, en Ultramar, fue el de Zabdiel Boylston, médico americano. Durante una epidemia de viruela en Boston, inoculó a doscientas cuarenta y una personas, de las que seis murieron. Fue víctima, por ello, de considerables críticas. En Gloucestershire, alguna gente del campo tenía sus propias ideas con respecto a la forma de evitar la viruela. Creían que un ataque de vacuna, enfermedad que atacaba a las vacas y, en ocasiones, a las personas, haría inmune a la gente, tanto frente a la vacuna como a la viruela. De ser verdad resultaría maravilloso, ya que la vacuna rara vez producía ampollas y apenas dejaba marcas. Un médico de Gloucestershire, el doctor Edward Jenner, decidió que acaso hubiera algo de verdad en la «superstición» de aquellas gentes. Observó que las lecheras tenían particular

predisposición a contraer la vacuna y también, al parecer, a no sufrir las marcas de la viruela. (Quizá la moda en el siglo XVIII de aureolar de romanticismo a las hermosas lecheras se debiera al hecho del limpio cutis de éstas, que resultaba realmente bello en un mundo marcado por las viruelas.) ¿Era posible que la vacuna y la viruela fueran tan semejantes, que una defensa constituida por el organismo contra la vacuna lo protegiera también contra la viruela? El doctor Jenner empezó a ensayar esa idea con gran cautela (probablemente haciendo experimentos, en primer lugar, con su propia familia). En 1796, se arriesgó a realizar la prueba suprema. Primero inoculó a un chiquillo de ocho años, llamado James Phipps, con vacuna, utilizando fluido procedente de una ampolla de vacuna en la mano de una lechera. Dos meses más tarde se presentó la parte crucial y desesperada del experimento. Jenner inoculó deliberadamente al pequeño James con la propia viruela.

El muchacho no contrajo la enfermedad. Había quedado inmunizado.

Jenner designó el proceso con el nombre de «vacunación», del latín *vaccinia*, nombre que se da a la vacuna. La vacunación se propagó por Europa como un incendio. Constituye uno de los raros casos de una revolución en la Medicina adoptada con facilidad y casi al instante, lo que da perfecta idea del pánico que inspiraba la viruela y la avidez del público por probar cualquier cosa prometedora de evasión. Incluso la profesión médica presentó tan sólo una débil oposición a la vacunación... aún cuando sus líderes ofrecieron cuanta resistencia les fue posible. Cuando, en 1813, se propuso la elección de Jenner para el Colegio Real de Médicos de Londres, se le denegó la admisión con la excusa de que no poseía conocimientos suficientes sobre Hipócrates y Galeno.

Hoy día, la viruela ha sido prácticamente desterrada de los países civilizados, aunque el terror que sigue inspirando sea tan fuerte como siempre. La comunicación de un solo caso en cualquier ciudad importante basta para catapultar virtualmente a toda la población hacia las clínicas a fin de someterse a revacunación.

Durante más de siglo y medio, los intentos por descubrir inoculaciones similares para otras enfermedades graves no dieron resultado alguno. Pasteur fue el primero en dar el siguiente paso hacia delante. Descubrió, de manera más o menos

accidental, que podía transformar una enfermedad grave en benigna, mediante la debilitación del microbio que la originaba.

Pasteur trabajaba en una bacteria que causaba el cólera a los pollos. Concentró una preparación tan virulenta, que una pequeña dosis inyectada bajo la piel de un pollo lo mataba en un día. En una ocasión utilizó un cultivo que llevaba preparado una semana. Esta vez, los pollos enfermaron sólo ligeramente, recuperándose luego.

Pasteur llegó a la conclusión de que el cultivo se había estropeado y preparó un nuevo y virulento caldo. Pero su nuevo cultivo no mató a los pollos que se habían recuperado de la dosis de bacteria «estropeada». Era evidente que la infección con la bacteria debilitada había dotado a los pollos con una defensa contra las nuevas y virulentas bacterias.

En cierto modo, Pasteur había producido una «vacuna» artificial, para aquella «viruela» especial. Admitió la deuda filosófica que tenía con Jenner, denominando también vacunación a su procedimiento, aún cuando nada tenía que ver con la «vacuna». Desde entonces se ha generalizado el término para significar inoculaciones contra cualquier enfermedad, y la preparación utilizada a tal fin se llama «vacuna».

Pasteur desarrolló otros métodos para debilitar (o «atenuar») los agentes de la enfermedad. Por ejemplo, descubrió que cultivando la bacteria del ántrax a altas temperaturas se producía una cadena debilitada capaz de inmunizar a los animales contra la enfermedad. Hasta entonces, el ántrax había sido tan desesperadamente fatal y contagioso que tan pronto como una res caía víctima de él, había que matar y quemar a todo el rebaño.

Sin embargo, el mayor triunfo de Pasteur fue sobre el virus de la enfermedad llamada hidrofobia o «rabia» (del latín *rabies*, debido a que la enfermedad atacaba al sistema nervioso, produciendo síntomas similares a los de la locura). Una persona mordida por un perro rabioso, al cabo de un período de incubación de uno o dos meses, era atacada por síntomas violentos, falleciendo casi invariablemente de muerte horrible.

Pasteur no lograba localizar a un microbio visible como agente de la enfermedad (desde luego, nada sabía sobre virus), de manera que tenía que utilizar animales vivos para cultivarlo. Acostumbraba a inyectar el fluido de infecciones en el cerebro

de un conejo, lo dejaba incubar, machacaba la médula espinal, inyectaba el extracto en el cerebro de otro conejo, y así sucesivamente. Pasteur atenuaba sus preparados, dejándolos madurar y poniéndolos a prueba de manera continua hasta que el extracto ya no podía provocar la enfermedad en un conejo. Entonces inyectó el virus atenuado en un perro, que sobrevivió. Al cabo de cierto tiempo infectó al perro con hidrofobia en toda su virulencia, descubriendo que el animal estaba inmunizado.

En 1885, le llegó a Pasteur la oportunidad de intentar la curación de un ser humano. Le llevaron a un muchacho de nueve años, Joseph Maister, a quien mordiera gravemente un perro rabioso. Con vacilación y ansiedad considerables. Pasteur sometió al muchacho a inoculaciones cada vez menos atenuadas, esperando crear una resistencia antes de transcurrido el período de incubación. Triunfó. Al menos, el muchacho sobrevivió. (Meister se convirtió en el conserje del «Instituto Pasteur», y en 1940 se suicidó al ordenarle los militares nazis, en París, que abriera la tumba de Pasteur.)

En 1890, un médico militar alemán llamado Emil von Behring, que trabajaba en el laboratorio de Koch, puso a prueba otra idea. ¿Por qué correr el riesgo de inyectar el propio microbio, incluso en forma atenuada, en un ser humano? Sospechando que el agente de la enfermedad pudiera dar origen a que el organismo fabricara alguna sustancia defensiva, ¿no sería lo mismo infectar a un animal con el agente, extraer la sustancia defensiva que produjera e inyectarla en el paciente humano? Von Behring descubrió que su idea daba resultado. La sustancia defensiva se integraba en el suero sanguíneo, y Von Behring la denominó «antitoxina». Logró producir en los animales antitoxinas contra el tétanos y la difteria.

Su primera aplicación de la antitoxina diftérica a un niño que padecía dicha enfermedad obtuvo un éxito tan sensacional que se adoptó inmediatamente el tratamiento, logrando reducir en forma drástica el índice de mortandad por difteria. Paul Ehrlich (que más tarde descubriría la «bala mágica» para la sífilis) trabajaba con Von Behring y fue él quien probablemente calculó las dosis apropiadas de antitoxina. Más adelante, separóse de Von Behring (Ehrlich era un individuo irascible, que fácilmente se enemistaba con cualquiera) y prosiguió trabajando solo, con todo detalle, en la terapéutica racional del suero. Von Behring recibió el premio

Nobel de Medicina y Fisiología en 1901, el primer año que fue concedido. Ehrlich también fue galardonado con el Premio Nobel en 1908, juntamente con el biólogo ruso Meshnikov.

La inmunidad que confiere una antitoxina dura tan sólo mientras ésta permanece en la sangre. Pero el bacteriólogo francés Gaston Ramón descubrió que, tratando la toxina de la difteria o del tétanos con formaldehído o calor, podía cambiar su estructura de tal forma que la nueva sustancia (denominada «toxoide») podía inyectarse sin peligro alguno al paciente humano, en cuyo caso la antitoxina producida por el propio paciente dura más que la procedente de un animal; además, pueden inyectarse nuevas dosis del toxoide siempre que sea necesario para renovar la inmunidad. Una vez introducido el toxoide en 1925, la difteria dejó de ser una aterradora amenaza.

También se utilizaron las reacciones séricas para descubrir la presencia de la enfermedad. El ejemplo más conocido es el de la «prueba de Wasserman», introducida por el bacteriólogo alemán August von Wasserman en 1906, para descubrir la sífilis. Estaba basada en técnicas desarrolladas primeramente por un bacteriólogo belga, Jules Bordet, quien trabajaba con fracciones de suero que llegaron a ser denominadas «complemento». En 1919, Bordet recibió por su trabajo el premio Nobel de Medicina y Fisiología.

La lucha laboriosa de Pasteur con el virus de la rabia demostró la dificultad de tratar con los virus. Las bacterias pueden cultivarse, manipularse y atenuarse por medios artificiales en el tubo de ensayos. Esto no es posible con el virus; sólo pueden cultivarse sobre tejido vivo. En el caso de la viruela, los anfitriones vivos para la materia experimental (el virus de la vacuna) fueron las vacas y las lecheras. En el caso de la rabia, Pasteur recurrió a conejos. Pero, en el mejor de los casos, los animales vivos constituyen un medio difícil, caro y exigen gran pérdida de tiempo como medio para cultivar microorganismos.

En el primer cuarto de este siglo, el biólogo francés, Alexis Carrel, obtuvo considerable fama con un hecho que demostró poseer inmenso valor para la investigación médica... la conservación en tubos de ensayo de trocitos de tejidos vivos. Carrel llegó a interesarse por este tipo de investigación a través de su trabajo como cirujano. Desarrolló nuevos métodos de trasplante de vasos sanguíneos y

órganos de animales, por cuyos trabajos recibió, en 1912, el premio Nobel de Medicina y Fisiología. Naturalmente, tenía que mantener vivo el órgano extraído mientras se preparaba a trasplantarlo. Desarrolló un sistema para alimentarlo que consistía en bañar el tejido con sangre y suministrar los diversos extractos e iones. Como contribución incidental, Carrel desarrolló, con la ayuda de Charles Augustus Lindbergh, un «corazón mecánico» rudimentario para bombear la sangre a través del tejido. Fue la vanguardia de los «corazones», «pulmones» y «riñones» artificiales cuyo uso se ha hecho habitual en cirugía.

Los procedimientos de Carrel eran lo bastante buenos para mantener vivo durante treinta y cuatro años un trozo de corazón de un pollo embrionario... una vida mucho más larga que la del propio pollo. Carrel intentó incluso utilizar sus cultivos de tejidos para desarrollar virus... y en cierto modo lo logró. La única dificultad consistía en que también crecía la bacteria en los tejidos y había que adoptar unas precauciones asépticas tan extremadas con el fin de mantener los virus puros, que resultaba más fácil recurrir a animales.

No obstante, la idea del embrión de pollo parecía la más acertada, por así decirlo. Mejor que sólo un trozo de tejido sería un todo... el propio embrión de pollo. Se trata de un organismo completo, protegido por la cáscara del huevo y equipado con sus propias defensas naturales contra la bacteria. También es barato y fácil de adquirir en cantidad. Y en 1931, el patólogo Ernest W. Goodpasture y sus colaboradores de la Universidad Vanderbilt lograron trasplantar un virus dentro de un embrión del pollo. Por vez primera pudieron cultivarse virus puros casi tan fácilmente como las bacterias.

En 1937 se logró la primera conquista médica de verdadera trascendencia con el cultivo de virus en huevos fértiles. En el Instituto Rockefeller, los bacteriólogos proseguían aún la búsqueda para una mayor protección contra el virus de la fiebre amarilla. Pese a todo, era imposible erradicar totalmente al mosquito y en los trópicos los monos infectados mantenían una reserva constante y amenazadora de la enfermedad. El bacteriólogo sudafricano Max Theiler, del Instituto, se dedicó a producir un virus atenuado de la fiebre amarilla. Hizo pasar el virus a través de doscientos ratones y cien embriones de pollo hasta obtener un mutante que, causando tan sólo leves síntomas, aún así proporcionaba la inmunidad absoluta

contra la fiebre amarilla. Por este logro, Theiler recibió, en 1951, el premio Nobel de Medicina y Fisiología.

Una vez en marcha, nada es superior al cultivo sobre placas de cristal, en rapidez, control de las condiciones y eficiencia. En los últimos años cuarenta, John Franklin Enders, Thomas Huckle Weller y Frederick Chapman Robbins, de la Facultad de Medicina de Harvard, volvieron al enfoque de Carrel. (Éste había muerto en 1944 y no sería testigo de su triunfo.) En esta ocasión disponían de un arma nueva y poderosa contra la bacteria contaminadora del tejido cultivado... los antibióticos. Incorporaron penicilina y estreptomicina al suministro de sangre que mantenía vivo el tejido y descubrieron que podían cultivar virus sin dificultad. Siguiendo un impulso, ensayaron con el virus de la poliomielitis. Asombrados, lo vieron florecer en aquel medio. Constituía la brecha por la que lograrían vencer a la polio, y los tres hombres recibieron, en 1954, el premio Nobel de Medicina y Fisiología.

En la actualidad puede cultivarse el virus de la poliomielitis en un tubo de ensayo en lugar de hacerla sólo en monos (que son sujetos de laboratorios caros y temperamentales). Así fue posible la experimentación a gran escala con el virus. Gracias a la técnica del cultivo de tejidos, Jonas E. Salk, de la Universidad de Pittsburgh, pudo experimentar un tratamiento químico del virus para averiguar que los virus de la polio, matados con formaldehído, pueden seguir produciendo reacciones inmunológicas en el organismo, permitiéndole desarrollar la hoy famosa vacuna Salk.

El importante índice de mortalidad alcanzado por la polio, su preferencia por los niños (hasta el punto de que ha llegado a denominársela «parálisis infantil»), el hecho de que parece tratarse de un azote moderno, sin (epidemias registradas con anterioridad a 1840 y, en particular, el interés mostrado en dicha enfermedad por su eminente víctima, Franklin D. Roosevelt, convirtió su conquista en una de las victorias más celebradas sobre una enfermedad en la historia de la Humanidad. Probablemente, ninguna comunicación médica fue acogida jamás con tanto entusiasmo como el informe, emitido en 1955 por la comisión evaluadora declarando efectiva la vacuna Salk. Desde luego, el acontecimiento merecía tal celebración, mucho más de lo que lo merecen la mayor parte de las representaciones que incitan a la gente a agolparse y tratar de llegar los primeros.

Pero la ciencia no se nutre del enloquecimiento o la publicidad indiscriminada. El apresuramiento en dar satisfacción a la presión pública por la vacuna motivó que se pusieran en circulación algunas muestras defectuosas, generadoras de la polio, y el furor que siguió al entusiasmo hizo retroceder al programa de vacunación contra la enfermedad.

Sin embargo, ese retroceso fue subsanado y la vacuna Salk se consideró efectiva y, debidamente preparada, sin peligro alguno. En 1957, el microbiólogo polaco-americano Albert Bruce Sabin dio otro paso adelante. No utilizó virus muerto, que de no estarlo completamente puede resultar peligroso, sino una cadena de virus vivos incapaces de producir la enfermedad por sí misma, pero capaces de establecer la producción de anticuerpos apropiados. Esta «vacuna Sabin» puede, además, tomarse por vía oral, no requiriendo, por tanto, la inyección. La vacuna Sabin fue adquiriendo popularidad, primero en la Unión Soviética y posteriormente en los países europeos del Este; en 1960, se popularizó también su empleo en los Estados Unidos, extinguiéndose así el temor a la poliomielitis.

Pero, exactamente, ¿cómo actúa una vacuna? La respuesta a esta pregunta puede darnos algún día la clave química de la inmunidad.

Durante más de medio siglo, los biólogos han considerado como «anticuerpos» las principales defensas del organismo contra la infección. (Desde luego, también están los glóbulos blancos llamados «fagocitos» que devoran las bacterias. Esto lo descubrió, en 1883, el biólogo ruso Ilia Ilich Meshnikov, que más tarde sucedería a Pasteur como director del Instituto Pasteur de París y que en 1908 compartiera el premio Nobel de Medicina y Fisiología con Ehrlich. Pero los fagocitos no aportan ayuda alguna contra los virus y no parece que tomen parte en el proceso de inmunidad que estamos examinando.) A un virus, o, en realidad, a casi todas las sustancias extrañas que se introducen en la química del organismo, se les llama «antígenos». El anticuerpo es una sustancia fabricada por el cuerpo para luchar contra el antígeno específico. Pone a éste fuera de combate, combinándose con él. Mucho antes de que los químicos lograran dominar al anticuerpo, estaban casi seguros de que debía tratarse de proteínas. Por una parte, los antígenos más conocidos eran proteínas y era de presumir que únicamente una proteína lograría

dar alcance a otra. Tan sólo una proteína podía tener la necesaria estructura sutil para aislarse y combinar con un antígeno determinado.

En los primeros años de la década de 1920, Landsteiner (el descubridor de los grupos sanguíneos) realizó una serie de experimentos que demostraron claramente que los anticuerpos eran, en realidad, en extremo específicos. Las sustancias que utilizara para generar anticuerpos no eran antígenos, sino compuestos mucho más simples, de estructura bien conocida. Eran los llamados «ácidos arsanílicos», compuestos que contenían arsénico. En combinación con una proteína simple, como, por ejemplo, la albúmina de la clara de huevo, un ácido arsanílico actuaba como antígeno; al ser inyectado en un animal, originaba un anticuerpo en el suero sanguíneo. Además, dicho anticuerpo era específico para el ácido arsanílico; el suero sanguíneo del animal aglutinaría tan sólo la combinación arsanílico-albúmina y no únicamente la albúmina. Desde luego, en ocasiones puede hacerse reaccionar el anticuerpo nada más que con el ácido arsanílico, sin combinarlo con albúmina. Landsteiner demostró también que cambios muy pequeños en la estructura del ácido arsanílico se reflejarían en el anticuerpo. Un anticuerpo desarrollado por cierta variedad de ácido arsanílico no reaccionaría con una variedad ligeramente alterada. Landsteiner designó con el nombre de «haptenos» (del griego «haptō», que significa enlazar, anudar) aquellos compuestos tales como los ácidos arsanílicos que, al combinarse con proteínas, pueden dar origen a los anticuerpos. Es de presumir que cada antígeno natural tenga en su molécula una región específica que actúe como un hapteno. Según esta teoría, un germen o virus capaz de servir de vacuna es aquel cuya estructura se ha modificado suficientemente para reducir su capacidad de dañar las células, pero que aún continúa teniendo intacto su grupo de haptenos, de tal forma que puede originar la formación de un anticuerpo específico.

Sería interesante conocer la naturaleza química de los haptenos naturales. Si llegara a determinarse, quizá fuera posible utilizar un hapteno, tal vez en combinación con algunas proteínas inofensivas, en calidad de vacuna que originara anticuerpos para un antígeno específico. Con ello se evitaría la necesidad de recurrir a toxinas o virus atenuados, que siempre acarrean un cierto pequeño riesgo.

Aún no se ha determinado la forma en que un antígeno hace surgir un anticuerpo. Ehrlich creía que el organismo contiene normalmente una pequeña reserva de todos

los anticuerpos que pueda necesitar y que cuando un antígeno invasor reacciona con el anticuerpo apropiado, estimula al organismo a producir una reserva extra de ese anticuerpo determinado. Algunos inmunólogos aún siguen adhiriéndose a esta teoría o a su modificación, y, sin embargo, es altamente improbable que el cuerpo esté preparado con anticuerpos específicos para todos los antígenos posibles, incluyendo aquellas sustancias no naturales, como los ácidos arsanílicos.

La otra alternativa sugerida es la de que el organismo posee alguna molécula proteínica generalizada, capaz de amoldarse a cualquier antígeno. Entonces el antígeno actúa como patrón para modelar el anticuerpo específico formado por reacción a él. Pauling expuso dicha teoría en 1940. Sugirió que los anticuerpos específicos son variantes de la misma molécula básica, plegada simplemente de distintas formas. En otras palabras, se moldea el anticuerpo para que se adapte a su antígeno como un guante se adapta a la mano.

Sin embargo, en 1969, los progresos en el análisis de las proteínas permitieron que un equipo dirigido por Gerald M. Edelman determinara la estructura aminoácida de un anticuerpo típico compuesto por más de mil aminoácidos. Sin duda, esto allanará el camino para descubrir de qué modo trabajan esas moléculas, algo que aún no conocemos bien.

En cierta forma, la propia especificidad de los anticuerpos constituye una desventaja. Supongamos que un virus se transforma de tal modo que su proteína adquiere una estructura ligeramente diferente. A menudo, el antiguo anticuerpo del virus no se adaptará a la nueva estructura. Y resulta que la inmunidad contra una cepa de virus no constituye una salvaguardia contra otra cepa. El virus de la gripe y del catarro común muestran particular propensión a pequeñas transformaciones, y ésta es una de las razones de que nos veamos atormentados por frecuentes recaídas de dichas enfermedades. En particular, la gripe desarrolla ocasionalmente una variación de extraordinaria virulencia, capaz de barrer a un mundo sorprendido y no inmunizado. Esto fue lo que ocurrió en 1918 y con resultados mucho menos fatales con la «gripe asiática» pandémica de 1957.

Un ejemplo aún más fastidioso de la extraordinaria eficiencia del organismo para formar anticuerpos es su tendencia a producirlos incluso contra proteínas indefensas que suelen introducirse en el cuerpo. Entonces, el organismo se vuelve «sensitivo»

a esas mismas proteínas y puede llegar a reaccionar violentamente ante cualquier incursión ulterior de esas proteínas inocuas en su origen. La reacción puede adoptar la forma de picazón, lágrimas, mucosidades en la nariz y garganta, asma y así sucesivamente. «Reacciones alérgicas» semejantes pueden provocarlas el polen de ciertas plantas (como el de la fiebre del heno), determinados alimentos, el pelo o caspa de animales, y otras muchas cosas. La reacción alérgica puede llegar a ser lo suficientemente aguda para originar graves incapacidades o incluso la muerte. Por el descubrimiento de ese «shock anafiláctico», el fisiólogo francés Charles Robert Richet obtuvo el premio Nobel de Medicina y Fisiología, en 1913.

En cierto sentido, cada ser humano es más o menos alérgico a todos los demás seres humanos. Un trasplante o un injerto de un individuo a otro no prenderá porque el organismo del receptor considera como una proteína extraña el tejido transplantado y fabrica contra él anticuerpos. El único injerto de una persona a otra capaz de resultar efectivo es entre dos gemelos idénticos. Como su herencia idéntica les proporciona exactamente las mismas proteínas, pueden intercambiar tejidos e incluso un órgano completo, como, por ejemplo, un riñón.

El primer trasplante de riñón efectuado con éxito tuvo lugar en Boston (en diciembre de 1954) entre dos hermanos gemelos. El receptor murió en 1962, a los treinta años de edad, por una coronariopatía. Desde entonces, centenares de individuos han vivido durante meses e incluso años con riñones transplantados de otros, y no precisamente hermanos gemelos.

Se han hecho tentativas para trasplantar nuevos órganos, tales como pulmones o hígado, pero lo que verdaderamente captó el interés público fue el trasplante de corazón. Los primeros trasplantes de corazón fueron realizados, con moderado éxito, por el cirujano sudafricano Christiaan Barnard en diciembre de 1967. El afortunado receptor, Philip Blaiberg -un dentista jubilado de Sudáfrica-, vivió durante muchos meses con un corazón ajeno.

Después de aquel suceso, los trasplantes de corazón hicieron furor, pero este exagerado optimismo decayó considerablemente a fines de 1969. Pocos receptores disfrutaron de larga vida, pues el rechazo de los tejidos pareció plantear problemas gigantescos, pese a los múltiples intentos para vencer esa resistencia del organismo a aceptar tejidos extraños.

El bacteriólogo australiano Macfarlane Burnet opinó que se podría «inmunizar» el tejido embrionario con respecto a los tejidos extraños, y entonces el animal en libertad toleraría los injertos de esos tejidos. El biólogo británico Peter Medawar demostró la verosimilitud de tal concepto empleando embriones de ratón. Se recompensó a ambos por estos trabajos con el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1960.

En 1962, un inmunólogo franco-australiano, Jacques Francis-Albert-Pierre Miller, que trabajaba en Inglaterra, fue aún más lejos y descubrió el motivo de esa capacidad para laborar con embriones al objeto de permitir la tolerancia en el futuro. Es decir, descubrió que el timo (una glándula cuya utilidad había sido desconocida hasta entonces) era precisamente el tejido capaz de formar anticuerpos. Cuando se extirpaba el timo a un ratón recién nacido, el animal moría tres o cuatro meses después, debido a una incapacidad absoluta para protegerse contra el medio ambiente. Si se permitía que el ratón conservara el timo durante tres semanas, se observaba que ese plazo era suficiente para el desarrollo de células productoras de anticuerpos y entonces se podía extirpar la glándula sin riesgo alguno. Aquellos embriones en los que el timo no ha realizado todavía su labor, pueden recibir un tratamiento adecuado que les «enseñe» a tolerar los tejidos extraños. Tal vez sea posible algún día mejorar, mediante el timo, la tolerancia de los tejidos cuando se estime conveniente y quizás incluso en los adultos.

No obstante, aún cuando se supere el problema del rechazo, persistirán todavía otros problemas muy serios. Al fin y al cabo, cada persona que se beneficie de un órgano vivo deberá recibirla de alguien dispuesto a donarlo, y entonces surge esta pregunta: ¿Cuándo es posible afirmar que el donante potencial está «suficientemente muerto» para ceder sus órganos? A este respecto quizás fuera preferible preparar órganos mecánicos que no implicaran el rechazo del tejido ni las espinosas disyuntivas éticas. Los riñones artificiales probaron su utilidad práctica por los años cuarenta, y hoy día los pacientes con insuficiencia en su funcionalismo renal natural pueden visitar el hospital una o dos veces por semana, para purificar su sangre. Es una vida de sacrificio para quienes tienen la suerte de recibir tal servicio, pero siempre es preferible a la muerte.

En la década de 1940, los investigadores descubrieron que las reacciones alérgicas son producidas por la liberación de pequeñas cantidades de una sustancia llamada «histamina» en el torrente sanguíneo. Esto condujo a la búsqueda, con éxito, de «antihistaminas» neutralizantes, capaces de aliviar los síntomas alérgicos, aunque sin curar, desde luego, la alergia. La primera antihistamina eficaz la obtuvo en 1937 en el Instituto Pasteur de París, un químico suizo, Daniel Bovet, quien, por ésta y ulteriores investigaciones en Quimioterapia, fue galardonado con el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1957.

Al observar que la secreción nasal y otros síntomas alérgicos eran muy semejantes a los del catarro común, algunos laboratorios farmacéuticos decidieron que lo que era eficaz para unos lo sería para el otro, y en 1949 y 1950 inundaron el mercado de tabletas antihistamínicas. (Resultó que dichas tabletas aliviaban poco o nada los resfriados, por lo que su popularidad disminuyó.) En 1937, gracias a las técnicas electroforéticas para aislar proteínas, los biólogos descubrieron, finalmente, el enclave físico de los anticuerpos en la sangre. Éstos se encontraban localizados en la fracción sanguínea denominada «gammaglobulina».

Hace tiempo que los médicos tenían conciencia de que algunos niños eran incapaces de formar anticuerpos, por lo cual resultaban presa fácil de la infección. En 1951, algunos médicos del Walter Reed Hospital de Washington realizaron un análisis electroforético del plasma de un niño de ocho años que sufría una septicemia grave («envenenamiento de la sangre») y, asombrados, descubrieron que en la sangre del paciente no había rastro alguno de gammaglobulina. Rápidamente fueron surgiendo otros casos. Los investigadores comprobaron que dicha carencia era debida a un defecto congénito en su metabolismo, que priva al individuo de la capacidad para formar gammaglobulina; a este defecto se le denominó «agammaglobulinemia». Estas personas son incapaces de desarrollar inmunidad frente a las bacterias. Sin embargo, ahora puede mantenérselas con vida gracias a los antibióticos. Pero lo que aún resulta más sorprendente es que *sean* capaces de hacerse inmunes a las infecciones víricas, como el sarampión y la varicela, una vez que han padecido dichas enfermedades. Al parecer, los anticuerpos no constituyen las únicas defensas del organismo contra los virus.

En 1957, un grupo de bacteriólogos británicos, a la cabeza del cual se encontraba Alick Isaacs, demostraron que las células, con el estímulo de una invasión de virus, liberaban una proteína de amplias propiedades antivíricas. No sólo combatía al virus origen de la infección presente, sino también a otros. Esta proteína, llamada interferón, se produce con mucha mayor rapidez que los anticuerpos y tal vez explique las defensas antivirus de quienes padecen la agammaglobulinemia. Aparentemente, su producción es estimulada por la presencia de ARN en la variedad hallada en los virus. El interferón parece dirigir la síntesis de un ARN mensajero que produce una proteína antivírica que inhibe la producción de proteína vírica, aunque no de otras formas de proteínas. El interferón parece ser tan potente como los antibióticos y no activa ninguna resistencia. Sin embargo, es específico de las especies. Sólo pueden aplicarse interferones de seres humanos, o de otros primates al organismo humano.

## Cáncer

A medida que disminuye el peligro de las enfermedades infecciosas, aumenta la incidencia de otros tipos de enfermedades. Mucha gente, que hace un siglo hubiera muerto joven de tuberculosis o difteria, de pulmonía o tifus, hoy día viven el tiempo suficiente para morir de dolencias cardíacas o de cáncer. Ésa es la razón de que las enfermedades cardíacas y el cáncer se hayan convertido en el asesino número uno y dos, respectivamente, del mundo occidental. De hecho, el cáncer ha sucedido a la peste y a la viruela como plaga que azota al hombre. Es una espada que pende sobre todos nosotros, dispuesta a caer sobre cualquiera sin previo aviso ni misericordia. Todos los años mueren de cáncer trescientos mil americanos, mientras cada semana se registran diez mil nuevos casos. El riesgo de incidencia era del 50 % en 1900.

En realidad, el cáncer constituye un grupo de muchas enfermedades (se conocen alrededor de trescientos tipos), que afectan de distintas formas a diversas partes del organismo. Pero la perturbación primaria consiste siempre en lo mismo: desorganización y crecimiento incontrolado de los tejidos afectados. El nombre cáncer (palabra latina que significa «cangrejo») procede del hecho de que

Hipócrates y Galeno suponían que la enfermedad hacía estragos a través de las venas enfermas como las extendidas y crispadas patas de un cangrejo.

«Tumor» (del latín «crecimiento») no es en forma alguna sinónimo de cáncer; responde tanto a crecimientos inofensivos, como verrugas y lunares («tumores benignos»), como al cáncer («tumores malignos»). Los cánceres se designan en forma muy variada de acuerdo con el tejido al que afectan. A los cánceres de la piel o del epitelio intestinal (los malignos más comunes) se les llama «carcinomas» (de un vocablo griego que significa «cangrejo»); a los cánceres del tejido conjuntivo se les denomina «sarcomas»; a los del hígado, «hepatoma»; a los de las glándulas en general, «adenomas»; a los de los leucocitos, «leucemia», y así sucesivamente.

Rudolf Virchow, de Alemania, el primero en estudiar los tejidos cancerosos con un microscopio, creía que el cáncer lo causaba la irritación y colapso del ambiente exterior. Es una creencia natural, porque son precisamente aquellas partes del cuerpo más expuestas al mundo exterior las que más sufren de cáncer. Pero al popularizarse la teoría del germen de las enfermedades, los patólogos empezaron a buscar algún microbio que causara el cáncer. Virchow, tenaz adversario de la teoría del germen de las enfermedades, se aferró a la de la irritación. (Abandonó la Patología por la Arqueología y la Política cuando se hizo evidente que iba a imperar la teoría del germen de las enfermedades. En la Historia, pocos científicos se han hundido con el barco de sus creencias erróneas de forma tan absolutamente drástica.) Si Virchow se mostró tenaz por un motivo equivocado, pudo haberlo sido por la verdadera razón. Han ido presentándose pruebas crecientes de que algunos ambientes son particularmente inductores del cáncer. Durante el siglo XVIII se descubrió que los deshollinadores eran más propensos al cáncer de escroto que otras personas. Después de descubrirse los tintes de alquitrán de hulla, aparecieron unas incidencias superiores al promedio normal entre los trabajadores de las industrias de tintes, a causa de cáncer de piel y de vejiga. Parecía existir algún elemento en el hollín y en los tintes de anilina capaz de producir cáncer. Y entonces, en 1915, dos científicos japoneses. K. Yamagiwa y K. Ichikawa, descubrieron que cierta partícula del alquitrán de hulla podía producir cáncer en conejos si se les aplicaba en las orejas durante largos períodos.

En el año 1930, dos químicos británicos indujeron cáncer en animales con un producto químico sintético llamado «dibenzantraceno» (un hidrocarburo con una molécula formada por cinco cadenas de benceno). Esto no aparecía en el alquitrán de hulla, pero tres años después se descubrió que el «benzopireno» (que contenía también cinco cadenas benceno, pero en diferente orden), elemento químico que sí que se da en el alquitrán de hulla, podía producir cáncer.

Hasta el momento han sido identificados un buen número de «carcinógenos» (productores de cáncer). Muchos son hidrocarburos formados por numerosas cadenas de benceno, como los dos primeros descubiertos. Algunos son moléculas relacionadas con los tintes de anilina. De hecho, una de las principales preocupaciones en el uso de colorantes artificiales en los alimentos es la posibilidad de que a la larga tales colorantes puedan ser carcinógenos.

Muchos biólogos creen que durante los últimos dos o tres siglos el hombre ha introducido nuevos factores productores de cáncer en su ambiente. Existe el uso creciente del carbón, el quemar gasolina a gran escala, especialmente gasolina en motores de explosión, la creciente utilización de productos químicos sintéticos en los alimentos, los cosméticos y así sucesivamente. Como es natural, el aspecto más dramático lo ofrecen los cigarrillos que, al menos según las estadísticas, parecen ir acompañados de un índice relativamente alto de incidencia de cáncer de pulmón.

Un factor ambiental sobre el que no existe la menor duda de su carácter carcinogénico lo constituye la radiación energética, y desde 1895, el hombre se ha visto expuesto en forma creciente a tales radiaciones.

El 5 de noviembre de 1895 el físico alemán Wilhelm Konrad Roentgen realizó un experimento para estudiar la luminiscencia producida por rayos catódicos. Para mejor observar el efecto, oscureció una habitación. Su tubo de rayos catódicos se encontraba encerrado en una caja negra de cartón. Al hacer funcionar el tubo de rayos catódicos, quedó sobresaltado al distinguir un ramalazo de luz procedente de alguna parte del otro lado de la habitación. El fogonazo procedía de una hoja de papel recubierta con platino-cianuro de bario, elemento químico luminiscente. ¿Era posible que la radiación procedente de la caja cerrada la hubiese hecho brillar? Roentgen cerró su tubo de rayos catódicos y el destello desapareció. Volvió a abrirlo y el destello reapareció. Se llevó el papel a la habitación contigua y aún seguía

brillando. Era evidente que el tubo de rayos catódicos producía cierta forma de radiación capaz de atravesar el cartón y las paredes.

Roentgen, que no tenía idea del tipo de radiación de que podía tratarse, lo denominó sencillamente «rayos X». Otros científicos trataron de cambiar la denominación por la de «rayos roentgen», pero su pronunciación resultaba tan difícil para quien no fuera alemán, que se mantuvo la de «rayos X». (Hoy día sabemos que los electrones acelerados que forman los rayos catódicos pierden gran parte de su celeridad al tropezar con una barrera metálica. La energía cinética perdida se convierte en radiación a la que se denomina *Bremsstrahlung*, voz alemana que significa «radiación frenada». Los rayos X son un ejemplo de dicha radiación.) Los rayos X revolucionaron la Física. Captaron la imaginación de los físicos, iniciaron un alud de experimentos, desarrollados en el curso de los primeros meses que siguieron al descubrimiento de la radiactividad y abrieron el mundo interior del átomo. Al iniciarse en 1901 el galardón de los premios Nobel, Roentgen fue el primero en recibir el premio de Física.

La fuerte radiación X inició también algo más: la exposición de los seres humanos a intensidades de radiaciones energéticas tales como el hombre jamás experimentara antes. A los cuatro días de haber llegado a Estados Unidos la noticia del descubrimiento de Roentgen, se recurrió a los rayos X para localizar una bala en la pierna de un paciente. Constituían un medio maravilloso para la exploración del interior del cuerpo humano. Los rayos X atraviesan fácilmente los tejidos blandos (constituidos principalmente por elementos de peso atómico bajo) y tienden a detenerse ante elementos de un peso atómico más elevado, como son los que constituyen los huesos (compuestos en su mayor parte por fósforo y calcio). Sobre una placa fotográfica colocada detrás del cuerpo, los huesos aparecen de un blanco nebuloso en contraste con las zonas negras donde los rayos X atraviesan con mayor intensidad, por ser mucho menor su absorción por los tejidos blandos. Una bala de plomo aparece de un blanco puro; detiene los rayos X en forma tajante.

Es evidente la utilidad de los rayos X para descubrir fracturas de huesos, articulaciones calcificadas, caries dentarias, objetos extraños en el cuerpo y otros muchos usos. Pero también resulta fácil hacer destacar los tejidos blandos mediante la introducción de la sal insoluble de un elemento pesado. Al tragarse sulfato de bario

se harán visibles el estómago o los intestinos. Un compuesto de yodo inyectado en las venas se dirigirá a los riñones y al uréter, haciendo destacarse ambos órganos, ya que el yodo posee un peso atómico elevado y, por tanto, se vuelve opaco con los rayos X.

Antes incluso del descubrimiento de los rayos X, un médico danés, Niels Ryberg Finsen, observó que las radiaciones de alta energía eran capaces de aniquilar microorganismos; utilizaba la luz ultravioleta para destruir las bacterias causantes del *Lupus vulgaris*, una enfermedad de la piel. (Por tal motivo, recibió, en 1903, el premio Nobel de Medicina y Fisiología.) Los rayos X resultaron ser aún más mortíferos. Eran capaces de matar el hongo de la tiña. Podían dañar o destruir las células humanas, llegando a ser utilizados para matar las células cancerosas fuera del alcance del bisturí del cirujano.

Pero también llegó a descubrirse, por amargas experiencias, que las radiaciones de alta energía podían *causar* el cáncer. Por lo menos un centenar de las primeras personas que manipularon con los rayos X y materiales radiactivos murieron de cáncer, produciéndose la primera muerte en 1902. De hecho, tanto Marie Curie como su hija Irene Joliot-Curie murieron de leucemia y es fácil suponer que la radiación contribuyó en ambos casos. En 1928, un investigador británico, G. W. M. Findlay, descubrió que incluso la radiación ultravioleta era lo suficientemente energética para producir el cáncer de piel en los ratones.

Resulta bastante razonable sospechar que la creciente exposición del hombre a la radiación energética (en forma de tratamiento médico por rayos X y así sucesivamente) pueda ser responsable de cierto porcentaje en el incremento de la incidencia de cáncer, y el futuro dirá si la acumulación en nuestros huesos de huellas del estroncio 90 procedente de la lluvia radiactiva aumentará la incidencia del cáncer óseo y de la leucemia.

¿Qué pueden tener en común los diversos carcinógenos, productos químicos, radiación y otros? Es razonable suponer que todos ellos son capaces de producir mutaciones genéticas y que el cáncer acaso sea el resultado de mutaciones en las células del cuerpo humano.

Supongamos que algún gen resulta modificado en forma tal que ya no pueda producir una enzima clave necesaria para el proceso que controla el crecimiento de

las células. Al dividirse una célula con ese gen defectuoso, transmitirá el defecto. Al no funcionar el mecanismo de control, puede continuar en forma indefinida la ulterior división de esas células, sin considerar las necesidades del organismo en su conjunto o ni siquiera las necesidades de los tejidos a los que afecta (por ejemplo, la especialización de células en un órgano). El tejido queda desorganizado. Se produce, por así decirlo, un caso de anarquía en el organismo.

Ha quedado bien establecido que la radiación energética puede producir mutaciones. ¿Y qué decir de los carcinógenos químicos? También ha quedado demostrado que los productos químicos producen mutaciones. Buen ejemplo de ello lo constituyen las «mostazas nitrogenadas».

Esos compuestos, como el «gas mostaza» de la Primera Guerra Mundial, producen quemaduras y ampollas en la piel semejantes a las causadas por los rayos X. También pueden dañar los cromosomas y aumentar el índice de mutaciones. Además se ha descubierto que cierto número de otros productos químicos imitan, de la misma forma, las radiaciones energéticas.

A los productos químicos capaces de inducir mutaciones se les denomina «mutágenos». No todos los mutágenos han demostrado ser carcinógenos, ni todos los carcinógenos han resultado ser mutágenos. Pero existen suficientes casos de compuestos, tanto carcinogénicos como mutagénicos, capaces de hacer sospechar que la coincidencia no es accidental.

Entretanto no se ha desvanecido, ni mucho menos, la idea de que los microorganismos pueden tener algo que ver con el cáncer. Con el descubrimiento de los virus ha cobrado nueva vida esta sugerencia de la era de Pasteur. En 1903, el bacteriólogo francés Amédée Borrel sugirió que el cáncer quizás fuera una enfermedad por virus, y en 1908, dos daneses, Wilhelm Ellerman y Olaf Bang, demostraron que la leucemia de las aves era causada en realidad por un virus. No obstante, por entonces aún no se reconocía la leucemia como una forma de cáncer, y el problema quedó en suspenso. Sin embargo, en 1909, el médico americano Francis Peyton Rous cultivó un tumor de pollo y, después de filtrarlo, inyectó el filtrado claro en otros pollos. Algunos de ellos desarrollaron tumores. Cuanto más fino era el filtrado, menos tumores se producían. Ciertamente parecía demostrar

que partículas de cierto tipo eran las responsables de la iniciación de tumores, así como que dichas partículas eran del tamaño de los virus.

Los «virus tumorales» han tenido un historial accidentado. En un principio, los tumores que se achacaban a virus resultaron ser uniformemente benignos; por ejemplo, los virus demostraron ser la causa de cosas tales como los papilomas de los conejos (similares a las verrugas). En 1936, John Joseph Bittner, mientras trabajaba en el famoso laboratorio reproductor de ratones, de Bar Harbor, Miane, tropezó con algo más interesante. Maude Slye, del mismo laboratorio, había criado razas de ratones que parecían presentar una resistencia congénita al cáncer y otras, al parecer, propensas a él. Los ratones de ciertas razas muy rara vez desarrollan cáncer; en cambio, los de otras lo contraen casi invariablemente al alcanzar la madurez. Bittner ensayó el experimento de cambiar a las madres de los recién nacidos de forma que éstos se amamantaran de las razas opuestas. Descubrió que cuando los ratoncillos de la raza «resistente al cáncer» mamaban de madres pertenecientes a la raza «propensa al cáncer», por lo general, contraían el cáncer. Por el contrario, aquellos ratoncillos que se suponía propensos al cáncer amamantados por madres resistentes al cáncer no lo desarrollaban. Bittner llegó a la conclusión de que la causa del cáncer, cualquiera que fuese, no era congénita, sino transmitida por la leche de la madre. Lo denominó «factor lácteo».

Naturalmente, se sospechó que el factor lácteo de Bittner era un virus. Por último, el bioquímico Samuel Graff, de la Universidad de Columbia, identificó a dicho factor como una partícula que contenía ácidos nucleicos. Se han descubierto otros virus de tumor causantes de ciertos tipos de tumores en los ratones y de leucemias en animales, todos ellos conteniendo ácidos nucleicos. No se han localizado virus en conexión con cánceres humanos, pero evidentemente la investigación sobre el cáncer humano es limitada.

Ahora empiezan a converger las teorías sobre la mutación y los virus. Acaso lo que puede parecer contradicción entre ambas teorías después de todo no lo sea. Los virus y los genes tienen algo muy importante en común: la clave del comportamiento de ambos reside en sus ácidos nucleicos. En realidad, G. A. di Mayorca y sus colaboradores del Instituto Sloan-Kettering y los Institutos Nacionales de Sanidad, en 1959 aislaron ADN de un virus de tumor de ratón,

descubriendo que el ADN podía inducir por sí solo cánceres en los ratones con la misma efectividad con que lo hacía el virus.

De tal forma que la diferencia entre la teoría de la mutación y la del virus reside en si el ácido nucleico causante del cáncer se produce mediante una mutación en un gen dentro de la célula o es introducido por una invasión de virus desde el exterior de la célula. Ambas teorías no son antagónicas; el cáncer puede llegar por los dos caminos.

De todos modos, hasta 1966 la hipótesis vírica no se consideró merecedora del premio Nobel. Por fortuna, Peyton Rous, que había hecho el descubrimiento cincuenta y cinco años antes, aún estaba vivo y pudo compartir en 1966 el Nobel de Medicina y Fisiología. (Vivió hasta 1970, en cuya fecha murió, a los noventa años, mientras se dedicaba aún a efectuar investigaciones.) ¿Qué es lo que se estropea en el mecanismo del metabolismo cuando las células crecen sin limitaciones? Esta pregunta aún no ha sido contestada. Pero existen profundas sospechas respecto a algunas de las hormonas sexuales.

Por una parte, se sabe que las hormonas sexuales estimulan en el organismo un crecimiento rápido y localizado (como, por ejemplo, los senos de una adolescente). Por otra, los tejidos de los órganos sexuales -los senos, el cuello uterino y los ovarios, en la mujer; los testículos y la próstata, en el hombre- muestran una predisposición particular al cáncer. Y la más importante de todas la constituye la prueba química. En 1933, el bioquímico alemán Heinrich Wieland (que obtuviera el premio Nobel de Química, en 1927, por su trabajo sobre los ácidos biliares), logró convertir un ácido biliar en un hidrocarburo complejo llamado «metilcolantreno», poderoso carcinógeno. Ahora bien, el metilcolantreno, al igual que los ácidos biliares, tiene la estructura de cuatro cadenas de un esteroide y resulta que todas las hormonas sexuales son esteroides. ¿Puede una molécula deformada de hormona sexual actuar como carcinógeno? O incluso una hormona perfectamente formada, ¿puede llevar a ser confundida con un carcinógeno, por así decirlo, por una forma distorsionada de gen en una célula, estimulando así el crecimiento incontrolado? Claro está que tan sólo se trata de especulaciones interesantes.

Y lo que resulta bastante curioso es que un cambio en el suministro de hormonas sexuales contiene a veces el desarrollo canceroso. Por ejemplo, la castración para

reducir la producción de hormonas sexuales masculinas, o la administración neutralizadora de hormonas sexuales femeninas, ejerce un efecto paliativo en el cáncer de próstata. Como tratamiento, no puede decirse que merezcan un coro de alabanzas, y el que se recurra a estas manipulaciones indica el grado de desesperación que inspira el cáncer.

El principal sistema de ataque contra el cáncer aún sigue siendo la cirugía. Y sus limitaciones continúan siendo las mismas: a veces, no puede extirparse el cáncer sin matar al paciente; con frecuencia, el bisturí libera trocitos del tejido maligno (ya que el tejido desorganizado del cáncer muestra tendencia a fragmentarse), que entonces son transportados por el torrente sanguíneo a otras partes del organismo, donde arraigan y crecen.

El uso de radiación energética para destruir el cáncer presenta también sus inconvenientes. La radiactividad artificial ha incorporado nuevas armas a las ya tradicionales de los rayos X y el radio. Una de ellas es el cobalto 60, que genera rayos gamma de elevada energía y es mucho menos costoso que el radio; otra es una solución de yodo radiactivo (el «cóctel atómico»), que se concentra en la glándula tiroides, atacando así el cáncer tiroideo. Pero la tolerancia del organismo a las radiaciones es limitada, y existe siempre el peligro de que la radiación inicie más cáncer del que detiene.

Pese a todo, la cirugía y la radiación son los mejores medios de que se dispone hasta ahora, y ambos han salvado, o al menos prolongado, muchas vidas. Y necesariamente serán el principal apoyo del hombre contra el cáncer hasta que los biólogos encuentren lo que están buscando: un «proyectil mágico», que sin lesionar las células normales, luche contra las células cancerosas bien para destruirlas o para detener su desatinada división.

Se está desarrollando una labor muy eficaz a lo largo de dos rutas principales. Una conduce a averiguar todo lo posible acerca de esa división celular. La otra, a especificar con el mayor número posible de pormenores cómo realizan las células su metabolismo con el fin esperanzador de encontrar alguna diferencia decisiva entre las células cancerosas y las normales. Se han encontrado ya algunas diferencias, pero todas ellas bastante insignificantes... por ahora.

Entretanto se está llevando a cabo una magnífica selección de elementos químicos mediante el ensayo y el error. Cada año se ponen a prueba 50.000 nuevos medicamentos. Durante algún tiempo, las mostazas nitrogenadas parecieron ser prometedoras, de acuerdo con la teoría de que ejercían efectos parecidos a la irradiación y podían destruir las células cancerosas. Algunos medicamentos de este tipo parecen representar alguna ayuda contra ciertas clases de cáncer, por lo menos en lo concerniente a la prolongación de la vida, pero evidentemente son tan sólo un remedio paliativo.

Se han depositado más esperanzas en la dirección de los ácidos nucleicos. Debe existir alguna diferencia entre los ácidos nucleicos de las células cancerosas y los de las normales. El objetivo, pues, es encontrar un método para interceptar la acción química de uno y no la de los otros. Por otro lado, tal vez las células cancerosas desorganizadas sean menos eficientes que las células normales en la producción de ácidos nucleicos. Si fuera así, la introducción de unos cuantos gramos de arena en la maquinaria podría truncar las células cancerosas menos eficientes sin perturbar seriamente a las eficaces células normales.

Por ejemplo, una sustancia vital para la producción de ácido nucleico es el ácido fólico. Éste representa un papel primordial en la formación de purinas y pirimidinas, los bloques constitutivos del ácido nucleico. Ahora bien, un compuesto semejante al ácido fólico podría (mediante la inhibición competitiva) retardar el proceso lo suficiente para impedir que las células cancerosas formaran ácido nucleico, permitiendo mientras tanto que las células normales lo produjeran a un ritmo adecuado, y, claro está, las células cancerosas no podrían multiplicarse sin ácido nucleico. De hecho, existen tales «antagonistas acidofólicos». Uno de ellos, denominado «ametopterina», ha demostrado ejercer cierto efecto contra la leucemia.

Pero hay todavía un ataque más directo. ¿Por qué no inyectar sustitutivos competidores de las propias purinas y pirimidinas? El candidato más prometedor es la «G-mercaptopurina». Este compuesto es como la adenina, pero con una diferencia: posee un grupo -SH en lugar del -NH<sub>2</sub> de la adenina.

No se debe desestimar el posible tratamiento de una sola dolencia en el grupo de enfermedades cancerosas: Las células malignas de ciertos tipos de leucemia

requieren una fuente externa de la sustancia aspargina que algunas células sanas pueden fabricar por sí solas. El tratamiento con la enzima aspargina, que cataliza la desintegración de la aspargina, reduce sus reservas en el organismo y da muerte a las células malignas, mientras que las normales logran sobrevivir.

La investigación decidida y universalizada acerca del cáncer es incisiva y estimable en comparación con otras investigaciones biológicas, y su financiación merece el calificativo de espléndida. El tratamiento ha alcanzado un punto en que una de cada tres víctimas sobreviven y hacen una vida normal durante largo tiempo. Pero la curación total no se descubrirá fácilmente, pues el secreto del cáncer es tan sutil como el secreto de la vida misma.

## Capítulo 14

### EL CUERPO

#### Alimentos

El primer adelanto importante en la ciencia médica fue, quizás, el descubrimiento de que una buena salud exigía una dieta sencilla y equilibrada. Los filósofos griegos recomendaban moderación en la comida y en la bebida, no sólo por razones filosóficas, también porque los que seguían esta regla se sentían mejor y vivían más años. Esto era un buen comienzo, pero con el tiempo los biólogos comprendieron que la simple moderación no era suficiente. Aunque se tenga la suerte de poder evitar comer demasiado poco y el sentido común suficiente para no comer demasiado, no se conseguirá gran cosa si la dieta es pobre en determinados elementos esenciales, como ocurre realmente en gran número de personas en algunos lugares del planeta.

En cuanto a sus necesidades dietéticas, el cuerpo humano está más bien especializado. Una planta puede vivir sólo a base de anhídrido carbónico, agua y ciertos iones orgánicos. Algunos microorganismos pueden, igualmente, arreglárselas sin alimento orgánico alguno; por ello, se les denomina «autotróficos» («autoalimentados»), lo cual significa que pueden crecer en ambientes en los que no existe otro ser vivo. La *Neurospora* del pan molturado es ya un poco más complicada: además de las sustancias inorgánicas, necesita azúcar y la vitamina biotina, y, a medida que las formas de vida se van haciendo más y más complejas, parecen depender cada vez en mayor grado de su dieta para el suministro del material orgánico necesario en la formación del tejido vivo. El motivo de ello es, simplemente, que han perdido algunas de las enzimas que poseen los organismos más primitivos. Una planta verde dispone de un suministro completo de enzimas para formar, a partir de materias inorgánicas, todos los aminoácidos, proteínas, grasas e hidratos de carbono que necesita. La *Neurospora* posee todas las enzimas, excepto las necesarias para formar azúcar y biotina. Cuando llegamos al hombre, encontramos que carece de las enzimas necesarias para producir muchos de los aminoácidos, vitaminas y otros productos necesarios, y que debe obtenerlos ya elaborados, a través de los alimentos.

Esto puede parecer una especie de degeneración, una creciente dependencia del medio ambiente, que coloca al organismo humano en una situación desventajosa. Pero no es así. Si el medio ambiente proporciona los materiales de construcción, ¿para qué cargar con la complicada maquinaria enzimática que se necesita para fabricarlos? Ahorrándose esta maquinaria, la célula puede emplear su energía y espacio para fines más delicados y especializados.

Fue el médico inglés William Prout (el mismo Prout que se adelantó un siglo a su época, al afirmar que todos los elementos estaban formados a partir del hidrógeno) quien primeramente sugirió que los alimentos orgánicos podían ser divididos en tres tipos de sustancias, más tarde denominados hidratos de carbono, grasas y proteínas.

Los químicos y biólogos del siglo XIX, sobre todo el alemán Justus von Liebig, descubrieron gradualmente las propiedades nutritivas de estos alimentos. Averiguaron que las proteínas son las más esenciales y que el organismo puede sobrevivir solo con éstas. El cuerpo no puede producir proteínas a partir de los hidratos de carbono y las grasas, porque estas sustancias no tienen nitrógeno, pero puede formar los hidratos de carbono y las grasas necesarias partiendo de materias suministradas por las proteínas. No obstante, puesto que la proteína es relativamente escasa en el medio ambiente, sería un despilfarro vivir a base de una dieta formada únicamente por proteínas -algo así como alimentar el fuego con los muebles de la casa, cuando no se dispone de troncos para ello-.

En circunstancias favorables, las necesidades diarias de proteínas del cuerpo humano, dicho sea de paso, son sorprendentemente bajas. El Departamento de Alimentos y Nutrición de la Junta Nacional de Investigación, en su cuadro de recomendaciones de 1958, sugería que la cantidad mínima para un adulto era la de un gramo de proteínas por kilogramo de peso corporal al día, lo que supone un poco más de 56,5 g para el adulto medio. Aproximadamente dos litros de leche pueden aportar esta cantidad. Los niños y las mujeres embarazadas, o en período de lactación, necesitan una mayor cantidad de proteínas.

Desde luego, gran parte depende de las proteínas que se elijan. Los científicos del siglo XIX trataron de averiguar si, en épocas de hambre, la población podría vivir alimentándose únicamente de gelatina -un material proteínico que se obtiene

calentando huesos, tendones y demás partes, en otro caso no comestibles, de los animales-. Pero el fisiólogo francés Francois Magendie demostró que, cuando la gelatina era su única fuente de proteínas, los perros perdían peso y morían. Esto no significa que sea un error administrar gelatina como alimento, sino simplemente que no se aporta todo el material energético necesario, cuando ésta es la única proteína contenida en la dieta. La clave de la utilidad de una proteína radica en la eficacia con que el organismo puede emplear el nitrógeno que suministra. En 1854, los peritos agrícolas británicos John Bennet Lawes y Joseph Henry Gilbert alimentaron un grupo de cerdos con proteínas administradas en dos formas - lentejas y cebada-. Descubrieron que los cerdos retenían mucho más nitrógeno con la dieta de cebada que con la de lentejas, estos fueron los primeros experimentos del «balance de nitrógeno».

Un organismo en crecimiento acumula gradualmente nitrógeno a partir de los alimentos que ingiere («balance positivo de nitrógeno»). Si se está muriendo de hambre o sufre una enfermedad debilitante, y la gelatina es su única fuente de proteínas, el cuerpo continúa, desde el punto de vista del equilibrio del nitrógeno, muriendo de hambre o consumiéndose (situación que se denomina «balance negativo de nitrógeno»). Sigue perdiendo más nitrógeno del que asimila, independientemente de la cantidad de gelatina con que se le alimenta.

¿Por qué sucede así? Los químicos del siglo XIX descubrieron, finalmente, que la gelatina es una proteína particularmente simple. Carece de triptófano y de otros aminoácidos que existen en la mayor parte de las proteínas. Sin estos materiales de construcción orgánicos, el cuerpo no puede elaborar las proteínas que necesita. Por tanto, a menos que tenga en su alimentación otras proteínas, los aminoácidos que se encuentran en la gelatina son inútiles y deben ser excretados. Es como si los constructores se encontraran con grandes cantidades de tablas de madera, pero no tuviesen clavos. No sólo les resultaría imposible construir la casa, sino que los tablones realmente estorbarían y, por último, tendrían que deshacerse de ellos. En la década de 1890, se realizaron intentos para convertir la gelatina en un componente dietético más eficiente, añadiéndole algunos de los aminoácidos en los que era deficitaria, pero sin éxito. Se han obtenido mejores resultados con proteínas no tan rigurosamente limitadas en su composición como la gelatina.

En 1906, los bioquímicos ingleses Frederick Gowland Hopkins y E. G. Willcock alimentaron a un ratón con una dieta en la que la única proteína era la ceína, que se encuentra en el maíz. Sabían que esta proteína contenía poca cantidad de triptófano. El ratón murió al cabo de unos catorce días. Los investigadores trataron entonces de alimentar a otro ratón con ceína, añadiéndole triptófano. Esta vez, el ratón sobrevivió el doble de tiempo. Era la primera prueba sólida de que los aminoácidos, más que las proteínas, debían de ser los componentes esenciales de la dieta. (Aunque el ratón seguía muriendo prematuramente, esto quizás era debido, sobre todo, a la falta de ciertas vitaminas, no conocidas en aquellos años.) En la década de 1930, William Cumming Rose, un especialista norteamericano en nutrición, resolvió finalmente el problema de los aminoácidos. En aquella época, se conocían ya la mayor parte de las vitaminas, de modo que pudo suministrar a los ratones las que necesitaban y concentrarse en los aminoácidos. Rose administró como alimento a las ratas una mezcla de aminoácidos, en lugar de proteínas. Las ratas no vivieron demasiado tiempo con esta dieta. Pero cuando los alimentó con una proteína de la leche, denominada caseína, consiguieron sobrevivir. En apariencia, había algo en la caseína -probablemente algún aminoácido todavía no descubierto- que no se hallaba presente en la mezcla de aminoácidos que había empleado. Rose descompuso la caseína y trató de añadir algunos fragmentos moleculares de ésta a su mezcla de aminoácidos. De este modo consiguió hallar el aminoácido denominado «treinina», el último de los aminoácidos principales que quedaba por descubrir. Cuando añadió la treinina extraída de la caseína a su mezcla de aminoácidos, las ratas crecieron satisfactoriamente sin necesidad de ninguna proteína íntegra en su dieta.

Rose procedió a efectuar diversas pruebas, suprimiendo cada vez uno de los aminoácidos de la dieta. Con este método, identificó finalmente diez aminoácidos como elementos indispensables en la dieta de la rata: lisina, triptófano, histidina, fenilalanina, leucina, isoleucina, treonina, metionina, valina y arginina. Si se le suministraban cantidades suficientes de estos elementos, la rata podía manufacturar el resto de los que necesitaba, como la glicina, la prolina, el ácido aspártico, la alanina, etc.

En la década de 1940, Rose dirigió su atención hacia las necesidades del hombre en cuanto a aminoácidos. Logró persuadir a algunos estudiantes graduados para que se sometiesen a dietas controladas, en las que la única fuente de nitrógeno era una mezcla de aminoácidos. En 1949, pudo ya anunciar que el hombre adulto sólo necesitaba ocho aminoácidos en su dieta: fenilalanina, leucina, isoleucina, metionina, valina, lisina, triptófano y treonina. Puesto que la arginina y la histidina, indispensables en la rata, no lo son en el hombre, podría llegarse a la conclusión de que el hombre era menos especializado que la rata, o, realmente, que cualquiera de los animales con los que se ha experimentado en detalle.

Potencialmente, una persona podría vivir con solo los ocho aminoácidos dietéticos esenciales; suministrándole la cantidad necesaria de éstos, no sólo podría producir los restantes aminoácidos que necesita, sino también los hidratos de carbono y las grasas. De todos modos, una dieta constituida exclusivamente por aminoácidos sería demasiado cara, sin contar con su insipidez y monotonía. Pero resulta considerablemente útil saber cuáles son nuestras necesidades en aminoácidos, de modo que podamos reforzar las proteínas naturales cuando es necesario para conseguir una máxima eficacia en la absorción y utilización del nitrógeno.

## Vitaminas

Los caprichos alimenticios y las supersticiones, desgraciadamente, siguen engañando a demasiada gente -y enriqueciendo a demasiados vendedores de «curalotodo», incluso en estos tiempos ilustrados. En realidad, el que nuestros tiempos sean más ilustrados quizá sea la causa de que puedan permitirse tales caprichos alimentarios. A través de la mayor parte de la historia del hombre, la comida de éste ha consistido en cualquier cosa que se produjese a su alrededor, casi siempre en escasa cantidad. Se trataba de comer lo que había, o perecer de hambre; nadie podía mostrar remilgos, y, sin una actitud remilgada, no pueden existir caprichos alimentarios.

El transporte moderno ha permitido enviar los alimentos de una parte a otra de la Tierra, particularmente desde que ha surgido el empleo de la refrigeración a gran escala. Esto ha reducido la amenaza de hambre, que en otros tiempos tenía un

carácter inevitablemente local, con regiones en que abundaba la comida que no podía ser trasladada de la región a aquellas otras en que se padecía hambre.

El almacenamiento en el propio hogar de los diversos alimentos fue posible tan pronto como el hombre aprendió a conservar los alimentos, salándolos, secándolos, aumentando su contenido en azúcar, fermentándolos, etc. Se pudo mantenerlos en un estado muy parecido al natural, cuando se desarrollaron métodos para almacenar la comida cocida era el vacío (la cocción mata los microorganismos, y el vacío evita que nazcan y se reproduzcan otros nuevos). El almacenamiento en el vacío fue puesto en práctica por primera vez por un jefe de cocina francés, François Appert, quien desarrolló la técnica impulsado por un premio ofrecido por Napoleón a quien le ofreciera un medio para conservar los alimentos de sus ejércitos.

Appert empleó jarros de cristal; pero actualmente se emplean para este propósito latas de acero estañado (inadecuadamente llamadas «hojalatas» o sólo «latas»). Desde la Segunda Guerra Mundial, se han hecho cada día más populares los alimentos congelados, y el número creciente de frigoríficos en los hogares ha permitido disponer cada vez más de gran variedad de alimentos frescos. A medida que ha ido aumentando la disponibilidad del número de alimentos, se ha ido incrementando también la posibilidad de los caprichos alimentarios.

Esto no quiere decir que no sea útil una sabia elección de las comidas. Hay determinados casos en los que alimentos específicos pueden curar definitivamente una determinada enfermedad. Asimismo, hay muchas «enfermedades carenciales», enfermedades producidas por la carencia en la dieta de alguna sustancia indispensable para el funcionamiento químico del cuerpo. Estas anomalías surgen invariablemente cuando se priva al hombre de una dieta normal, equilibrada -es decir, aquella que contiene una amplia variedad de alimentos-.

Realmente, el valor de una dieta equilibrada y variada fue ya comprendido por muchos médicos del siglo XIX, e incluso antes, cuando la química de la alimentación seguía siendo un misterio. Un famoso ejemplo es el de Florence Nightingale, la heroica enfermera inglesa de la guerra de Crimea, quien abrió el camino para una alimentación adecuada de los soldados, así como para su tratamiento médico razonable. Sin embargo, la «dietética» (el estudio sistemático de la dieta) no hizo

su aparición hasta finales de siglo, gracias al descubrimiento de sustancias presentes en forma de trazas en la alimentación, que son esenciales para la vida.

El mundo antiguo estaba muy familiarizado con el escorbuto, una enfermedad en la que los capilares se vuelven cada vez más frágiles, las encías sangran y los dientes se caen, las heridas cicatrizan con mucha dificultad, si es que lo, hacen, y el enfermo se debilita hasta que finalmente muere. Aparecía con particular frecuencia en las ciudades asediadas y en los largos viajes transoceánicos. (La tripulación de Magallanes padeció más penalidades a causa del escorbuto que debido a la desnutrición general.) En los largos viajes, los barcos, que carecían de refrigeración, tenían que llevar alimentos que no se corrompieran, lo que significaba abundancia de cerdo salado y galleta. Sin embargo, durante muchos siglos los médicos no consiguieron descubrir una relación entre el escorbuto y la dieta alimentaria.

En 1536, mientras el explorador francés Jacques Cartier estaba invernando en Canadá, 110 de sus hombres fueron afectados por el escorbuto. Los indios nativos lo conocían y sugirieron un remedio a esta enfermedad: beber agua en la que se hubiesen remojado agujas de pino. En su desesperación, los hombres de Cartier siguieron aquel consejo que parecía infantil. El remedio les curó el escorbuto.

Dos siglos más tarde, en 1747, el médico escocés James Lind tomó nota de diversos incidentes de este tipo, y se dedicó a experimentar con la fruta fresca y las verduras, como remedio. Probando su tratamiento en marineros enfermos de escorbuto, descubrió que las naranjas y los limones conseguían en ellos rápidas mejorías. El capitán Cook, en su viaje de exploración a través del Pacífico, entre 1772 y 1775, mantuvo a su tripulación libre del escorbuto imponiendo una dieta regular de col ácida. Sin embargo, hasta 1795 los oficiales de Estado Mayor de la Marina Británica no quedaron lo bastante impresionados por los experimentos de Lind (y por el hecho de que una flotilla afectada por el escorbuto podía perder un combate naval sin apenas luchar) para ordenar el suministro de raciones diarias de zumo de lima<sup>8</sup> para los marineros británicos. (Desde entonces se les llama «limeys», y la zona del Támesis, en Londres, donde se almacenaban las canastas de

---

<sup>8</sup> *Lima*: Una especie de limón más pequeño y redondo que los demás. Hay dos variedades: la agria y la dulce. (N. del T.)

limas, se sigue llamando «Limehouse».) Gracias al zumo de lima, el escorbuto desapareció de la Marina británica.

Un siglo más tarde, en 1891, el almirante Takaki, de la Marina japonesa, de forma similar, introdujo una dieta variada para romper la monotonía de las raciones de arroz de sus barcos. El resultado fue "la desaparición, en la Marina japonesa, de la enfermedad conocida con el nombre de «beriberi».

A pesar de las ocasionales victorias dietéticas de este tipo (que nadie podía explicar), los biólogos del siglo XIX se negaron a creer que una enfermedad pudiera curarse mediante una dieta, especialmente tras la aceptación de la teoría de los gérmenes de Pasteur. No obstante, en 1896, un médico holandés llamado Christiaan Eijkman les convenció, casi en contra de su voluntad.

Eijkman fue enviado a las Indias Orientales holandesas para investigar el beriberi, endémico en aquellas regiones (y que, incluso hoy día, conociendo la medicina su causa y cómo curarlo, sigue matando unas 100.000 personas al año). Takaki había conseguido detener la evolución de los enfermos de beriberi, adoptando medidas dietéticas; pero, aparentemente, Occidente no dio importancia a lo que podría considerarse únicamente como la doctrina mística oriental.

Suponiendo que el beriberi era una enfermedad provocada por gérmenes, Eijkman utilizó algunos pollos como animales de experimentación para descubrir el germen en ellos. Un afortunado accidente vino a trastornar sus planes. Sin previo aviso, la mayor parte de sus pollos contrajeron una extraña parálisis a consecuencia de la cual algunos murieron; al cabo de cuatro meses, los supervivientes recobraron la salud. Eijkman, extrañado de no poder encontrar germen alguno responsable de la enfermedad, se decidió finalmente a investigar la dieta de los pollos. Descubrió que la persona que se había encargado primeramente de alimentarlos había realizado economías (sin duda beneficiosas para ella) empleando sobras de comida, principalmente arroz descascarillado, de los almacenes del hospital militar. Sucedió que, al cabo de cuatro meses, había llegado un cocinero nuevo que tomó a su cargo la alimentación de los pollos; éste había dejado de darles sobras, para proporcionarles la comida normal de los pollos, que contenía arroz sin descascarillar. Fue entonces cuando los animales se recuperaron.

Eijkman practicó algunos experimentos. Sometió a los pollos a una dieta de arroz descascarillado y los animales enfermaron. Utilizó de nuevo el arroz sin descascarillar y se recuperaron. Era el primer caso de enfermedad por deficiencia en la dieta provocada deliberadamente. Eijkman decidió que esta «polineuritis» que afectaba a las aves era similar en sus síntomas al beriberi humano. ¿Contraían los seres humanos el beriberi a consecuencia de comer únicamente arroz descascarillado? Para el consumo del hombre, el arroz era desprovisto de su cascarilla, principalmente porque se conserva mejor, ya que el germen destruido con la cascarilla del arroz contiene aceites que fácilmente se enrancian. Eijkman y su colaborador, Gerrit Grijns, se dispusieron a averiguar qué era lo que contenía la cascarilla del arroz que evitaba el beriberi. Por último, consiguieron disolver el factor crucial de la cascarilla y descubrieron que podía atravesar membranas que no conseguían cruzar las proteínas. Evidentemente, la sustancia en cuestión tenía que ser una molécula muy pequeña. Sin embargo, no pudieron identificarla.

Mientras tanto, varios investigadores estudiaban otros factores misteriosos que parecían ser esenciales para la vida. En 1905, el especialista holandés en nutrición, C. A. Pekelharing, halló que todos sus ratones morían al cabo de un mes de ingerir una dieta artificial que parecía lo suficientemente rica en cuanto a grasas, hidratos de carbono y proteínas. Sin embargo, los ratones vivían normalmente cuando añadía a esta dieta unas pocas gotas de leche. En Inglaterra, el bioquímico Frederick Hopkins, que pretendía demostrar la importancia de los aminoácidos en la dieta, llevó a cabo una serie de experimentos en los que, asimismo, se demostraba que existía algo en la caseína de la leche, que, si se añadía a una dieta artificial, fomentaba el crecimiento. Este algo era soluble en agua. Como suplemento dietético, una pequeña cantidad de extracto de levadura era incluso mejor que la caseína.

Por su descubrimiento, al establecer que estas sustancias en la dieta eran esenciales para la vida, Eijkman y Hopkins compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología, en 1929.

La siguiente tarea era aislar esos factores vitales en los alimentos. En 1912, tres bioquímicos japoneses, U. Suzuki, T. Shimamura y S. Ohdake, lograron extraer de la cáscara de arroz un compuesto que se manifestaba muy potente contra el

beriberi. Dosis de cinco a diez miligramos bastaban para producir la curación en un ave. En el mismo año, el bioquímico de origen polaco Casimir Funk (que trabajaba entonces en Inglaterra y más tarde se trasladó a los Estados Unidos) preparó el mismo compuesto partiendo de la levadura.

Debido a que el compuesto demostraba ser una amina (es decir que contenía el grupo amina, NH<sub>2</sub>), Funk lo denominó «vitamina», nombre latino de «vida amina», y supuso que el beriberi, el escorbuto, la pelagra y el raquitismo eran producidos por deficiencias de «vitaminas». La conjetura de Funk resultó correcta en cuanto a su identificación de que todas estas enfermedades eran provocadas por carencias alimenticias. Pero, resultó que no todas las «vitaminas» eran aminas.

En 1913, dos bioquímicos norteamericanos, Elmer Vernon McCollum y Marguerite Davis, descubrieron otro factor vital para la salud, en la mantequilla y la yema de huevo. Ésta era soluble en sustancias grasas, más que en el agua. McCollum lo denominó «soluble A en grasa» en contraste con el «soluble B en agua», nombre que aplicó al factor antiberiberi. En ausencia de datos químicos sobre la naturaleza de los factores, esta forma de denominación parecía bastante lógica y así se inició la costumbre de denominar estos factores por medio de letras. En 1920, el bioquímico británico Jack Cecil Drummond cambió estos nombres por los de «vitamina A», y «vitamina B», quitando la «e» inglesa final de «vitamine», como primer paso de su intención de eliminar la «amina» del nombre, y sugirió, además, que el factor antiescorbútico era la tercera de tales sustancias, a la que denominó «vitamina C». La vitamina A fue pronto identificada como el factor alimentario necesario para evitar el desarrollo de una sequedad anormal en las membranas situadas alrededor del ojo, denominada «xeroftalmía», a partir de las palabras griegas que significan «ojos secos». En 1920, McCollum y sus colaboradores descubrieron que una sustancia contenida en el aceite de hígado de bacalao, que era eficaz en la curación tanto de la xeroftalmía como de una enfermedad de los huesos llamada «raquitismo», podía ser tratada, de modo que sólo curase el raquitismo. Decidieron, así, que el factor antirraquitismo debía ser una cuarta vitamina, que denominaron vitamina D. Las vitaminas D y A son solubles en las grasas, y la C y la B lo son en agua.

En 1930, se había hecho ya evidente que la vitamina B no era una sustancia simple, sino una mezcla de componentes con distintas propiedades. El factor alimenticio que curaba el beriberi fue denominado vitamina  $B_1$  a un segundo factor se le llamó vitamina  $B_2$  y así sucesivamente. Algunos de los informes sobre nuevos factores resultaron ser falsas alarmas, por lo que ya no se oye hablar de vitamina  $B_3$ ,  $B_4$  o  $B_5$ . Sin embargo, los números siguieron ascendiendo hasta llegar al 14. El grupo de vitaminas, globalmente considerado, es denominado con frecuencia «complejo vitamínico B».

Se añadieron asimismo nuevas letras. De éstas, las vitaminas E y K (ambas solubles en grasas) continuaron siendo verdaderas vitaminas, pero la «vitamina F» resultó no ser una vitamina, y la vitamina H, demostró ser una de las vitaminas del complejo B.

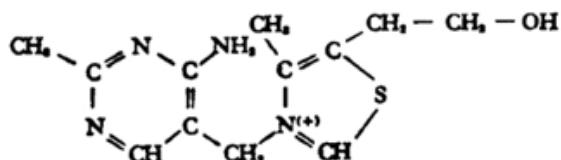
Sin embargo, una vez identificada su constitución química, las letras de incluso las verdaderas vitaminas han caído en desuso, y la mayor parte de ellas se conocen por sus nombres químicos, aunque las vitaminas solubles en grasas, por alguna razón especial, han mantenido sus denominaciones con mayor tenacidad que las solubles en agua.

No resultó fácil averiguar la composición química y estructura de las vitaminas, pues estas sustancias se producen sólo en cantidades pequeñísimas. Por ejemplo, una tonelada de cascarilla de arroz contiene tan sólo unos 5 gramos de vitamina B. Hasta 1926, nadie logró extraer suficiente vitamina pura para poder analizarla químicamente.

Dos bioquímicos holandeses, Barend Coenraad Petrus Jansen y William Frederick Donath, determinaron una composición de la vitamina B, partiendo de una pequeña muestra, pero resultó equivocada. En 1932, Ohdake trató de conseguirlo de nuevo, con una muestra algo mayor, y casi obtuvo el resultado correcto. Fue el primero en detectar un átomo de azufre en una molécula vitamínica.

Finalmente, en 1934, Robert R. Williams, por aquel entonces director químico de los «Bell Telephone Laboratories», culminó veinte años de investigaciones separando laboriosamente la vitamina  $B_1$  a partir de varias toneladas de cáscaras de arroz,

hasta que obtuvo la cantidad suficiente para elaborar una fórmula estructural completa. Ésta es:



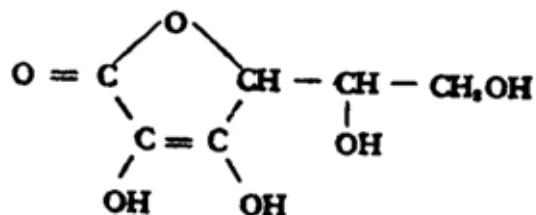
Puesto que la característica más imprevisible de la molécula era el átomo de azufre (*theion* en griego), la vitamina fue denominada «tiamina».

La vitamina C ofrecía un tipo de problema distinto. Los frutos cítricos proporcionaban una fuente comparativamente rica de este material, pero la dificultad estribaba en hallar un animal de experimentación que no fabricase su propia vitamina C. La mayor parte de los mamíferos, excepto el hombre y los demás primates, han mantenido su capacidad de producir esta vitamina. Sin un animal de experimentación, barato y sencillo, capaz de contraer escorbuto, era difícil seguir la localización de la vitamina C entre las diversas fracciones en las que se descompone químicamente el zumo de frutas.

En 1918, los bioquímicos norteamericanos B. Cohen y Lafayette Benedict Mendel resolvieron el problema, al descubrir que los conejillos de Indias no producían esta vitamina. De hecho, los conejillos de Indias adquirían el escorbuto mucho más fácilmente que el hombre. Pero quedaba por resolver otra dificultad. La vitamina C resultó ser muy inestable (es la más inestable de las vitaminas), por lo que se perdía fácilmente en los procesos químicos llevados a cabo para aislarla. Gran número de investigadores persiguieron incansablemente la vitamina sin éxito alguno.

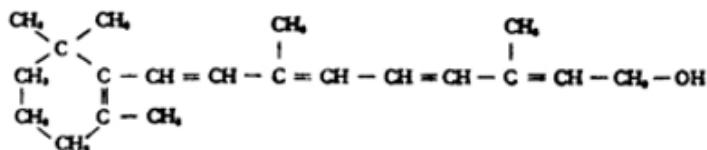
Como sucede muchas veces, la vitamina C fue aislada finalmente por alguien que no estaba particularmente interesado en el problema. En 1928, el bioquímico húngaro Albert Szent-Györgyi, que entonces trabajaba en Londres en el laboratorio de Hopkins y se hallaba interesado principalmente en averiguar cómo los tejidos pueden usar el oxígeno, aisló, a partir de la col, una sustancia que ayudaba a transferir átomos de hidrógeno de un compuesto a otro. Poco después, Charles Glen King y sus colaboradores, en la Universidad de Pittsburgh, que *sí estaban* buscando la vitamina C, prepararon la misma sustancia y encontraron que resultaba

fuertemente protectora contra el escorbuto. Más aún, descubrieron que era idéntica a los cristales que habían obtenido a partir del zumo de limón. King determinó su estructura en 1933, resultando ser una molécula de azúcar con seis átomos de carbono, perteneciente a la serie-L, en lugar de a la serie-D:



Fue denominado «ácido ascórbico» (procedente de las palabras griegas que significan «no escorbuto»).

En cuanto a la vitamina A, el primer indicio referente a su estructura procedió de la observación de que los alimentos ricos en vitamina A tenían a menudo un color amarillo o naranja (mantequilla, yema de huevo, zanahorias, aceite de hígado de bacalao). La sustancia responsable, en gran parte, de este color resultó ser un hidrato de carbono denominado «caroteno», y, en 1929, el bioquímico británico Thomas Moore demostró que las ratas alimentadas con dietas que contenían caroteno almacenaban vitamina A en el hígado. La propia vitamina no era de color amarillo, por lo que se dedujo que, aunque el caroteno no era la vitamina A, el hígado lo convertía en algo que sí era vitamina A. (El caroteno se considera hoy día como un ejemplo de «provitamina».) En 1937, los químicos norteamericanos Harry Nicholls Holmes y Ruth Elizabeth Corbet aislaron la vitamina A en forma de cristales, a partir del aceite de hígado de bacalao. Resultó ser un compuesto con 20 átomos de carbono, la mitad de una molécula de caroteno, con un grupo hidroxilo añadido:

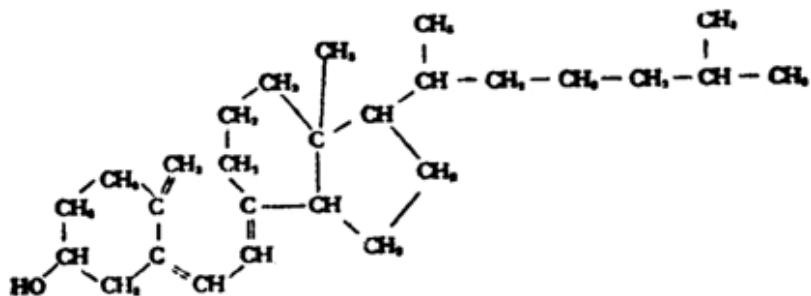


Los químicos que buscaban la vitamina D encontraron su mejor pista química por medio de la luz solar. Ya en 1921, el grupo McCollum (el primero en probar la existencia de la vitamina) demostró que las ratas no desarrollaban raquitismo aún con una dieta sin vitamina D, si eran expuestas a la luz solar. Los bioquímicos

supusieron que la energía de la luz solar convertía alguna provitamina de su cuerpo en vitamina D. Puesto que la vitamina D era soluble en las grasas, se pusieron a buscar la provitamina en las sustancias grasas de los alimentos.

Descomponiendo las grasas y exponiendo cada fragmento por separado a la luz del sol, determinaron que la provitamina que la luz del sol convertía en vitamina D era un esteroide. ¿Qué esteroide? Probaron el colesterol, el esteroide más corriente en el organismo, pero no era éste. Más tarde, en 1926, los bioquímicos británicos Otto Rosenheim y T. A. Webster descubrieron que la luz solar debía convertir un esteroide muy parecido, el «ergosterol» (así llamado porque fue aislado por vez primera a partir del cornezuelo del centeno) en vitamina D. El químico alemán Adolf Windaus descubrió lo mismo por su cuenta, y aproximadamente en la misma fecha. Por éste y otros trabajos sobre los esteroides, Windaus recibió el premio Nobel de Química en 1928.

La dificultad en producir vitamina D a partir del ergosterol estribaba en el hecho de que el ergosterol no está presente en los animales. La provitamina humana fue identificada finalmente como «7-dehidrocolesterol», que difiere del colesterol en que tiene dos átomos de hidrógeno menos en su molécula. La vitamina D formada a partir del mismo tiene esta fórmula:



La vitamina D se llama, en una de sus formas, «calciferol», de las palabras latinas que significan «portador de calcio», porque es esencial para la correcta formación de la estructura ósea.

No todas las vitaminas denuncian su ausencia produciendo una enfermedad aguda. En 1922, Herbert McLean Evans y K. J. Scott, de la Universidad de California, consideraron que había una vitamina implicada en la causa de la esterilidad en los animales. Evans y su grupo no consiguieron aislarla hasta 1936; era la vitamina E.

Se le dio el nombre de «tocoferol» (derivada de las palabras griegas que significan «para tener niños»).

Por desgracia, no se sabe si los seres humanos necesitan vitamina E, ni en qué cantidad. Obviamente, los experimentos dietéticos destinados a provocar la esterilidad no pueden realizarse en el hombre. E, incluso en los animales, el hecho de que puedan ser esterilizados suprimiendo la vitamina E no significa necesariamente que la esterilidad natural se origine por esta causa.

En la década de 1930, el bioquímico danés Carl Peter Henrik Dam descubrió, por medio de experimentos en pollos, que en la coagulación de la sangre intervenía una vitamina. La llamó *Koagulationsvitamine*, y eventualmente este término se acortó para denominarlo vitamina K. Edward Doisy y sus colaboradores en la St. Louis University aislaron la vitamina K y determinaron su estructura. Dam y Doisy compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1943.

La vitamina K no es una vitamina principal, ni un problema nutricional. Normalmente, las bacterias de los intestinos producen una cantidad mas que suficiente de esta vitamina. De hecho, fabrican tanta que las heces pueden ser más ricas en vitamina K que los propios alimentos. Los recién nacidos son quienes más probabilidades tienen de padecer una deficiencia en la coagulación sanguínea, con las consiguientes hemorragias, por deficiencia en vitamina K. En los modernos e higiénicos hospitales, los niños necesitan tres días para acumular una cantidad razonable de bacterias intestinales; se protege al niño y a la madre antes del nacimiento, mediante inyecciones de vitamina. Antiguamente los niños adquirían las bacterias casi al nacer, y, aunque podían morir de diversas enfermedades e infecciones, estaban a salvo, al menos, de los peligros de la hemorragia.

De hecho, podríamos preguntarnos si sería factible que los intestinos vivieran en una completa carencia de bacterias intestinales o si la simbiosis no se ha vuelto demasiado íntima para prescindir de ella. Sin embargo, existen animales que se han desarrollado, desde el momento de su nacimiento, en condiciones de total esterilidad, e incluso han podido reproducirse en tales condiciones. Han sido mantenidos así ratones a través de doce generaciones. Se han efectuado experimentos de este tipo en la Universidad de Notre Dame, desde 1928.

A finales de la década de 1930 y principios de los años cuarenta, los bioquímicos identificaron unas cuantas vitaminas B adicionales, que hoy se conocen con los nombres de biotina, ácido pantoténico, piridoxina, ácido fólico y cianocobalamina. Estas vitaminas son producidas todas por las bacterias intestinales; es más, se hallan presentes de forma tan universal en todos los alimentos que no han aparecido casos de enfermedades carenciales. De hecho, los investigadores han tenido que alimentar a los animales con dietas especiales que las excluyeran deliberadamente, e incluso añadir «antivitaminas» para neutralizar las fabricadas por las bacterias intestinales, con objeto de ver cuáles son los síntomas de deficiencia. (Las antivitaminas son sustancias similares a las vitaminas en su estructura. Inmovilizan la enzima, evitando que haga uso de la vitamina, por medio de una inhibición competitiva.) La determinación de la estructura de cada una de las distintas vitaminas fue seguida normalmente, al cabo de muy poco tiempo (e incluso fue precedida), por la síntesis de la misma. Por ejemplo, Williams y su grupo sintetizaron la tiamina en 1937, tres años después de haberse dilucidado su estructura. El bioquímico suizo de origen polaco, Tadeus Reichstein, y su grupo, sintetizaron el ácido ascórbico en 1933, poco antes de que su estructura fuese determinada completamente por King. Otro ejemplo: la vitamina A fue sintetizada en 1936 (también antes de que se completase su estructura) por dos grupos distintos de químicos.

El empleo de vitaminas sintéticas ha permitido reforzar los alimentos (la leche fue el primero de ellos en ser reforzado con vitaminas, ya en 1924) y preparar mezclas vitamínicas a precios razonables para venderlas en las farmacias. La necesidad de tabletas vitamínicas varía con los individuos. De todas las vitaminas, la que con mayor facilidad presenta casos de deficiencia es la vitamina D. Los niños pequeños de los climas norteños, donde la luz solar es débil en el invierno, corren peligro de raquitismo, por lo que pueden requerir alimentos irradiados o suplementos vitamínicos. Pero la dosis de vitamina D (y de vitamina A) debe ser cuidadosamente controlada, ya que una sobredosis puede ser perjudicial. En cuanto a las vitaminas B, cualquiera que esté sujeto a una dieta normal no necesita tomar tabletas. Lo mismo sucede con la vitamina C, que en todo caso no debería presentar problema alguno, ya que hay muy poca gente a la que no le guste el zumo de naranja y que

no lo beba regularmente, en estos tiempos en los que se es consciente de la importancia de las vitaminas.

En conjunto, el uso de tabletas vitamínicas, aparte de redundar en beneficio de los laboratorios farmacéuticos, normalmente no perjudica a la gente, y, posiblemente gracias a ellas, la presente generación tiene mayor talla y más peso que las anteriores.

Naturalmente, los bioquímicos sentían curiosidad por averiguar cómo las vitaminas, presentes en el organismo en cantidades tan pequeñas, ejercían efectos tan importantes en la química corporal. La deducción obvia era que tenían algo que ver con las enzimas, también presentes en pequeñas cantidades.

La respuesta llegó finalmente a través de detallados estudios sobre la química de las enzimas. Los químicos dedicados al estudio de las proteínas sabían desde hacía tiempo que algunas proteínas no estaban formadas únicamente de aminoácidos, y que podían existir grupos protéticos no aminoácidos, como el heme en la hemoglobina (véase capítulo X). En general, estos grupos protéticos tendían a estar fuertemente unidos al resto de la molécula. Sin embargo, en las enzimas existían, en algunos casos, porciones no aminoácidas que estaban unidas muy ligeramente y podían ser extraídas sin demasiados problemas.

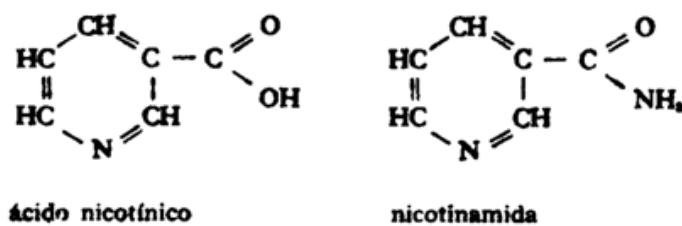
Ello fue descubierto, en 1904, por Arthur Harden (que poco después descubriría compuestos intermedios que contenían fósforo; véase capítulo XI). Harden trabajó con un extracto de levadura capaz de provocar la fermentación del azúcar. Lo colocó en una bolsa hecha con una membrana semipermeable e introdujo la bolsa en agua dulce. Las moléculas pequeñas podían traspasar la membrana, pero la molécula de proteína, de un tamaño mayor, no podía hacerlo. Después que esta «diálisis» hubiera progresado durante un tiempo, Harden descubrió que se había perdido la actividad del extracto. Ni el fluido del interior de la bolsa ni el del exterior de la misma podían hacer fermentar el azúcar. Si se combinaban ambos fluidos, la actividad se reemprendía.

Aparentemente, la enzima estaba formada no sólo por una gran molécula de proteína, sino también por una molécula de «coenzimas», lo suficientemente pequeña como para pasar a través de los poros de una membrana.

La coenzima era esencial para la actividad de la enzima (como si dijéramos el «filo del cuchillo»).

Inmediatamente, los químicos se plantearon el problema de determinar la estructura de esta coenzima (y de parecidos elementos adicionales a otras enzimas). El químico de la Suiza alemana Hans Karl August Simon von Euler-Chelpin fue el primero en obtener un progreso real en este sentido. Como resultado, él y Harden compartieron el premio Nobel de Química en 1929.

La coenzima de la enzima de levadura estudiada por Harden consistía en una combinación de una molécula de adenina, dos moléculas de ribosa, dos grupos de fosfato y una molécula de «nicotinamida». Sin embargo, esta última era una forma que no se encuentra normalmente en los tejidos vivos, por lo que el interés se centró naturalmente en ella. (Se llama «nicotinamida» porque contiene un grupo amida,  $\text{NH}_2\text{CO}$ , y puede formarse fácilmente a partir del ácido nicotínico. El ácido nicotínico está relacionado estructuralmente con el alcaloide del tabaco «nicotina», pero ambos son muy distintos en cuanto a sus propiedades; el ácido nicotínico es necesario para la vida, mientras que la nicotina es un veneno mortal.) Las fórmulas de la nicotinamida y el ácido nicotínico son:



Una vez determinada la fórmula, se la rebautizó pronto con el nombre de «nucleótido difosfopiridina» (DPN) -«nucleótido» por la característica disposición de la adenina, ribosa y fosfato, similar a la de los nucleótidos que forman el ácido nucleico, y «piridina» por el nombre dado a la combinación de átomos que forman el anillo en la fórmula de la nicotinamida.

Pronto se encontró una coenzima muy similar, que difería del DPN únicamente en que contenía tres grupos de fosfato en lugar de dos. A éste, naturalmente, se lo denominó «nucleótido trifosfopiridina» (TPN). Ambos, el DPN y el TPN, demostraron ser coenzimas de determinadas enzimas corporales, todas con la misión de

transferir átomos de hidrógeno de una molécula a otra. (Tales enzimas se denominan «deshidrogenasa».) Era la coenzima la que realizaba el verdadero trabajo de transferir el hidrógeno; la enzima apropiada en cada caso seleccionaba el sustrato en el que debía realizarse esta operación.

La enzima y la coenzima tenían, cada una, una función vital, y, si faltaba cualquiera de ellas, la liberación de la energía de los alimentos por medio de la transferencia de hidrógeno se retardaba hasta debilitarse.

Lo más sorprendente era que el grupo nicotinamida representaba la única parte de la enzima que el cuerpo no podía producir por sí mismo. El cuerpo humano puede fabricar todas las proteínas que necesita y todos los ingredientes del DPN y del TPN a excepción de la nicotinamida; ésta debe encontrarse ya elaborada (o al menos en forma de ácido nicotínico) en la dieta.

De lo contrario, se detiene la producción de DPN y TPN y todas las reacciones de transferencia de hidrógeno controlada por ellos se retardan.

¿Era la nicotinamida o el ácido nicotínico una vitamina? Funk (el hombre que acuñó la palabra «vitamina») había aislado ácido nicotínico a partir de la cascarilla del arroz. El ácido nicotínico no era la sustancia que curaba el beriberi, y, por tanto, lo ignoró. Pero, debido a la aparición del ácido nicotínico en relación con las coenzimas, el bioquímico Conrad Arnold Elvehjem y sus colaboradores de la Universidad de Wisconsin lo probaron en otra enfermedad carencial.

En la década de 1920, el físico norteamericano Joseph Goldberger había estudiado la pelagra (algunas veces denominada lepra italiana), una enfermedad endémica en el Mediterráneo y casi epidémica en el sur de los Estados Unidos a principio de este siglo. Los signos más evidentes de la pelagra son una piel seca, escamosa, diarrea y lengua inflamada; algunas veces provoca trastornos mentales. Goldberger observó que la enfermedad afectaba a aquellas personas que tenían una dieta muy limitada (principalmente harina de maíz), y llegaba a diezmar a las familias que poseían una vaca lechera. Comenzó a experimentar con dietas artificiales, alimentando con ellas a animales y a los presos de la cárcel (donde la pelagra parecía frecuente). Por último, consiguió provocar en los perros la «lengua negra» (una enfermedad análoga a la pelagra) y curarla con un extracto de levadura.

Descubrió que podía curar la pelagra en los presidiarios añadiendo leche en su dieta. Goldberger decidió que aquel hecho estaba relacionado con la existencia de alguna vitamina y la denominó factor P-P («preventivo de la pelagra»).

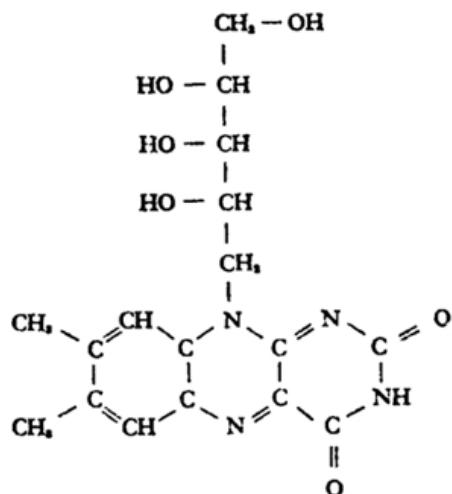
Fue la pelagra la enfermedad escogida por Elvehjem para probar el ácido nicotínico. Administró una pequeña dosis de éste a un perro con lengua negra y el perro respondió mejorando considerablemente. Unas pocas dosis más lo curaron por completo. El ácido nicotínico era, pues, una vitamina; era el factor P-P.

La «Asociación Médica Americana», preocupada por la posibilidad de que la gente creyese que el tabaco contenga vitaminas, propuso que la vitamina no fuese denominada ácido nicotínico, y sugirió, para sustituir este nombre, los de «niacina» (una abreviatura de *ácido nicotínico*) o «niacinamida».

Niacina fue el término que se popularizó. Gradualmente se fue poniendo de manifiesto que las diversas vitaminas no eran más que porciones de coenzimas, cada una consistente en un grupo molecular que ni los animales ni tampoco el hombre podían producir por sí mismos.

En 1932, Warburg había descubierto una coenzima amarilla que catalizaba la transferencia de átomos de hidrógeno.

El químico austriaco Richard Kuhn y sus colaboradores aislaron poco después la vitamina B<sub>2</sub>, que probó ser amarilla, y que presentaba la siguiente estructura:



La cadena de carbono ligada al anillo medio es como una molécula denominada «ribitol», por lo que la vitamina B<sub>2</sub> fue denominada «riboflavina» (el término «flavina» proviene de una palabra latina que significa «amarillo»). Puesto que el

examen de su espectro mostraba que la riboflavina era muy similar en cuanto a color a la coenzima amarilla de Warburg, Kuhn, en 1935, estudió la coenzima en busca de la actividad de la riboflavina y encontró que así sucedía. En el mismo año, el bioquímico sueco Hugo Theorell dilucidó la estructura de la coenzima amarilla de Warburg y demostró que se trataba de la riboflavina con la adición de un grupo fosfato. (En 1954, se demostró que una segunda y más complicada coenzima tenía riboflavina como parte de su molécula.)

Kuhn fue galardonado con el premio Nobel de Química en 1938, y Theorell recibió el de Medicina y Fisiología en 1955. Sin embargo, Kuhn tuvo la desgracia de ser seleccionado para el premio poco después de que Austria fuese absorbida por la Alemania nazi y (al igual que Gerhard Domagk) se vio obligado a rechazarlo.

La riboflavina fue sintetizada, independientemente, por el químico suizo Paul Karrer. Por éste y otros trabajos en el campo de las vitaminas, Karrer fue galardonado con el premio Nobel de Química en 1937 (compartiéndolo con el químico inglés Walter Norman Haworth, quien había determinado la estructura de las moléculas de los hidratos de carbono).

En 1937, los bioquímicos alemanes K. Lohmann y P. Schuster descubrieron una importante coenzima que contenía tiamina como parte de su estructura. Durante los años cuarenta se descubrieron otras conexiones entre las vitaminas del grupo B y las coenzimas. Piridoxina, ácido pantoténico, ácido fólico y biotina mostraron una tras otra estar ligadas a uno o más grupos de enzimas.

Las vitaminas ilustran de forma excelente la estructura de la economía química del organismo humano. La célula humana no las fabrica, porque sirven únicamente para funciones especiales; por ello corre el razonable riesgo de buscar los suministros necesarios en la dieta. Hay otras muchas sustancias vitales que el cuerpo necesita sólo en pequeñísimas cantidades, pero que debe fabricar por sí mismo. El ATP, por ejemplo, se forma a partir de los mismos elementos con los que se producen los indispensables ácidos nucleicos. Es inconcebible que ningún organismo pueda perder alguna enzima necesaria para la síntesis del ácido nucleico y seguir vivo, porque el ácido nucleico se necesita en tales cantidades que el organismo no puede confiar en la dieta para obtener los elementos necesarios para producirlo. Y ser capaz de crear ácido nucleico implica automáticamente la

capacidad de producir ATP. En consecuencia, no se conoce organismo alguno que sea incapaz de fabricar su propia ATP, y, con toda seguridad no descubrirá nunca ninguno. Producir elementos tan esenciales como las vitaminas sería como instalar una maquinaria especial, junto a una cadena de montaje de automóviles, para tornear los pernos y las tuercas. Los pernos y las tuercas pueden obtenerse mucho más fácilmente de otro proveedor auxiliar, sin interferir para nada en la cadena de montaje; del mismo modo, el organismo puede obtener las vitaminas de su dieta, ahorrando así espacio y material.

Las vitaminas ilustran otros hechos muy importantes sobre la vida. Por lo que se sabe, todas las células vivas necesitan vitaminas del grupo B. Las coenzimas son una parte esencial del mecanismo celular de cualquier célula viva, planta, animal o bacteria. La célula puede conseguir la vitamina B de su dieta o fabricarla por sí misma, pero en cualquier caso la necesita si quiere vivir y crecer. Esta necesidad universal de un grupo determinado de sustancias constituye una impresionante prueba de la unidad esencial de todos los seres vivos y de su ( posible) descendencia de una primera fuente de vida formada en el primitivo océano.

Mientras que el papel de las vitaminas del grupo B es bien conocido en la actualidad, las funciones químicas de las demás vitaminas ha encontrado siempre mayores dificultades. La única en la que se ha conseguido un avance concreto ha sido la vitamina A.

En 1925, los fisiólogos norteamericanos L. S. Fridericia y E. Holm descubrieron que las ratas alimentadas con una dieta deficitaria en vitamina A no podían desarrollar normalmente sus actividades, si había poca luz. Un examen de sus retinas demostró que eran deficitarias en una sustancia denominada «púrpura visual».

Existen dos clases de células en la retina del ojo: «bastonadas» y «cónicas». Las bastonadas se especializan en la visión con luz escasa y contienen la púrpura visual. La escasez de púrpura visual, por tanto, afecta únicamente a la visión con poca luz y su resultado es lo que se conoce como «ceguera nocturna».

En 1938, el biólogo de Harvard, George Wald, comenzó a estudiar la química de la visión con poca luz. Demostró que la luz hacía que la púrpura visual, o «rodopsina» se separase en dos componentes: la proteína llamada «opsina» y una no proteína

llamada «retineno». El retineno demostró ser muy parecido en su estructura a la vitamina A.

En la oscuridad, el retineno se recombinaba siempre con la opsina para formar rodopsina. Pero, durante su separación de la opsina por efecto de la luz, un pequeño porcentaje se descompone, porque es muy inestable. Sin embargo, el suministro de retineno se completa a partir de la vitamina A, que es convertida en retineno por medio de la extracción, con la ayuda de enzimas, de dos átomos de hidrógeno. Así, la vitamina A actúa como una reserva de retineno. Si falta vitamina A en la dieta, el suministro de retineno y la cantidad de púrpura visual disminuye, de lo que resulta ceguera nocturna.

La vitamina A debe tener asimismo otras funciones, ya que una deficiencia de ella provoca sequedad de las membranas mucosas y otros síntomas que no pueden ser exactamente fijados, pero que se traducen en trastornos en la retina del ojo. Sin embargo, dichas funciones continúan desconociéndose.

Lo mismo puede decirse sobre las funciones químicas de las vitaminas C, D, E y K. En 1970, Linus Pauling armó un gran revuelo al afirmar que dosis masivas de vitamina C podrían reducir la incidencia de resfriados. El público agotó las existencias de la vitamina que había en las farmacias. Sin duda, esta teoría habría de sufrir una seria prueba.

## Minerales

Es lógico suponer que los materiales que constituyen algo tan asombroso como el tejido vivo deben ser también, a su vez, algo hermoso y exótico. Las proteínas y los ácidos nucleicos son ciertamente asombrosos, pero, sin embargo, es humillante comprobar que los demás elementos que constituyen el cuerpo humano son tan corrientes como el barro, y que todo el conjunto podría ser comprado por unos pocos dólares. (Debiera haber utilizado «centavos», pero la inflación ha aumentado el precio de las cosas.) A principios del siglo XIX, cuando los químicos estaban empezando a analizar los compuestos orgánicos, resultó evidente que el tejido vivo estaba constituido, principalmente, por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Sólo estos cuatro elementos constituían aproximadamente el 96 % de la masa del cuerpo humano. Además, existía también algo de azufre en el cuerpo. Si se queman

estos cinco elementos, se hallará una pequeña cantidad de ceniza blanca, en gran parte residuo de los huesos. Esta ceniza es un conjunto de minerales.

No es sorprendente hallar sal común, cloruro sódico, en las enzimas. Después de todo, la sal no es únicamente un condimento para mejorar el sabor de la comida - del que se puede prescindir-, como de la albahaca, el romero o el tomillo. Es un asunto de vida o muerte, únicamente se necesita paladear un poco de sangre para comprobar que la sal es un componente básico del organismo. Los animales herbívoros, que probablemente no son nada sofisticados en lo que se refiere a las delicias en la preparación de los alimentos, soportarán, sin embargo, grandes peligros y privaciones para conseguir una «lengüeta de sal», compensando así la carencia de ella en su dieta de hierbas y hojas.

En una época tan antigua como mediados del siglo XVIII, el químico sueco Johann Gottlieb Gahn había demostrado que los huesos están constituidos, en su mayor parte, de fosfato cálcico, y un científico italiano, V. Menghini, había establecido que la sangre contenía hierro. En 1847, Justus von Liebig halló potasio y magnesio en los tejidos. Posteriormente, a mediados del siglo XIX, los constituyentes minerales del cuerpo conocidos incluían calcio, fósforo, sodio, potasio, cloro, magnesio y hierro. Además, éstos resultaban ser tan activos en el proceso vital como cualquiera de los elementos generalmente asociados a los compuestos orgánicos.

El caso del hierro es el más evidente. Si falta en la dieta, la sangre se vuelve deficiente en hemoglobina y transporta menos oxígeno de los pulmones a las células. Esta enfermedad es conocida como la «anemia por deficiencia de hierro». El paciente empalidece, al carecer del pigmento rojo, y se fatiga debido a la escasez de oxígeno. En 1882, el médico inglés Sidney Ringer halló que el corazón de una rana podía ser mantenido con vida y latiendo, fuera de su cuerpo, en una solución (llamada «solución de Ringer») que contenía, entre otras cosas, sodio, potasio y calcio, en aproximadamente las mismas proporciones halladas en la sangre de la rana. Todos eran esenciales para el funcionamiento del músculo. Un exceso de calcio determinaba que el músculo se contrajera de modo permanente («rigor del calcio»), mientras que un exceso de potasio obligaba al músculo a una relajación constante («inhibición del potasio»). Además, el calcio era vital para la coagulación de la sangre.

En su ausencia, la sangre no se coagulaba, y ningún otro elemento podía sustituir el calcio en este sentido.

Eventualmente se descubrió que, de todos los minerales, el fósforo era el que conseguía las funciones más variadas y cruciales en la mecánica química de la vida (véase capítulo XII).

El calcio, un componente principal del hueso, constituye el 2 % del peso total del cuerpo; el fósforo, el 1 %.

Los otros minerales mencionados están presentes en pequeñas proporciones, el menor de ellos el hierro, que forma solamente el 0,004 % del total del cuerpo humano.

(Esto permite todavía que exista un promedio de 2,8 g de hierro en los tejidos de un varón adulto.)

Pero no hemos llegado todavía al final de la lista; existen otros minerales que, aunque presentes en los tejidos en cantidades sólo difícilmente detectables, sin embargo, son esenciales para la vida.

La mera presencia de un elemento no es necesariamente significativa; puede ser tan sólo una impureza. En nuestra comida, ingerimos por lo menos trazas de todos los elementos de nuestro medio ambiente, y pequeñas cantidades de ellos pueden hallar el camino hasta nuestros tejidos. Pero elementos tales como la sílice y el aluminio, por ejemplo, no nos aportan absolutamente nada.

Por el contrario, el cinc es vital. ¿Cómo puede distinguirse un mineral esencial de una impureza accidental? La mejor forma de conseguirlo es demostrar que alguna enzima necesaria contenga el elemento en forma de traza como un componente esencial. (¿Por qué una enzima? Porque cualquier elemento en forma de traza [llamado oligoelemento] posiblemente no puede de ningún otro modo desempeñar un papel importante.)

En 1939, David Keilin y T. Mann, de Inglaterra, demostraron que el cinc formaba parte integral de la enzima anhidrasa carbónica.

Ahora bien, la anhidrasa carbónica es esencial para la asimilación por parte del cuerpo del anhídrido carbónico, y el adecuado manejo de aquel importante material de residuo es a su vez esencial para la vida. De ello se deduce la teoría de que el cinc es indispensable para la vida, y los experimentos demuestran que realmente es

así. Ratas alimentadas con una dieta pobre en cinc detienen su crecimiento, pierden vello, sufren escamosis de la piel y mueren prematuramente a causa de la carencia de cinc, del mismo modo que si carecieran de una vitamina.

Del mismo modo se ha demostrado que el cobre, el manganeso, el cobalto y el molibdeno son esenciales para la vida animal. Su ausencia en la dieta da lugar a enfermedades carenciales. El molibdeno, el último de los oligoelementos esenciales en ser identificado (en 1954), es un componente de una enzima llamada «xantinooxidasa». La importancia del molibdeno fue comprobada en primer lugar, en 1940, en relación con las plantas, cuando los científicos investigadores del suelo hallaron que las plantas no crecían adecuadamente en aquellos suelos que eran deficientes en este elemento. Parece que el molibdeno es un componente de ciertas enzimas en microorganismos presentes en el terreno, que catalizan la conversión del nitrógeno del aire en compuestos nitrogenados. Las plantas dependen de esta ayuda procedente de los microorganismos, porque no pueden por sí mismas obtener el nitrógeno a partir del aire. (Éste es solamente uno del considerable número de ejemplos que demuestran la estrecha interdependencia de toda la vida en nuestro planeta. El mundo viviente es una larga e intrincada cadena que puede sufrir cierto perjuicio, o incluso un desastre, si se rompe algún eslabón.)

#### MINERALES NECESARIOS PARA LA VIDA

<i>Sodio (Na)</i>	<i>Cinc (Zn)</i>
<i>Potasio (K)</i>	<i>Cobre (Cu)</i>
<i>Calcio (Ca)</i>	<i>Manganeso (Mn)</i>
<i>Fósforo (P)</i>	<i>Cobalto (Co)</i>
<i>Cloro (Cl)</i>	<i>Molibdeno (Mo)</i>
<i>Magnesio (Mg)</i>	<i>Yodo (I)</i>
<i>Hierro (Fe)</i>	

No todos los «oligoelementos» son universalmente esenciales. El boro parece serlo en forma de trazas para la vida vegetal, pero no, aparentemente, para los animales. Ciertos tunicados acumulan vanadio a partir del agua de mar y lo utilizan en su componente transportador de oxígeno, pero pocos de los demás animales, si es que

existe alguno más, necesitan vanadio por motivo alguno. Se ha comprobado hoy en día que existen desiertos de oligoelementos, al igual que existen desiertos carentes de agua; ambos generalmente aparecen juntos, pero no siempre. En el suelo de Australia, los científicos han hallado que unos 28 g de molibdeno, en forma de algún compuesto apropiado, esparcidos sobre unas 6,5 Ha de tierra con deficiencia de él, se traduce en un considerable incremento en la fertilidad. Tampoco es éste solamente un problema de las tierras exóticas. Un estudio de la tierra de laboreo americana, en 1960, mostró la existencia de áreas de deficiencia de boro en 41 Estados. La dosificación de los oligoelementos es crucial. Es tan perjudicial en exceso como por defecto, ya que algunas sustancias que son esenciales para la vida en pequeñas cantidades (por ejemplo, el cobre) en grandes cantidades se transforman en venenosas.

Esto, por supuesto, conduce, como una consecuencia lógica, a la muy antigua costumbre de utilizar «fertilizantes» para el suelo. Hasta los tiempos modernos, la fertilización era realizada mediante el uso de los excrementos de los animales, abono o guano, que restituían el nitrógeno y el fósforo al suelo. Sin embargo, la operación estaba en todo momento acompañada de olores desagradables y de la siempre presente posibilidad de una infección. La sustitución de éstos por los fertilizantes químicos, limpios y libres de olor, fue conseguida gracias al trabajo de Justus von Liebig, a principios del siglo XIX.

Uno de los episodios más espectaculares en el descubrimiento de las deficiencias en minerales tuvo lugar con el cobalto. Relacionada con ello estaba la fatal enfermedad, en otro tiempo incurable, llamada «anemia perniciosa».

A principios de la década de 1920, el patólogo de la Universidad de Rochester, George Hoyt Whipple estaba experimentando sobre la reposición de la hemoglobina por medio de diversas sustancias alimentarias. Había sangrado a perros, con objeto de inducir en ellos una anemia, y luego los había alimentado con diversas dietas, para ver cuál de ellas permitía recuperar con mayor rapidez la perdida hemoglobina. No realizaba este experimento porque estuviera interesado en la anemia perniciosa, o en cualquier otro tipo de anemia, sino debido a que se dedicaba a investigar los pigmentos biliares, compuestos producidos por el organismo a partir de la

hemoglobina. Whipple descubrió que el alimento que permitía a los perros producir más rápidamente hemoglobina era el hígado.

En 1926, dos médicos de Boston, George Richards Minot y William Parry Murphy, consideraron los resultados de Whipple y decidieron probar el hígado como tratamiento para los pacientes con anemia perniciosa. El tratamiento prosperó. La enfermedad incurable podía ser curada, cuando los pacientes ingerían hígado como una parte de su dieta. Whipple, Minot y Murphy compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1934.

Por desgracia, el hígado, aunque es un plato exquisito cuando se cocina apropiadamente, y luego se corta y mezcla cuidadosamente con elementos tales como los huevos, la cebolla y los menudillos de pollo, se convierte en algo insopportable cuando se emplea como dieta permanente. (Al cabo de un tiempo, un paciente podría estar tentado a considerar que la anemia perniciosa resulta preferible a este tratamiento.) Los bioquímicos se dedicaron a investigar la sustancia curativa del hígado, y, en 1930, Edwin Joseph Cohn y sus colaboradores de la Harvard Medical School prepararon un concentrado cien veces más potente que el propio hígado. Sin embargo, para aislar el factor activo fue necesaria una posterior purificación. Por suerte, los químicos de los «Laboratorios Merck» descubrieron, en los años cuarenta, que el concentrado de hígado podía acelerar el crecimiento de ciertas bacterias. Esto proporcionaba una fácil prueba de la potencia de cualquier preparado de éste, de forma que los bioquímicos procedieron a escindir el concentrado en fracciones y a ensayarlas en rápida sucesión. Debido a que la bacteria reaccionaba con la sustancia hepática, en gran parte de la misma forma con que reaccionaba ante la tiamina o la riboflavina, los investigadores sospecharon entonces con fundadas razones que el factor que estaban buscando era una vitamina B. Lo llamaron «vitamina B<sub>12</sub>».

En 1948, utilizaron la respuesta bacteriana y la cromatografía, Ernest Lester Smith, en Inglaterra, y Karl August Folkers, en los «Laboratorios Merck», consiguieron aislar muestras puras de vitamina B<sub>12</sub>. La vitamina demostraba ser una sustancia roja, y ambos científicos pensaron que su color era parecido al de ciertos compuestos de cobalto. Por aquel tiempo se sabía que una deficiencia de cobalto causaba una anemia grave en el ganado y las ovejas. Tanto Smith como Folkers

quemaron muestras de vitamina B<sub>12</sub>, analizaron las cenizas y hallaron que éstas realmente contenían cobalto. El compuesto fue denominado entonces «cianocobalamina». Hasta hoy, es el único compuesto con un contenido de cobalto que ha sido hallado en el tejido vivo.

Por descomposición y posterior examen de los fragmentos, los químicos decidieron rápidamente que la vitamina B<sub>12</sub> era un compuesto extremadamente complicado, y elaboraron una fórmula empírica de C<sub>63</sub>H<sub>88</sub>O<sub>14</sub>N<sub>94</sub>PCo. Más tarde, un químico británico, Dorothy Crowfoot Hodgkin, determinó su estructura global por medio de los rayos X. El tipo de difracción establecido por los cristales del compuesto permitía crear una imagen de las «densidades electrónicas» a lo largo de la molécula, es decir, de aquellas regiones donde la probabilidad de hallar algún electrón era elevada y de aquellas otras donde esta probabilidad era escasa. Si se trazaban líneas que unieran las regiones con la misma probabilidad, se creaba una especie de imagen esquemática de la forma de la molécula en conjunto.

Esto no resulta tan fácil como parece. Las moléculas orgánicas complicadas pueden producir una dispersión de rayos X verdaderamente formidable en su complejidad. Las operaciones matemáticas requeridas para traducir esta dispersión en densidades electrónicas era enormemente tediosa. En 1944, habían sido solicitadas computadoras electrónicas para colaborar en la formulación estructural de la penicilina. La vitamina B<sub>12</sub> era mucho más complicada, y Miss Hodgkin tuvo que utilizar una computadora aún más avanzada -el «National Bureau of Standards Western Automatic Computer» (SWAC)- y realizar una pesada labor preparatoria. Sin embargo, esta labor, eventualmente, le representó el premio Nobel de Química, en 1964.

La molécula de vitamina B<sub>12</sub>, o cianocobalamina, resultó ser un anillo de porfirina asimétrico, en el que se ha perdido el puente de carbono que une a dos de los pequeños anillos, pirrólicos, y con complicadas cadenas laterales en los anillos pirrólicos. Parecía de algún modo más simple que la molécula del heme, pero con esta diferencia clave: donde el heme poseía un átomo de hierro en el centro del anillo porfirínico, la cianocobalamina tenía un átomo de cobalto.

La cianocobalamina es activa en muy pequeñas cantidades cuando se inyecta en la sangre de los pacientes con anemia perniciosa. El organismo puede subsistir

solamente con una cantidad de esta sustancia equivalente a la milésima parte de la que precisa de las otras vitaminas B. Cualquier dieta, por tanto, tendría suficiente cianocobalamina para nuestras necesidades. Incluso si esto no ocurría, las bacterias fabricaban en los intestinos rápidamente una pequeña cantidad de ella. ¿Por qué, entonces, podía llegar a producirse anemia perniciosa alguna? En apariencia, los que sufren esta enfermedad son simplemente aquellos que no pueden absorber suficiente vitamina en su cuerpo a través de las paredes intestinales.

Sus heces son realmente ricas en la vitamina (cuya pérdida le está causando la muerte). A partir de los alimentos que están constituidos por hígado, que proporciona un aporte de la vitamina particularmente abundante, tales pacientes consiguen absorber suficiente cianocobalamina para sobrevivir. Pero necesitan cien veces más cantidad de vitamina, si la ingieren por vía oral, que si lo hacen por inyección directa en la sangre.

Algo debe funcionar mal en el aparato intestinal del paciente, impidiendo el paso de la vitamina a través de las paredes de los intestinos. Desde 1929 se ha sabido, gracias a las investigaciones del médico americano William Bosworth Castle, que la respuesta reside de algún modo en el jugo gástrico. Castle llamó «factor intrínseco» al necesario componente del jugo gástrico, y en 1954, los investigadores hallaron un producto, procedente de la mucosa que reviste el estómago de los animales, el cual ayuda a la absorción de la vitamina y demuestra ser el factor intrínseco de Castle. En apariencia, dicha sustancia no existe en aquellos pacientes con anemia perniciosa. Cuando una pequeña cantidad de ella se mezcla con la cianocobalamina, el paciente no tiene ninguna dificultad en absorber la vitamina a través de los intestinos. El modo exacto como el factor intrínseco ayuda a la absorción no se conoce todavía.

Volviendo a los elementos en forma de trazas... El primero en ser descubierto no fue un metal, sino el yodo, un elemento con propiedades parecidas a las del cloro. Esta historia empieza con la glándula tiroides.

En 1896, un bioquímico alemán, Eugen Baumann, descubrió que el tiroides se distinguía por contener yodo, elemento éste prácticamente ausente de todos los demás tejidos. En 1905, un médico llamado David Marine, que había realizado sus prácticas en Cleveland, se sorprendió de la considerable frecuencia con que el bocio

se presentaba en aquella zona. El bocio es una enfermedad conspicua, que en ocasiones produce un aumento de tamaño exagerado del tiroides y hace que sus víctimas se vuelvan torpes y apáticas, o bien nerviosas, superactivas y con ojos saltones. Por el desarrollo de técnicas quirúrgicas en el tratamiento del tiroides anormal, con el consiguiente alivio de las enfermedades bociogénas, el médico suizo Emil Theodor Kocher mereció, en 1909, el premio Nobel de Medicina y Fisiología.

Pero Marine se preguntaba si el aumento de tamaño del tiroides no podía ser resultado de una deficiencia del yodo, el único elemento en el que el tiroides estaba especializado, y si el bocio no podría ser tratado más sabia y expeditivamente mediante fármacos que recurriendo al bisturí. La deficiencia de yodo y la frecuencia del bocio, en el área de Cleveland, podían muy bien estar relacionados, ya que Cleveland, al estar situada muy hacia el interior, podía carecer de yodo, que era tan abundante en el suelo de las regiones cercanas al océano y en los alimentos procedentes del mar que forman una parte importante de la dieta en tales lugares.

Marine experimentó en animales, y, al cabo de diez años, se consideró suficientemente seguro como para intentar administrar compuestos que contenían yodo a sus pacientes de bocio. Probablemente no resultó demasiado sorprendido al encontrar que este tratamiento prosperaba. Más tarde, Marine sugirió que debían añadirse compuestos que contenían yodo a la sal de mesa y a la provisión de agua en las ciudades del interior en las que el terreno fuera pobre en yodo. Sin embargo, esto despertó una fuerte oposición, y se necesitaron otros diez años para conseguir que fuese aceptada de un modo general la yodación del agua y la sal yodada. Una vez que los suplementos de yodo se convirtieron en una rutina, el bocio simple perdió su importancia como una de las calamidades de la Humanidad.

Hoy día, los investigadores americanos (y el público) están comprometidos en estudios y discusiones sobre una cuestión de salud muy parecida -la fluoración del agua, para impedir la caries dental. Este problema todavía está despertando una gran controversia en el terreno político y no científico; hasta ahora, la oposición ha sido mucho más insistente y triunfante que en el caso del yodo. Quizás una razón para ello es que la caries dental no parece un asunto tan grave como la desfiguración que produce el bocio.

En las primeras décadas de este siglo, los odontólogos se dieron cuenta de que la población en ciertas zonas de Estados Unidos (por ejemplo, algunas localidades de Arkansas) tendían a mostrar dientes oscuros -una especie de moteado del esmalte. Esta particularidad fue estudiada, hasta hallar un contenido de compuestos de flúor («fluoruros») superior al promedio en el agua natural de bebida en aquellas regiones. Al mismo tiempo, tuvo lugar otro interesante descubrimiento. Cuando el contenido de flúor en el agua era superior al promedio, la población mostraba un índice infrecuentemente bajo de caries dental. Por ejemplo, la ciudad de Salesburg, en Illinois, con flúor en su agua, ofrecía sólo un tercio de los casos de caries dental en los niños, que la vecina ciudad de Quincy, cuya agua prácticamente no contenía flúor.

La caries dental no es un asunto despreciable, como podrá corroborar todo aquel que ha padecido un dolor de muelas. Representa un gasto a la población de los Estados Unidos superior a los mil quinientos millones de dólares anuales, en facturas al dentista, y dos tercios de todos los americanos han perdido al menos alguna de sus muelas a los 35 años de edad. Los investigadores en el campo de la odontología tuvieron éxito en la obtención de apoyo económico para sus estudios a amplia escala, encaminados a descubrir si la fluoración del agua sería beneficiosa y proporcionaría realmente ayuda para impedir la caries dental. Hallaron que una proporción de flúor, en el agua potable, de 1 : 1.000.000, con un costo estimado de 5 a 10 centavos por persona y año, no llegaba a manchar los dientes y, sin embargo, producía un efecto beneficioso en la prevención de la caries. Por tanto, adoptaron como medida dicha proporción para probar los efectos de la fluoración en las reservas de agua de la comunidad.

En efecto se produce, en primer lugar, en las personas cuyos dientes se están formando; es decir, en los niños.

La presencia de flúor en el agua potable asegura la incorporación de pequeñas cantidades de este elemento a la estructura dental; aparentemente, es esto lo que impide que el diente sea atacado por las bacterias. (El uso de pequeñas cantidades de flúor en forma de píldoras o pasta de dientes ha mostrado también cierto efecto protector contra la caries dental.) Hoy día, los odontólogos están convencidos, sobre la base de un cuarto de siglo de investigación, de que por muy poco dinero por

persona y año, la caries dental puede ser reducida en aproximadamente los dos tercios, con un ahorro de al menos mil millones de dólares al año en facturas al dentista, y un alivio del dolor y de las deficiencias dentarias que no puede ser medido en dinero. Las organizaciones odontológicas y médicas de la nación, el Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos y las agencias estatales sanitarias recomiendan la fluoración de los suministros públicos de agua, y, sin embargo, en el terreno político, la fluoración ha perdido la mayoría de las batallas. Cerca de 2.000 comunidades, con un total de unos 37 millones de personas, habían fluorado el agua al iniciarse la década de 1960, pero ha continuado existiendo mucha oposición. Un grupo llamado Comité Nacional Contra la Fluoración ha impulsado a una comunidad tras otra a votar contra la fluoración, e incluso a rechazarla en algunos lugares donde había sido adoptada. Se han usado los argumentos principales con el máximo efecto por los oponentes al sistema. Uno es que los compuestos de flúor son venenosos. ¡Lo son, en efecto, pero no en las dosis utilizadas para la fluoración! El otro es que la fluoración constituye una medicación obligatoria, lo cual infringe la libertad individual. Tal vez sea así, pero es un asunto discutible si el individuo en cualquier sociedad puede tener la libertad de exponer a los demás miembros a una enfermedad prevenible. Si la medicación obligatoria es algo pernicioso, entonces tenemos un problema no solamente con la fluoración, sino también con la cloración, la yodación e, igualmente, con todas las formas de inoculación, lo cual incluye la vacunación contra la viruela, que hoy es obligatorio en la mayor parte de los países civilizados del mundo.

## Hormonas

Enzimas, vitaminas, oligoelementos, ide qué forma tan poderosa estas sustancias diseminadas deciden sobre la vida o la muerte de los tejidos en el organismo! Pero existe un cuarto grupo de sustancias que, de algún modo, es aún más potente. Estas sustancias gobiernan la obra en conjunto; son como un conmutador general que despierta una ciudad a la actividad, o como la válvula reguladora que controla la máquina o la capa roja que excita al toro. A comienzos de siglo, dos fisiólogos ingleses, William Maddock Bayliss y Ernest Henry Starling, quedaron intrigados por una sorprendente pequeña función en el tracto digestivo.

La glándula situada detrás del estómago, conocida como el páncreas, descargaba su jugo digestivo en los intestinos superiores, justamente en el momento en que los alimentos abandonaban el estómago y penetraban en el intestino. ¿Cómo se recibía el mensaje? ¿Qué era lo que informaba al páncreas de que había llegado el momento justo? La suposición obvia era que la información debía ser transmitida a través del sistema nervioso, el cual era el único medio entonces conocido de comunicación en el cuerpo. Probablemente, la penetración en los intestinos de los alimentos procedentes del estómago estimulaba ciertas terminaciones nerviosas que retransmitían el mensaje al páncreas por medio del cerebro o de la médula.

Para probar esta teoría, Bayliss y Starling cortaron todos los nervios del páncreas. ¡Su maniobra fracasó! El páncreas seguía secretando todavía su jugo precisamente en el momento adecuado.

Los confundidos experimentadores, siguieron investigando en busca de otro sistema de comunicación. En 1902 consiguieron descubrir un «mensajero químico». Resultó ser una sustancia secretada por las paredes del intestino.

Cuando la inyectaban en la sangre de un animal, estimulaba la secreción del jugo pancreático, incluso aunque el animal no estuviera comiendo. Bayliss y Starling llegaron a la conclusión de que, en el curso normal de los acontecimientos, el alimento que penetra en los intestinos estimula su mucosa para secretar la sustancia, la cual luego viaja a través de la corriente sanguínea hasta el páncreas y desencadena la liberación del jugo pancreático por parte de la glándula. Ambos investigadores denominaron a la sustancia secretada por los intestinos «secretina», y la llamaron «hormona», partiendo de una palabra griega que significa «excitar a la actividad». Hoy día se sabe que la secretina es una pequeña molécula de proteína.

Algunos años antes, los fisiólogos habían descubierto que un extracto de las suprarrenales (dos pequeños órganos situados justamente por debajo de los riñones) Podían elevar la tensión sanguínea si eran inyectados en el organismo. El químico japonés Jokichi Takamine, que trabajaba en Estados Unidos, aisló la sustancia responsable en 1901 y la denominó «adrenalina». (Ésta, posteriormente, se convirtió en un nombre registrado; la denominación actual de los químicos para

esta sustancia es «epinefrina».) Su estructura mostraba una gran semejanza con la del aminoácido tirosina, a partir del cual se deriva en el cuerpo.

Evidentemente, la adrenalina era también una hormona. A medida que transcurrieron los años, los fisiólogos hallaron que un cierto número de otras «glándulas» en el cuerpo secretaban hormonas. (La palabra «glándula» procede del término griego para designar una bellota, y fue aplicada originalmente a cualquier pequeño abultamiento del tejido corporal. Pero se convirtió en una costumbre dar el nombre de glándula o ganglio a cualquier tejido que secretara un fluido, incluso a órganos grandes, tales como el hígado y las glándulas mamarias. Los órganos pequeños, que no secretaban fluidos gradualmente, fueron perdiendo esta denominación, de forma que los «ganglios linfáticos», por ejemplo, fueron rebautizados con el nombre de «nódulos linfáticos». Aún así, cuando los nódulos linfáticos en la garganta o en la axila aumentan de tamaño durante las infecciones, los médicos y las madres se siguen refiriendo a ellos, igualmente, como «ganglios aumentados de tamaño».) Muchas de las glándulas, como las situadas a lo largo del conducto digestivo, las glándulas sudoríparas y las salivales, descargan sus secreciones a través de conductos. Sin embargo, algunas no poseen conductos; éstas descargan directamente sus sustancias en la corriente sanguínea, la cual luego distribuye las secreciones por el cuerpo. La secreción de estas glándulas sin conductos o «endocrinas» es lo que contiene las hormonas. Por tal motivo, el estudio de las hormonas se denomina «endocrinología».

Como es natural, los biólogos están sumamente interesados en las hormonas que controlan las funciones del cuerpo de los mamíferos y, en particular, las del hombre. (Sin embargo, al menos, nos gustaría mencionar el hecho de que existen «hormonas vegetales», que controlan y aceleran el crecimiento de las plantas, de «hormonas de los insectos» que controlan la pigmentación y la muda de la piel, etc.) Cuando los bioquímicos hallaron que el yodo estaba concentrado en la glándula tiroides, hicieron la razonable suposición de que dicho elemento formaba parte de una hormona. En 1915, Edward Calvin Kendall, de la «Fundación Mayo», en Minnesota, aisló a partir del tiroides un aminoácido que contenía yodo y que se comportaba como una hormona, al que llamó «tiroxina». Cada molécula de tiroxina contenía cuatro átomos de yodo. Al igual que la adrenalina, la tiroxina tiene un gran

parecido familiar con la tirosina -y es manufacturada a partir de ésta en el cuerpo. (Muchos años después, en 1952, la bioquímica Rosalind Pitt-Rivers y sus colaboradores aislaron otra hormonotiroidea- «triyodotironina», llamada así porque su molécula contiene tres átomos de yodo en lugar de cuatro. Es menos estable que la tiroxina, pero tres a cinco veces más activa.) Las hormonas del tiroides controlan el metabolismo del cuerpo humano: excitan las células a la actividad. Las personas que tienen una hipoactividad tiroidea son indolentes, torpes, y después de cierto tiempo, pueden convertirse en retrasados mentales, debido a que las diversas células están funcionando a bajo rendimiento. Por el contrario, las personas con una hiperactividad del tiroides son nerviosas e inquietas, porque sus células están excitadas. Tanto el hipotiroidismo como el hipertiroidismo pueden producir bocio.

El tiroides controla el «metabolismo basal» del cuerpo, es decir, su índice de consumo de oxígeno en completo reposo, en condiciones ambientales confortables - el «consumo en el ocio», por así decirlo- Si el metabolismo basal de una persona está por encima o por debajo del normal, la sospecha recae sobre la glándula tiroides. La medición del metabolismo basal es un procedimiento difícil, ya que el paciente debe ayunar durante un cierto período anterior y descansar incluso durante media hora, mientras se mide el índice, por no hablar de un periodo de descanso aún mayor. En lugar de proceder mediante este engorroso sistema, ¿por qué no ir directamente al grano, es decir, medir la cantidad de hormona controladora que produce, el tiroides? Recientemente, los investigadores han desarrollado un método para medir la cantidad de «yodo ligado a las proteínas» (PBI) en la corriente sanguínea; éste indica el índice de producción de hormonas del tiroides, y así ha proporcionado una prueba sencilla y rápida de la sangre para remplazar la determinación del metabolismo basal. La hormona más conocida es la insulina, la primera proteína cuya estructura fue totalmente dilucidada (véase capítulo XI). Su descubrimiento representó la culminación de una larga cadena de acontecimientos. La diabetes es el nombre de un conjunto de enfermedades, caracterizadas en general por una sed infrecuente y, en consecuencia, por una eliminación desusada de orina. Es el más común de los errores congénitos del metabolismo. Existen un millón y medio de diabéticos en los Estados Unidos, el 80 % de los cuales tienen más de 45 años. Es una de las pocas enfermedades a las que la mujer es más

propensa que el varón; las mujeres diabéticas superan en número al hombre en una proporción de 4 a 3.

El término procede de una palabra griega que significa «sifón» (aparentemente, su descubridor imaginó el agua haciendo continuamente de sifón a través del organismo). La forma más grave de la enfermedad es la «diabetes mellitus». «Mellitus» se deriva de una palabra griega que significa «miel», y se refiere al hecho de que, en los estadios avanzados de ciertos casos de la enfermedad, la orina tiene un sabor dulce. (Esto puede haber sido determinado directamente por algún médico heroico, pero la primera indicación de ello fue más bien indirecta. La orina de los diabéticos tenía un sabor dulce que atraía moscas.) En 1815, el químico francés Michel-Eugene Chevreul consiguió demostrar que el sabor dulce obedecía simplemente a la presencia de azúcar (glucosa). Este resto de glucosa indicaba claramente que el cuerpo no estaba utilizando su alimento de forma eficiente. De hecho, el paciente diabético, pese a incrementarse su apetito, puede perder peso regularmente a medida que la enfermedad avanza. Hasta hace una generación, no existía ningún tratamiento eficaz para combatir la enfermedad.

En el siglo XIX, los fisiólogos alemanes Joseph von Mering y Oscar Minkowski hallaron que la extirpación de la glándula pancreática de un perro daba lugar a una enfermedad de características idénticas a la diabetes humana. Después que Bayliss y Starling descubrieran la hormona secretina, empezó a sospecharse que una hormona del páncreas podía estar involucrada en la diabetes.

Pero la única secreción conocida del páncreas era el jugo digestivo. ¿De dónde procedía la hormona? Apareció un indicio significativo. Cuando el conducto del páncreas era bloqueado, de forma que no pudiera producir sus secreciones digestivas, la mayor parte de la glándula se resecaba, pero los grupos de células conocidas como «islotes de Langerhans» (llamado así por un médico alemán, Paul Langerhans, que las había descubierto en 1869) permanecían intactas.

En 1916, un médico escocés, Albert Sharpey-Schafer, sugirió, por tanto que los islotes podían estar produciendo la hormona antidiabética. Denominó a la supuesta hormona «insulina», derivada de una palabra latina que significa «isla».

Los intentos para extraer la hormona a partir del páncreas fracasaron estrepitosamente, al principio. Como se sabe hoy día, la insulina es una proteína, y

las enzimas que escinden las proteínas (proteolíticas) del páncreas la destruían incluso mientras los químicos estaban intentando aislarla. En 1921, el médico canadiense Frederick Grant Banting y el fisiólogo Charles Herbert Best (que trabajaban en los Laboratorios de John James Rickard MacLeod, en la Universidad de Toronto) intentaron dar un nuevo enfoque al asunto. Primeramente bloquearon el conducto pancreático. La porción de la glándula que producía la enzima se resecó, la producción de enzimas proteolíticas se detuvo, y los científicos pudieron extraer la hormona intacta a partir de los islotes. Ésta demostraba realmente ser eficaz para contrarrestar la diabetes. Banting llamó a la hormona «isletina», pero se impuso el nombre más antiguo y latinizado propuesto por Sharpey-Schafer. Todavía se utiliza este nombre.

En 1923, Banting y, por algún motivo, MacLeod (cuyo único servicio al descubrimiento de la insulina fue permitir la utilización de su laboratorio durante el verano, mientras estaba de vacaciones) recibieron el premio Nobel de Fisiología y Medicina.

El efecto de la insulina dentro del organismo se manifiesta con la máxima claridad en relación con el nivel de la concentración de glucosa en la sangre. Corrientemente, el cuerpo almacena la mayor parte de su glucosa en el hígado en forma de una clase de almidón llamada «glucógeno» (descubierto en 1856 por el fisiólogo francés Claude Bernard), manteniendo únicamente una pequeña cantidad de glucosa en la corriente sanguínea, con objeto de satisfacer las necesidades inmediatas de energía de las células. Si la concentración de glucosa en la sangre aumenta excesivamente, esto estimula al páncreas a incrementar su producción de insulina, la cual se vierte en la corriente sanguínea y produce un descenso del nivel de glucosa.

Por otra parte, cuando el nivel de glucosa desciende demasiado, al disminuir la concentración se inhibe la producción de insulina por parte del páncreas, de forma que aumenta el nivel de azúcar. Así se consigue restablecer el equilibrio. La producción de insulina desciende el nivel de glucosa, lo cual disminuye la producción de insulina, que a su vez eleva el nivel de glucosa, esto incrementa la producción de insulina, que nuevamente hace descender el nivel de glucosa, y así sucesivamente. Esto representa un ejemplo de lo que se llama «control de realimentación»

(*feedback*). El termostato que controla la calefacción de una casa trabaja del mismo modo.

El mecanismo de retroalimentación es probablemente el procedimiento usual por medio del cual el organismo mantiene una temperatura interna constante. Otro ejemplo es el de la hormona producida por las glándulas paratiroides, cuatro pequeños cuerpos incrustados en la glándula tiroides. La «parathormona» fue finalmente purificada, en 1960, por los bioquímicos americanos Lyman C. Craig y Howard Rasmussen, después de cinco años de trabajo.

La molécula de parathormona es, en cierto modo, mayor que la de la insulina, y está constituida por 83 aminoácidos, con un peso molecular de 9.500. La acción de esta hormona es incrementar la absorción de calcio en el intestino y disminuir la pérdida de calcio a través de los riñones. Cuando la concentración de calcio en la sangre desciende ligeramente por debajo de la normal, se estimula la secreción de hormona. Con una mayor penetración y una menor fuga de calcio, pronto se eleva el nivel de éste en la sangre; dicho incremento inhibe la secreción de la hormona. Esta interacción entre la concentración de calcio en la sangre y la abundancia de hormona paratiroides mantiene el nivel de calcio muy cerca del nivel necesario en todo momento. Una cosa excelente, ya que incluso una pequeña desviación del nivel adecuado en la concentración de calcio puede conducir a la muerte. Por esto, la eliminación de la glándula paratiroides es fatal. (En otro tiempo, los médicos, en su ansiedad por disecar secciones del tiroides con objeto de curar el bocio, no prestaban atención al hecho de remover la glándula paratiroides, mucho más pequeña y menos prominente. La muerte del paciente representaba para ellos una lección.) Algunas veces se utiliza la acción del mecanismo de retroalimentación debido a la existencia de dos hormonas que trabajan en direcciones opuestas. Por ejemplo, el doctor Harold Copp de la Universidad de Columbia británica, demostró, en 1961, la presencia de una hormona tiroidea -a la cual denominó «calcitonina»-, que hacía descender el nivel del calcio en la sangre estimulando la deposición de sus iones en los huesos. Con la parathormona actuando en una dirección y la calcitonina en otra, se podía controlar de forma mucho más sutil la realimentación producida por los niveles de calcio en la sangre. (La molécula de calcitonina está formada por una cadena simple de polipéptidos, compuesta de 32 aminoácidos.) En el caso de la

concentración de azúcar en la sangre, cuando la insulina está implicada, coopera una segunda hormona, secretada también por los islotes de Langerhans. Los islotes están constituidos por dos clases distintas de células, «alfa» y «beta». Las células beta producen insulina, en tanto que las células alfa producen «glucagón». La existencia de glucagón se sospechó, por vez primera en 1923, y finalmente fue cristalizado en 1955. Su molécula está constituida por una sola cadena de 29 ácidos, y, en 1958, su estructura había sido completamente dilucidada.

El glucagón se opone al efecto de la insulina, de forma que dos fuerzas hormonales actúan en direcciones opuestas, y el equilibrio se modifica muy ligeramente, en un sentido u otro, por el estímulo de la concentración de glucosa en sangre. Las secreciones de la glándula pituitaria (que examinaremos brevemente) ejercen también un efecto opuesto sobre la actividad de la insulina. Por el descubrimiento de este mecanismo, el fisiólogo argentino Bernardo Alberto Houssay compartió (con Cori), en 1947, el premio Nobel de Medicina y Fisiología.

Ahora bien, en la diabetes, el problema estriba en que los islotes han perdido su capacidad de producir suficiente insulina. Por tanto, la concentración de glucosa en la sangre deriva en un sentido ascendente. Cuando el nivel aumente aproximadamente hasta un 50 % superior al normal, traspasa el «umbral renal» -es decir la glucosa se vierte en la orina. En cierto sentido, esta pérdida de glucosa por la orina representa el menor de dos posibles males, ya que si se permitiera que la concentración de glucosa siguiera aumentando, el incremento resultante de viscosidad de la sangre podría dar lugar a un esfuerzo indebido por parte del corazón. (El corazón está proyectado para bombear sangre, no melazas.)

La forma clásica de comprobar la existencia de diabetes es verificar la presencia de azúcar en la orina. Por ejemplo, unas pocas gotas de orina pueden ser calentadas, juntamente con la «solución de Benedict» (llamada así por el químico americano Francis Gano Benedict). Esta solución contiene sulfato de cobre, el cual le da un profundo color azul. Si la glucosa no está presente en la orina, la solución sigue siendo azul. Si la glucosa está presente, el sulfato de cobre se convierte en óxido de cobre. Éste es una sustancia insoluble de un color rojo ladrillo. Por tanto, un precipitado rojizo en el fondo del tubo de ensayo, es un signo indudable de presencia de azúcar en la orina, lo cual generalmente significa diabetes.

Actualmente, se dispone de un método incluso más sencillo. Pequeños trozos de papel, de aproximadamente unos 5 cm de largo, se impregnan con dos enzimas, glucosa-deshidrogenasa y peroxidasa, además de una sustancia orgánica llamada «ortotolidina». El papel amarillento es introducido en una muestra de la orina del paciente y luego expuesto al aire. Si hay presencia de glucosa, ésta se combina con el oxígeno del aire mediante la ayuda catalítica de la glucosa-deshidrogenasa. Durante el proceso, se forma peróxido de hidrógeno. Luego, la peroxidasa en el papel hace que el peróxido de hidrógeno se combine con la ortotolidina para formar un compuesto fuertemente azul. En resumen, si el papel amarillento es introducido en la orina y se vuelve azul, puede sospecharse firmemente la existencia de diabetes.

Cuando la glucosa ha comenzado a aparecer en la orina, esto significa que la diabetes mellitus lleva ya claramente recorrido un largo curso. Es mejor descubrir la enfermedad más precozmente, mediante el examen del nivel de glucosa en la sangre antes de que cruce el umbral renal.

El «test de tolerancia a la glucosa», hoy día de uso extendido, mide el índice de descenso del nivel de la glucosa en la sangre después que ha sido aumentado por la administración previa de glucosa a la persona. Normalmente, el páncreas responde con un torrente de insulina. En una persona sana, el nivel de azúcar regresa a la normalidad dentro de las dos horas siguientes. Si el nivel permanece elevado durante tres horas o más, esto significa una respuesta insulínica-deficiente, y es probable que la persona esté ya en los primeros estadios de la diabetes.

Es posible que la insulina tenga algo que ver con el control del apetito.

Todos hemos nacido con lo que algunos fisiólogos llaman un «centro del hambre» («appestat»), el cual regula el apetito de la misma forma que un termostato regula el funcionamiento de un horno. Si el centro del hambre funciona a un nivel excesivamente alto, el individuo se ve en la situación de estar aportando a su cuerpo continuamente más calorías de las que consume, a menos que ejerza un estricto autocontrol, el cual más pronto o más tarde fracasa.

A principios de los años 40, un fisiólogo, S. W. Ranson, demostró que los animales crecían más gordos tras la destrucción de una porción del hipotálamo (localizado en la parte inferior del cerebro). Esto parece fijar la situación del centro del hambre.

¿Qué es lo que controla su operación? Las «puncadas del hambre» afluyen a la mente. Un estómago vacío se contrae en espasmos, y la penetración de los alimentos da fin a estas contracciones. Quizá estas contracciones sean la señal para el centro del hambre. No es así; la extirpación quirúrgica del estómago nunca ha interferido con el control del apetito.

El fisiólogo de Harvard, Lean Mayer, ha ofrecido una sugerencia más razonable. Él cree que lo que hace el centro del hambre es responder al nivel de glucosa en la sangre. Una vez que el alimento ha sido digerido, el nivel de glucosa en la sangre desciende lentamente. Cuando lo hace por debajo de un cierto nivel, el centro del hambre se pone en marcha. Si en respuesta a las consecuentes urgencias del apetito, la persona come, el nivel de glucosa en su sangre se eleva momentáneamente, y el centro del hambre deja de funcionar.

Las hormonas que hemos estudiado hasta ahora son todas ellas, bien proteínas (como la insulina, el glucagón, la secretina y la parathormona) o aminoácidos modificados (como la tiroxina, la triyodotironina y la adrenalina). Llegamos ahora a un grupo completamente diferente: las hormonas esteroides.

La historia de éstas empiezan en 1927, cuando dos fisiólogos alemanes, Bernhard Zondek y Selmar Aschheim, descubrieron que extractos de la orina de una mujer embarazada, cuando eran inyectados en las hembras de ratas o ratones, incrementaban su celo sexual. (Este descubrimiento les condujo a la primera prueba precoz del embarazo.) Resultó evidente en seguida que había sido hallada una hormona, específicamente, una «hormona sexual».

Antes de haber transcurrido dos años, Adolf Butenandt en Alemania, y Edward Doisy, en la Universidad de St. Louis aislaron muestras puras de la hormona. Fue denominada «estrona», a partir de estro, término utilizado para designar el celo sexual en las hembras. Rápidamente se halló que su naturaleza corresponda a un esteroide, con la estructura tetraanular del colesterol. Por su participación en el descubrimiento de las hormonas sexuales. Butenandt compartió (con Ruzicka) el premio Nobel de Química en 1939. Al igual que Domagk y Kuhn, fue obligado a rechazarlo, y únicamente pudo aceptar dicho honor en 1949, después de terminado el poderío nazi.

En la actualidad, la estrona forma parte de un grupo de hormonas sexuales femeninas conocidas, llamadas «estrógenos» («que dan lugar al estro»). En 1931, Butenandt aisló la primera hormona sexual masculina, o «andrógem») («que origina el impulso sexual masculino»). La llamó «androsterona».

La producción de hormonas sexuales es lo que determina los cambios que tienen lugar durante la adolescencia: el desarrollo del vello facial en el varón y de los senos pronunciados de la mujer, por ejemplo. El complejo ciclo menstrual en la mujer se basa en la interacción de diversos estrógenos. Las hormonas sexuales femeninas se producen en su mayor parte en los ovarios, y las hormonas sexuales masculinas en los testículos.

Las hormonas sexuales no son las únicas hormonas esteroides. El primer mensajero químico no sexual de tipo esteroideo fue descubierto en las suprarrenales. Éstas, realmente, son glándulas dobles, consistiendo en una glándula interna llamada «médula» suprarrenal (procedente de la palabra latina que significa «tuétano») y otra glándula llamada «corteza suprarrenal» (también procedente del latín). Es la médula la que produce la adrenalina. En 1929, los investigadores hallaron que extractos obtenidos a partir de la corteza suprarrenal podían mantener a animales vivos, después que sus glándulas suprarrenales hubieran sido extirpadas -una operación fatal en grado sumo. Naturalmente, de inmediato empezó una investigación en busca de las «hormonas corticales».

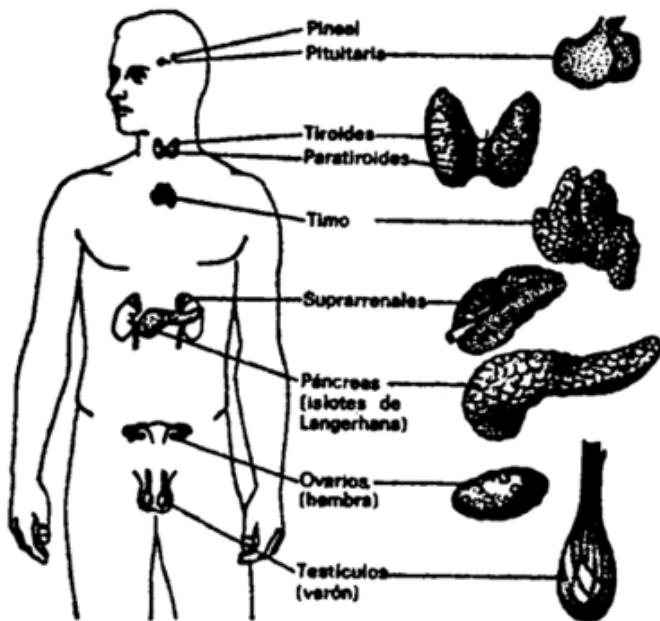
La investigación tenía una razón médica práctica, además. La bien conocida dolencia llamada «enfermedad de Addison» (descrita, por vez primera, por el médico inglés Thomas Addison, en 1855) tenía unos síntomas parecidos a los que resultaban de la extirpación de las suprarrenales. Claramente, la enfermedad podía ser causada por una insuficiencia en la producción hormonal de la corteza suprarrenal. Quizá las inyecciones de hormonas corticales podrían combatir la enfermedad de Addison del mismo modo que la insulina lo hacía con la diabetes.

Dos hombres sobresalieron en esta búsqueda. Uno de ellos fue Tadeus Reichstein (quien más tarde había de sintetizar la vitamina C); el otro fue Edward Kendall (quien había descubierto primeramente la hormona tiroidea, cerca de veinte años antes). A finales de la década de 1930, los investigadores habían aislado más de dos docenas de diferentes compuestos procedentes de la corteza suprarrenal. Al

menos cuatro de ellos mostraban actividad hormonal. Kendall denominó las sustancias compuestas A, B, E, F, y así sucesivamente. Todas las hormonas corticales demostraban ser esteroídes. Ahora bien, las suprarrenales son glándulas muy débiles, y serían necesarias las glándulas de incontables series de animales para proporcionar suficiente extracto cortical para su uso general.

En apariencia, la única solución razonable era intentar sintetizar las hormonas. Un falso rumor impulsó la investigación sobre hormonas corticales, hasta límites insospechados, durante la Segunda Guerra Mundial. Se habían tenido noticias de que los alemanes estaban comprando glándulas suprarrenales de reses en los mataderos de Argentina, al objeto de fabricar hormonas corticales con las que mejorar la eficiencia de sus pilotos aviadores en los vuelos a gran altura. No existía ninguna base real para ello, pero el rumor tuvo el efecto de estimular al Gobierno de los Estados Unidos para que concediera una alta prioridad a la investigación sobre los métodos de sintetizar las hormonas corticales. La prioridad fue incluso superior a la que se había concedido a la síntesis de la penicilina o de los fármacos contra la malaria.

El compuesto A fue sintetizado por Kendall en 1944, y, al siguiente año, la casa «Merck & Co.» había empezado a producirlo en cantidades sustanciales. Se demostró su escaso valor en la enfermedad de Addison, con el general desencanto. Después de una labor prodigiosa, el bioquímico de «Merck», Lewis H. Sarrett, sintetizó luego, mediante un proceso que implicaba treinta y siete fases, el compuesto E, al cual se conoció con el nombre de «cortisona».



### *Las glándulas endocrinas.*

La síntesis del compuesto E desencadenó de inmediato un pequeño revuelo en los círculos médicos. La guerra estaba terminando; el rumor sobre el tratamiento cortical mágico en los pilotos alemanes se había demostrado falso, y el compuesto A había fracasado. Luego, en un aspecto completamente inesperado, el compuesto E súbitamente se situó en primer lugar.

Durante veinte años, el médico de la «Clínica Mayo», Philip Showalter Hench, había estado estudiando la artritis reumatoide, una enfermedad dolorosa, que en ocasiones desembocaba en la parálisis. Hench sospechaba que el cuerpo humano poseía mecanismos naturales para contrarrestar esta enfermedad, ya que la artritis era a menudo aliviada durante el embarazo o en los ataques de ictericia. No se le ocurrió pensar qué factor bioquímico podía ser común a la ictericia y el embarazo. Intentó inyecciones de pigmentos biliares (implicados en la ictericia) y de hormonas sexuales (involucradas en el embarazo), pero ninguna ayudó a sus pacientes artríticos.

No obstante, varios indicios apuntaban hacia las hormonas corticales como una posible respuesta, y en 1949, con la cortisona disponible ya en una razonable cantidad. Hench lo intentó también, ¡Al fin triunfó! La cortisona no curaba la enfermedad, al igual que la insulina no cura la diabetes, pero parecía aliviar los síntomas, y, para un artrítico, este pequeño resultado representaba un maná caído

del cielo. Lo que es más, se demostró posteriormente que la cortisona resultaba de ayuda en el tratamiento de la enfermedad de Addison, donde el compuesto A había fracasado.

Por su trabajo sobre las hormonas corticales. Kendall, Hench y Reichstein compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1950.

Desgraciadamente, las influencias de las hormonas corticales en las actividades del organismo son tan múltiples que existen siempre efectos colaterales, en ocasiones graves. Los médicos son reticentes en el uso de la terapéutica de hormonas corticales, a menos que exista una necesidad clara y urgente. Sustancias sintéticas relacionadas con hormonas corticales (algunas con un átomo de flúor insertado en su molécula) están siendo utilizadas, actualmente, en un intento para aliviar el aspecto más perjudicial de los efectos secundarios, pero hasta el momento no se ha encontrado nada que indique un éxito razonable. Una de las más activas, de entre las hormonas corticales descubiertas hasta ahora, es la «aldosterona», aislada en 1953 por Reichstein y sus colaboradores.

¿Qué es lo que controla las diversas y poderosas hormonas? La totalidad de ellas (incluyendo una serie que no se ha mencionado) puede ejercer efectos más o menos drásticos en el organismo. No obstante, están sintonizadas de un modo tan armónico que mantienen al cuerpo funcionando suavemente, sin una interrupción del ritmo. Al parecer, en algún lugar debe existir un conductor que dirija esta cooperación.

Lo más próximo a una respuesta lo constituye la pituitaria, una pequeña glándula suspendida en la base del cerebro (pero que no forma parte de él). El nombre de esta glándula surgió de una antigua noción de que su función era segregar flema, cuya denominación en latín es *pituita* (el origen también de la palabra «saliva»). Debido a que esta noción es falsa, los científicos han rebautizado la glándula con el nombre de «hipófisis» (derivada de las palabras griegas que significan «que crece debajo» -por ejemplo, debajo del cerebro-); pero pituitaria es hasta ahora el término más utilizado comúnmente.

La glándula tiene tres partes: el lóbulo anterior, el lóbulo posterior y, en algunos organismos, un pequeño puente que conecta ambos. El lóbulo anterior es el más importante, ya que produce al menos seis hormonas (todas pequeñas moléculas de

proteínas), las cuales parecen actuar específicamente sobre otras glándulas carentes de conductos. En otras palabras, la pituitaria anterior puede ser considerada como el director de orquesta que mantiene las otras glándulas tocando al mismo ritmo y en el mismo tono. (Es interesante que la pituitaria esté localizada justamente alrededor del centro del cerebro, como si estuviera colocada deliberadamente en un lugar de la máxima seguridad.) Uno de los mensajeros de la pituitaria es la «hormona estimulante del tiroides» o «tirotrópica» (TSH). Estimula el tiroides sobre la base del mecanismo de retroalimentación. Es decir, obliga al tiroides a producir la hormona tiroidea; el aumento de la concentración de esta hormona en la sangre inhibe a su vez la formación de TSH por la pituitaria. El descenso de TSH en la sangre, por su parte, reduce la producción del tiroides; esto estimula la producción de TSH por la pituitaria, y de este modo el ciclo mantiene un equilibrio.

Del mismo modo, la «hormona estimulante adrenocortical» u «hormona adrenocorticotrópica» (ACTH) mantiene el nivel de las hormonas corticales. Si se inyecta una cantidad de ACTH en el cuerpo, incrementará el nivel de estas hormonas y así puede servir para idéntico objetivo que la inyección de la misma cortisona. Por tanto, la ACTH ha sido utilizada para tratar la artritis reumatoide.

La investigación sobre la estructura de la ACTH ha progresado intensamente, debido a que permite aliviar la artritis. A principios de los años cincuenta, su peso molecular había sido determinado en 20.000, pero era fácilmente escindida en fragmentos más pequeños («corticotropinas»), las cuales poseían la actividad completa. Una de ellas, constituida de una cadena de 39 aminoácidos, ha tenido su estructura completamente dilucidada, e incluso cadenas más pequeñas han sido halladas efectivas.

La ACTH posee la capacidad de influir en la pigmentación de la piel de los animales, e incluso el hombre resulta afectado. En aquellas enfermedades en que está implicada una superproducción de ACTH, la piel humana se oscurece. Se sabe que, en los animales inferiores, particularmente en los anfibios, existen hormonas especiales oscurecedoras de la piel. Una hormona de este tipo fue descubierta finalmente entre los productos de la pituitaria en el ser humano, en 1955. Es conocida como la «hormona estimulante de los melanocitos» (los melanocitos son

las células que producen la pigmentación de la piel) y generalmente se representa abreviada como «MSH».

La molécula de MSH ha sido ampliamente dilucidada; es interesante indicar que la MSH y la ACTH tienen en común una secuencia de siete aminoácidos. La indicación de que la estructura esté ligada a la función (como, verdaderamente, debe ser) es inequívoca.

Por lo que respecta a la pigmentación, debería mencionarse la glándula pineal, un cuerpo cónico adherido, al igual que la pituitaria, a la base del cerebro, y llamada así a causa de su forma parecida a una piña. La glándula pineal parecía tener realmente una naturaleza glandular, pero hasta finales de la década de 1950 no pudo ser localizada ninguna hormona. Luego, los descubridores de la MSH, trabajando con 200.000 glándulas pineales de buey, aislaron finalmente una pequeña cantidad de sustancia, que, administrada mediante inyección, oscurecía la piel del renacuajo. Sin embargo, la hormona llamada «melatonina» no parecía ejercer efecto alguno sobre los melanocitos humanos.

La lista de las hormonas pituitarias no está todavía completa. Un par de hormonas pituitarias, la ICSH («hormona estimulante de las células intersticiales») (luteinizante) y la FSH («hormona foliculoestimulante») controlan el crecimiento de los tejidos involucrados en la reproducción. Existe también la «hormona lactógena», la cual estimula la producción de leche.

La hormona lactógena estimula otras actividades posteriores al embarazo. Ratas jóvenes hembras inyectadas con la hormona se dedicaron a la construcción del nido, incluso aunque no hubieran tenido ninguna cría. Por otra parte, ratones hembra cuyas pituitarias habían sido extirpadas poco antes de dar a luz a su cría, mostraban un escaso interés hacia éstas. Las revistas, de inmediato, denominaron a la hormona lactógena la «hormona del amor maternal».

Estas hormonas pituitarias, asociadas con los tejidos sexuales, se agrupan conjuntamente con el nombre de «gonadotropinas». Otra sustancia de este tipo es producida por la placenta (el órgano que permite transferir el alimento desde la sangre de la madre a la del feto. Y, en la dirección opuesta, las materias de desecho). La hormona placentaria es denominada «gonadotropina coriónica humana», que se abrevia con la sigla «HCG». De dos a cuatro semanas después del

comienzo del embarazo, la HCG es producida en cantidades apreciables y hace su aparición en la orina. Al inyectarse extractos de la orina de una mujer embarazada en ratones, ranas o conejos, pueden descubrirse efectos reconocibles. El embarazo puede así determinarse en un estadio muy temprano.

La más espectacular de las hormonas de la pituitaria anterior es la «hormona somatotropa» (somatropina) (STH), más popularmente conocida como «hormona del crecimiento». Su efecto es el de estimular de un modo general el crecimiento del cuerpo. Un niño que no pueda producir una provisión de hormona suficiente padecerá enanismo. Uno que la produjera en demasía se transformaría en un gigante de circo. Si el trastorno que resulta de una superproducción de hormona del crecimiento no tiene lugar hasta después que la persona ha madurado, (cuando los huesos están completamente formados y endurecidos), solamente las extremidades, como las manos, los pies y el mentón, crecen de un modo exageradamente largo -una circunstancia conocida como «acromegalia» (expresión procedente del griego para indicar «extremidades grandes»). Li (que había determinado primero su estructura en 1966) sintetizó en 1970 esta hormona del crecimiento.

Respecto al modo como trabajan las hormonas, en términos químicos, los investigadores han tropezado hasta ahora con un muro insalvable. No han sido capaces todavía de determinar precisamente cómo una hormona realiza su función. Parece cierto que las hormonas no actúan como las enzimas. Al menos, no se ha hallado ninguna hormona que catalice una reacción específica directamente. La siguiente alternativa es suponer que una hormona, si no es en sí misma una enzima, actúa sobre una enzima -es decir, que promueve o inhibe una actividad de la enzima-.

La insulina, la hormona que ha sido investigada más exhaustivamente de todas ellas, parece estar claramente relacionada con una enzima llamada «glucoquinasa», la cual es esencial para la conversión de la glucosa en glucógeno. Esta enzima es inhibida por los extractos procedentes de la pituitaria anterior y la corteza suprarrenal, y la insulina puede anular esta inhibición. Así, la insulina en la sangre puede servir para activar la enzima y de este modo favorecer la conversión de glucosa en glucógeno. Esto podría ayudar a explicar cómo la insulina hace

descender la concentración de glucosa en sangre.

Sin embargo, la presencia o ausencia de insulina afecta al metabolismo hasta tal punto que resulta difícil comprobar cómo esta simple acción puede producir todas las anormalidades que existen en la química corporal de un diabético. (Lo mismo es válido para otras hormonas.) Por tanto, algunos bioquímicos, se han inclinado a buscar efectos mayores y más globales.

Existe una creciente tendencia a considerar que la insulina actúa de algún modo como un agente para introducir la glucosa en la célula. Según esta teoría, un diabético posee un elevado nivel de glucosa en su sangre sólo por la sencilla razón de que el azúcar no puede penetrar en sus células y, por tanto, él no puede utilizarlo. (Al explicar el insaciable apetito del diabético, Mayer, como ya hemos mencionado, sugirió que la glucosa sanguínea tiene dificultad en penetrar las células del centro del hambre.) Si la insulina ayuda a la glucosa en la penetración de la célula, entonces es que debe actuar de algún modo sobre la membrana de la célula. ¿Cómo? Nadie lo sabe. En realidad, no se conoce demasiado acerca de las membranas celulares en general, excepto que están compuestas de proteínas y sustancias grasas. Podemos especular que la insulina, como una molécula de proteína, puede, de algún modo, modificar la disposición de las cadenas laterales de aminoácidos en la proteína de la membrana, y así, abrir las puertas a la glucosa (y posiblemente a muchas otras sustancias).

Si estamos inclinados a quedar satisfechos con generalidades de este tipo (y, por el momento, no existe otra alternativa), podemos proseguir basándonos en la suposición de que las otras hormonas también actúan sobre las membranas celulares, cada una de ellas a su modo particular, porque cada una tiene su propia disposición específica de aminoácidos. De forma similar, las hormonas esteroides, como sustancias grasas, pueden actuar sobre las moléculas grasas de la membrana, abriendo o cerrando la puerta a ciertas sustancias. Evidentemente, al ayudar a un material determinado a penetrar la célula o al impedir que lo haga, una hormona puede ejercer un efecto drástico sobre aquello que penetra en la célula. Podría aprovisionar a una enzima con abundancia de substrato para su tarea o privar a otra de material, controlando así lo que la célula produce. Suponiendo que una simple hormona pueda decidir la penetración o no penetración de varias sustancias

diferentes, podemos ver cómo la presencia o la ausencia de una hormona podría influir profundamente en el metabolismo, cosa que de hecho ocurre en el caso de la insulina.

El cuadro expuesto anteriormente es sugerente, pero también ambiguo. Los bioquímicos preferirían mucho saber exactamente cómo tienen lugar las reacciones en la membrana celular por influencia de una hormona. La iniciación de tal conocimiento surgió, en 1960, con el descubrimiento de un nucleótido similar al ácido adenílico, salvo una diferencia: el grupo fosfato se adhería a dos lugares distintos en la molécula de azúcar. Sus descubridores, Earl W. Sutherland y T. W. Rall lo llamaron «AMP cíclico». Cíclico, porque el grupo fosfato de doble adherencia formaba un círculo de átomos; y el AMP significaba «adenina monofosfato», un sustituto para el ácido adenílico.

Una vez descubierto el AMP cíclico, se comprobó que estaba muy extendido en los tejidos y surtía acentuados efectos en la actividad de muchas enzimas y procesos celulares diferentes. El AMP cíclico se deriva del ATP -cuya ocurrencia tiene carácter universal- por conducto de una enzima llamada «adenilciclasa» situada en la superficie de las células. Probablemente hay varias de estas enzimas, cada una dispuesta a entrar en actividad ante la presencia de una hormona determinada. Dicho de otra forma, la actividad superficial hormonal sirve para activar una adenilciclasa, lo cual desencadena la producción de AMP cíclico, que a su vez altera la actividad enzimática dentro de la célula ocasionando muchos cambios.

Indudablemente, los pormenores son de una complejidad desmesurada, pues ahí pueden intervenir otros compuestos aparte del AMP cíclico, pero, al menos, ya es un comienzo.

## **La Muerte**

Los adelantos realizados por la medicina moderna en la lucha contra la infección, el cáncer, los trastornos digestivos, etc., han aumentado la probabilidad de que un individuo determinado pueda vivir lo suficiente como para alcanzar la vejez. La mitad de las personas nacidas durante esta generación pueden confiar en alcanzar los 70 años de edad (excepto que estalle una guerra nuclear o alguna otra catástrofe de tipo mayor).

La rareza que, en la Antigüedad, representaba sobrevivir hasta la vejez, sin duda explica, en parte, el extravagante respeto mostrado hacia las personas longevas en aquellos tiempos. La *Ilíada*, por ejemplo, concede mucho relieve al «viejo» Príamo y «viejo» Néstor. Se describe a Néstor como a una persona que había sobrevivido a tres generaciones de hombres, pero, en un tiempo en el que el promedio de vida no debía ser superior a los 20 ó 25 años.

Néstor no necesitaba tener más de 70 para conseguir esta hazaña. Realmente, a esta edad se es anciano, pero eso no es nada extraordinario en las actuales circunstancias. Debido a que en tiempos de Homero la ancianidad de Néstor causaba semejante impresión en las personas, los mitólogos posteriores supusieron que dicho personaje debía de haber alcanzado algo así como unos 200 años.

Para tomar otro ejemplo al azar; *Ricardo II*, de Shakespeare, empieza con las siguientes palabras: «El viejo John de Gante, Lancaster honrado por su edad.» Los propios contemporáneos de John, según los cronistas de la época, también le consideraban como un anciano. Produce gran sorpresa comprobar que John de Gante vivió solamente hasta los 59 años de edad. Un ejemplo interesante procedente de la historia americana es el de Abraham Lincoln. Sea debido a su barba, o a su cara triste y demacrada, o a las canciones de la época que se referían a él como al «padre Abraham», la mayoría de las personas le consideran como un anciano en el momento de su muerte. Solamente podíamos desear que hubiera vivido lo suficiente para serlo. En realidad, fue asesinado a los 59 años de edad. Todo esto no significa que la auténtica ancianidad fuera desconocida en tiempos anteriores a la medicina moderna. En la antigua Grecia, Sófocles, el dramaturgo, vivió hasta los 90 años, e Isócrates, el orador, hasta los 98. Flavio Casiodoro, en la Roma del siglo V, vivió hasta los 95 años. Enrico Dandolo, el dogo de Venecia del siglo XII, alcanzó los 97 años. Tiziano, el pintor renacentista, sobrevivió hasta los 99. En tiempos de Luis XV, el duque de Richelieu, sobrino-nieto del famoso Cardenal, vivió 92 años, y el escritor francés Bernard Le Bovier de Fontenelle consiguió llegar justamente hasta los 100 años.

Esto pone de manifiesto el hecho de que, aunque el promedio de esperanza de vida, en las sociedades médicaamente avanzadas, se ha elevado enormemente, sin embargo, el límite máximo de vida no lo ha hecho. Incluso en la actualidad,

esperamos de muy pocos hombres que alcancen, o excedan, el tiempo de vida de un Isócrates o un Fontenelle. Como tampoco esperamos que los modernos nonagenarios sean capaces de participar en las actividades normales con un vigor comparable. Sófocles estaba escribiendo grandes obras a sus 90 años, e Isócrates seguía componiendo grandes discursos. Tiziano pintó hasta el último año de su vida; Dandolo fue el líder indomable de una guerra veneciana contra el Imperio bizantino, a la edad de 96 años. (Entre los ancianos relativamente vigorosos de nuestros días, imagino que el mejor ejemplo es el de George Bernard Shaw, quien vivió hasta los 94 años, y el del matemático y filósofo inglés Bertrand Russell, activo hasta sus últimos días.) Aunque con respecto al pasado una proporción considerablemente mayor de nuestra población alcanza los 60 años, más allá de esta edad la esperanza de vida ha mejorado muy poco. La «Metropolitan Life Insurance Company» calcula que la esperanza de vida de un varón sexagenario americano, en 1931, era aproximadamente la misma que la de un siglo y medio antes -es decir 14,3 años contra la cifra primitivamente calculada de 14,8. Para el promedio de la mujer americana, las cifras correspondientes son de 15,8 y 16,1-. A partir de 1931, la llegada de los antibióticos ha incrementado la esperanza de supervivencia en los sexagenarios de ambos性别, en unos dos años y medio. Pero, en conjunto, a pesar de todo lo que la Medicina y la Ciencia han aportado, la vejez alcanza a la persona aproximadamente a la misma velocidad y del mismo modo como siempre lo ha hecho. El hombre no ha hallado todavía un modo de evitar el debilitamiento progresivo y la eventual avería de la máquina humana.

Al igual que ocurre con los otros tipos de maquinaria, son las partes móviles las que sufren los efectos en primer lugar. El sistema circulatorio -el corazón y las arterias- es el talón de Aquiles humano, a la corta o a la larga. Su progreso en la conquista de la muerte prematura ha elevado a los trastornos de este sistema al rango de asesino número uno. Las enfermedades circulatorias son responsables de algo más de la mitad de las muertes ocurridas en los Estados Unidos, y, de estas enfermedades, una en particular, la arteriosclerosis, es responsable de una muerte de cada cuatro.

La arteriosclerosis (derivada de las palabras griegas que significan «dureza de la harina») se caracteriza por depósitos grasos de forma granulosa en la superficie

interna de las arterias, que obligan al corazón a realizar un mayor esfuerzo para llevar la sangre a través de los vasos a un ritmo normal. La tensión sanguínea aumenta, y el consiguiente incremento en el esfuerzo de los pequeños vasos sanguíneos puede hacerlos estallar. Si esto ocurre en el cerebro (una zona particularmente vulnerable), se produce una hemorragia cerebral o «ataque». En ocasiones, el estallido de un vaso es tan pequeño que únicamente ocasiona un trastorno ligero y temporal, o incluso pasa inadvertido; pero un colapso masivo de los vasos puede conducir a la parálisis o a la muerte súbita.

El endurecimiento y estrechamiento de las arterias es motivo de otro peligro. Debido al aumento de fricción de la sangre que va arañando la superficie interna endurecida de los vasos, tienden a formarse coágulos sanguíneos, y el estrechamiento de los vasos aumenta las posibilidades de que un coágulo pueda bloquear por completo el torrente sanguíneo. Si esto ocurre en la arteria coronaria, que alimenta el propio músculo cardíaco, un bloqueo («trombosis coronaria») puede producir la muerte casi instantáneamente.

Lo que causa exactamente la formación de depósitos en la pared arterial es una cuestión que ha dado lugar a una considerable controversia entre los científicos. En efecto, el colesterol parece estar involucrado en ello, pero la forma en que está implicado no se ha aclarado todavía. El plasma de la sangre humana contiene «lipoproteínas», las cuales consisten en colesterol y otras sustancias grasas ligadas a ciertas proteínas. Algunas de las fracciones que constituyen la lipoproteína mantienen una concentración constante en la sangre, tanto en la salud como en la enfermedad, antes y después de las comidas, etc. Otras fluctúan elevándose después de las comidas. Otras son especialmente elevadas en los individuos obesos. Una fracción, rica en colesterol, es particularmente elevada en las personas con exceso de peso y en aquellas que padecen arteriosclerosis.

La arteriosclerosis acostumbra a ir acompañada de un elevado contenido de grasa en la sangre, y esto es lo que ocurre en la obesidad. Las personas con exceso de peso son más propensas a la arteriosclerosis que las delgadas. Los diabéticos poseen también elevados niveles de grasa en la sangre y son más propensos a la arteriosclerosis que los individuos normales. Y, para completar el cuadro, la

incidencia de diabetes entre las personas gruesas es considerablemente más elevada que entre las delgadas.

Así, pues, no es por accidente el que aquellos que consiguen alcanzar edades avanzadas son a menudo individuos delgados y escuálidos. Los hombres grandes y gordos pueden ser alegres, pero, en general, suelen fallecer más pronto. (Por supuesto, existen siempre excepciones, y pueden indicarse hombres como Winston Churchill y Herbert Hoover, quienes celebraron su 90 cumpleaños y que nunca fueron conocidos precisamente por su delgadez.) La cuestión clave, hasta el momento, es si la arteriosclerosis puede ser combatida o prevenida mediante la dieta. Las grasas animales, tales como las de la leche, los huevos y la mantequilla, tienen un contenido particularmente elevado de colesterol; las grasas vegetales lo tienen bajo.

Además, los ácidos grasos de las grasas vegetales son principalmente de un tipo no saturado, lo cual se ha informado que contrarresta el depósito de colesterol. A pesar de que los investigadores de estas cuestiones no han llegado a resultados concluyentes en ningún sentido, la gente se ha abalanzado hacia las «dietas bajas en colesterol», con la esperanza de evitar el endurecimiento de las paredes arteriales. Sin duda, esto no puede perjudicarles.

Por supuesto, el colesterol existente en la sangre no procede del colesterol de la dieta. El cuerpo puede fabricar su propio colesterol con gran facilidad, y así lo hace, e, incluso, si nos alimentamos con una dieta que carezca completamente de colesterol, sin embargo, podemos tener una generosa provisión de colesterol en las lipoproteínas sanguíneas. Por tanto, parece razonable suponer que lo que importa no es la mera presencia del colesterol, sino la tendencia del individuo a depositarlo allí donde puede causar perjuicio. Cabe la posibilidad de que exista una tendencia hereditaria a fabricar cantidades excesivas de colesterol. Los químicos están investigando en busca de fármacos que inhiban la formación de colesterol, con la esperanza de que tales drogas puedan combatir el desarrollo de la arteriosclerosis en las personas propensas a la enfermedad.

Pero incluso quienes escapan a la arteriosclerosis, también envejecen. La vejez es una enfermedad de incidencia universal. Nada puede detener la debilidad progresiva, el aumento de fragilidad de los huesos, la pérdida de vigor de los

músculos, la rigidez de las articulaciones, el descenso de los reflejos, la debilitación de la vista y la declinante agilidad de la mente. La velocidad a que esto tiene lugar es, de algún modo, más baja en unos que en otros, pero, rápido o lento, el proceso es inexorable.

Quizá la Humanidad no debiera quejarse demasiado clamorosamente sobre este punto. Si la vejez y la muerte tienen que llegar inevitablemente, lo cierto es que lo hacen con una lentitud infrecuente en el reino animal. En general, el límite de la vida de los mamíferos está relacionado con su tamaño. El mamífero más pequeño, las musarañas, puede vivir año y medio, y la rata vive 4 o 5 años. El conejo vive 15 años; el perro, 18; el cerdo, 20; el caballo 40, mientras que el elefante puede alcanzar los 70 años de vida. Ciertamente, cuanto más pequeño es el animal, más «rápidamente» vive -más rápido es su ritmo cardíaco, por ejemplo. Puede compararse una musaraña, con un ritmo cardíaco de 1.000 pulsaciones por minuto, a un elefante, que tiene un ritmo de 20 pulsaciones por minuto.

En realidad, los mamíferos, en general, parecen vivir, en el mejor de los casos, tanto tiempo como le lleva a su corazón latir unos mil millones de veces. Sin embargo, de esta regla general, el hombre es la excepción más asombrosa. El ser humano es mucho más pequeño que el caballo y considerablemente más pequeño que el elefante; sin embargo, ningún mamífero consigue vivir tanto tiempo como él. Incluso sin tener en cuenta las leyendas sobre edades avanzadas, procedentes de diversas áreas rurales, donde no ha sido posible realizar registros precisos, existen datos razonablemente convincentes de límites de vida superiores a los 115 años. Los únicos vertebrados en conseguir esto son, sin duda, ciertas tortugas grandes de lentos movimientos.

El ritmo cardíaco humano, de unas 72 pulsaciones por minuto, es precisamente el que podría esperarse de un mamífero de su tamaño. En setenta años, lo cual es el promedio de esperanza de vida del hombre en las áreas tecnológicamente avanzadas del planeta, el corazón humano ha latido 2.500 millones de veces; a los 115 años, ha realizado unos 4.000 millones de latidos. Incluso los parientes más cercanos del hombre, los grandes simios, no pueden igualar esto, ni siquiera acercarse. El gorila, de un tamaño considerablemente mayor que el del ser humano, es considerado viejo a los cincuenta años.

No hay duda de que el corazón humano supera a todos los otros corazones existentes. (El corazón de la tortuga puede vivir más tiempo, pero no lo hace tan intensamente.) No se sabe por qué el ser humano vive tanto tiempo, pero el hombre, dada su naturaleza, está mucho más interesado en averiguar cómo podría alargar aún más este período.

Pero, ¿qué es la vejez? Hasta ahora, sólo existen especulaciones sobre ello. Algunos han sugerido que la resistencia del cuerpo a la infección disminuye lentamente con la edad (en una proporción que depende de la herencia).

Otros especulan sobre «residuos», de, un tipo u otro, que se acumulan en las células (también aquí en una proporción que varía de un individuo a otro). Estos supuestos productos residuales de las reacciones normales de la célula, que ésta no puede destruir ni eliminar, se acumulan lentamente en ella a medida que pasan los años hasta que, finalmente, interfieren con el metabolismo celular en tal grado que éste deja de funcionar. Cuando un número suficiente de células son inactivadas, el cuerpo muere. Una variante de esta teoría sostiene que las propias moléculas de proteínas se convierten en residuos, debido a que se desarrollan entre ellas eslabones cruzados, de forma que se convierten en rígidas y quebradizas y, finalmente, hacen que la maquinaria celular vaya rechinando hasta que llega a detenerse.

Si esto fuera cierto, la «insuficiencia» se produciría entonces dentro del mecanismo celular. Cuando Cartell consiguió, con gran habilidad, mantener vivo durante décadas un trozo de tejido embrionario, hizo creer que las propias células podrían ser inmortales: era la organización lo que nos hacía morir, las combinaciones de células individuales por miles de billones. Ahí fallaba la organización, no las células.

Pero aparentemente no es así. Ahora se piensa que Carrell pudo haber introducido (inadvertidamente) células frescas en su preparado para alimentar el tejido. Diversas tentativas para trabajar con células o grupos celulares aislados, donde se descartaba rigurosamente la introducción de células jóvenes, parecen demostrar que las células envejecen sin remedio -presumiblemente debido a ciertos cambios irreversibles en los componentes fundamentales de la célula.

Y, sin embargo, ahí está la extraordinaria longevidad del hombre. ¿Podría ser que el tejido humano haya desarrollado ciertos métodos, superiores por su eficiencia a los

de otros mamíferos, para contrarrestar o neutralizar el envejecimiento celular? Por otra parte, las aves tienden a vivir bastante más tiempo que los mamíferos del mismo tamaño, pese a que su metabolismo es mucho más rápido que el de los mamíferos. He aquí nuevamente la capacidad superior de la vejez para la reversión o la inhibición.

Si algunos organismos tienen más recursos que otros para retrasar el envejecimiento, no parece erróneo suponer que sea posible aprender el método y mejorarlo. ¿No sería, entonces, curable la vejez? ¿No podría llegar la Humanidad a disfrutar de una longevidad enorme o incluso, de la inmortalidad? El optimismo a este respecto se ha generalizado entre ciertos grupos humanos. Los milagros médicos en el pasado parecen ser heraldos de milagros ilimitados en el futuro. Y si tal cosa es cierta... iuno se avergüenza de vivir con una generación que no sabe cómo curar el cáncer, o la artritis o el envejecimiento! Por consiguiente, hacia finales de la década de 1960, se inició un movimiento cuyos mantenedores propugnaban la congelación de los cuerpos humanos en el momento de la muerte para conservar lo más intacta posible la maquinaria celular hasta el venturoso día en que tuviese cura todo cuanto había causado la muerte de los individuos congelados. Entonces éstos serían reanimados y se les podría dar salud, juventud, felicidad...

Hasta la fecha, no ha habido el menor indicio de que se pueda devolver la vida a un cuerpo muerto ni deshelar un cuerpo congelado -aún cuando estuviese vivo en el momento de la congelación para insuflarle el hálito vital. Los que abogan por tal procedimiento («criogenia») no prestan gran atención a los trastornos que pudieran originarse en la circulación de cuerpos muertos devueltos a la vida... iel ansia egocéntrica de inmortalidad impera sobre todo! La congelación de cuerpos para mantenerlos intactos posee escaso sentido, incluso aunque fuera posible reanimarlos. Sería una pérdida de tiempo. Hasta ahora, los biólogos han tenido mucha más fortuna con el desarrollo de organismos completos, grupos de células especializadas. Al fin y, al cabo, las células epidérmicas y renales poseen un equipo genético tan completo como el de las demás y como el que tuvo, en primer lugar, el óvulo fecundado. Las células son elementos especializados porque neutralizan o activan en grado variable los diversos genes. Ahora bien, ¿no sería posible

«desneutralizar» o «desactivar» los genes? ¿No podrían éstos transformar entonces su propia célula en el equivalente de un óvulo fecundado y crear de nuevo todo un organismo, es decir, un organismo idéntico -en términos genéticos- a aquél del cual han formado parte? Sin duda este procedimiento (denominado *cloning*) ofrece más promesas para una preservación, por así decirlo, de la personalidad (si no de la memoria). En lugar de congelar un cuerpo entero, isecciónese el dedo pequeño del pie y congélese eso!

Pero, ¿acaso deseamos realmente la inmortalidad... bien sea mediante la criogenia o el *cloning* o la simple inversión en cada individuo del fenómeno llamado envejecimiento? Hay pocos seres humanos que no aceptasen gustosamente la inmortalidad, una inmortalidad libre, hasta cierto punto, de achaques, dolores y efectos del envejecimiento. Pero supongamos, por un momento, que todos fuéramos inmortales.

Evidentemente, si hubiera pocas defunciones o ninguna sobre la Tierra, también habría pocos nacimientos o ninguno. Sería una sociedad sin niños.

Al parecer, eso no es fatídico; una sociedad suficientemente egocéntrica para aferrarse a la inmortalidad no titubearía ante la necesidad de eliminar por completo la infancia.

Pero, ¿le serviría de algo? Sería una sociedad compuesta por los mismos cerebros, fraguando los mismos pensamientos, ateniéndose a los mismos hábitos sin variación alguna, de forma incesante. Recordemos que el niño posee un cerebro no sólo joven, sino también *nuevo*. Cada recién nacido (exceptuando los nacimientos múltiples de individuos idénticos) posee una dotación genética sin la menor similitud con la de cualquier otro ser humano que haya vivido jamás. Gracias a los recién nacidos, la Humanidad recibe una inyección constante de combinaciones genéticas innovadoras; por tanto, se allana el camino para un perfeccionamiento y desarrollo crecientes.

Sería prudente hacer descender el nivel de natalidad, pero, ¿nos conviene anularlo totalmente? Sería muy grato eliminar las dolencias e incomodidades de la vejez, pero, ¿debemos crear a cambio una especie integrada por seres vetustos, cansinos, hastiados, siempre igual, sin dar entrada jamás a lo nuevo y lo mejor? Tal vez la inmortalidad ofrezca peores perspectivas que la propia muerte.



## Capítulo 15

### LAS ESPECIES

#### **Las Variedades De La Vida**

El conocimiento por parte del hombre de su propio cuerpo no es completo sin una noción de sus afinidades con los demás seres vivientes sobre la Tierra. En las culturas primitivas, este parentesco a menudo era considerado como muy estrecho. Muchas tribus consideraban a ciertos animales como sus antepasados o hermanos de sangre, y pensaban que era un crimen matarlos o comerlos, excepto en ciertas circunstancias rituales. Esta veneración de los animales como dioses o semidioses se conoce con el nombre de «totemismo» (derivado de una palabra india americana), y existen signos de él en culturas ya no tan primitivas. Los dioses con cabeza de animal, en Egipto, representaban restos de totemismo, y quizás, igualmente, lo es la veneración moderna de los hindúes por las vacas y los monos. Por otra parte, la cultura occidental, representada en las teorías griegas y hebreas, estableció ya desde muy antiguo una clara distinción entre el hombre y los «animales inferiores». Así, la Biblia subraya que el hombre fue creado por Dios «a su imagen y semejanza» (Génesis 1: 26). No obstante, también la Biblia da fe de un interés notablemente profundo por parte del hombre hacia los animales inferiores. El Génesis indica que Adán, en sus idílicos primeros tiempos en el Jardín del Edén, había realizado la tarea de asignar nombres «a cada bestia del campo y a cada ave del cielo».

A primera vista, no parece una labor especialmente difícil algo que podría hacerse, quizás, en una hora o dos. Los cronistas de las Escrituras colocaron «dos animales de cada especie» en el arca de Noé, cuyas dimensiones eran de 137 x 23 x 14 m (si consideramos que el codo tiene una longitud de 38 cm). Los filósofos naturalistas griegos especularon sobre el mundo viviente en términos igualmente limitados: Aristóteles pudo catalogar sólo aproximadamente unas 50 especies de animales, y su discípulo Teofrasto, el botánico más eminente de la antigua Grecia, enumeró únicamente unas 500 plantas diferentes.

Una relación de este tipo tendría sentido sólo si se creyera que un elefante es siempre un elefante, un camello es sólo un camello y una pulga no es más que una

pulga. Las cosas empezaron a complicarse más cuando los naturalistas comprobaron que los animales tenían que ser diferenciados sobre la base de sus posibilidades de cruzamiento entre sí. El elefante indio no podía ser cruzado con el elefante africano; por este motivo, ambos tenían que ser considerados como «especies» diferentes de elefantes. El camello de Arabia (una giba) y el camello de Bactriana (dos gibas) son también especies distintas, y, por lo que respecta a la pulga, los pequeños insectos picadores (que representan en conjunto la pulga común) se dividen en 500 especies diferentes! A través de los siglos, puesto que los naturalistas contabilizaron nuevas variedades de criaturas en la tierra, en el aire y en el mar, y dado que nuevas áreas del mundo quedaron dentro del campo de la observación, debido a la exploración, el número identificado de especies animales y vegetales creció astronómicamente. En el año 1800, alcanzaba ya los 70.000. Hoy día, se conocen más de un millón doscientas cincuenta mil especies diferentes, dos tercios de ellas animales y un tercio plantas, y ningún biólogo se atreve a suponer que la lista esté completa.

El mundo viviente podría resultar excesivamente confuso si no fuéramos capaces de clasificar esta enorme variedad de criaturas de acuerdo con algún esquema de afinidades. Se puede empezar agrupando conjuntamente al gato, tigre, león, pantera, leopardo, jaguar, y otros parecidos al gato, en la «familia del gato»; igualmente, el perro, el lobo, el zorro, el chacal, y el coyote forman la «familia del perro», etc. Basándose en un criterio general sencillo, podrían clasificarse algunos animales como comedores de carne y otros como comedores de plantas. Los antiguos realizaban también clasificaciones generales basadas en el hábitat, y así, consideraron a todos los animales que vivían en el mar como peces y a todos los que volaban por el aire como pájaros. Pero esto podría conducir a considerar la ballena como un pez y al murciélago como un pájaro. Realmente, y en un sentido fundamental, la ballena y el murciélago se parecen más entre sí que la primera a un pez y el otro a un pájaro. Ambos dan a luz crías vivas. Además, la ballena tiene pulmones para respirar el aire, en lugar de las agallas del pez, y el murciélago posee pelo, en vez de las plumas del pájaro. Tanto uno como otro están clasificados dentro de los mamíferos, es decir aquellos animales que engendran criaturas vivas (en lugar de poner huevos) y las alimentan con la leche materna.

Uno de los intentos más antiguos de realizar una ordenación sistemática fue el del inglés John Ray (o Wray), quien en el siglo XVII, clasificó todas las especies conocidas de plantas (aproximadamente 18.600), y más tarde las especies animales, de acuerdo con ciertos sistemas que le parecieron lógicos. Por ejemplo, dividió las plantas con flor en dos grupos principales, según que la semilla contuviera una hoja embrionaria o dos. Esta pequeña hoja embrionaria o par de hojas recibió el nombre de «cotiledón», derivado de la palabra griega utilizada para designar un tipo de copa (*kotyle*), porque estaban depositadas en una cavidad en forma de copa en la semilla. Por ello, Ray denominó a los dos tipos respectivamente «monocotiledóneas» y «dicotiledóneas». La clasificación (similar, por otra parte, a la realizada 2.000 años antes por Teofrasto) se mostró tan útil que incluso resulta efectiva hoy día. La diferencia entre una y dos hojas embrionarias resulta en sí mismo poco importante, pero existen algunas formas esenciales en las que todas las plantas monocotiledóneas se diferencian de las dicotiledóneas. La diferencia en las hojas embrionarias es sólo una etiqueta, conveniente, significativa, de muchas otras diferencias generales. (Del mismo modo, la distinción entre plumas y pelo es realmente poco importante en sí misma pero resulta una indicación práctica para la considerable serie de diferencias que separa a los pájaros de los mamíferos.) Aunque Ray y otros contribuyeron aportando algunas ideas útiles, el verdadero fundador de la ciencia de la clasificación o «taxonomía» (derivada de una palabra griega que significa «ordenación») fue un botánico sueco, mas conocido por su nombre latinizado de Carolus Linnaeus (Linneo), quien realizó su tarea de forma tan perfecta que las líneas principales de su esquema siguen vigentes todavía. Linneo expuso su sistema en 1737, en un libro titulado *Systema Naturae*. Agrupó las especies que se parecían entre sí en un «género» (de una palabra griega que significa «raza» o «estirpe»), dispuso a su vez los géneros afines en un «orden», y agrupó los órdenes similares en una «clase». Cada especie era denominada con un nombre compuesto por el del género y el de la propia especie. (Esto guarda mucha similitud con el sistema de la guía telefónica, que alfabetiza Smith, John; Smith, William; y así sucesivamente.) Por tanto, los miembros del género del gato son el *Felis domesticus* (el gato doméstico), *Felis leo* (el león), *Felis pardus* (el leopardo), *Felis tigris* (el tigre), etc. El género al que pertenece el perro incluye el *Canis*

*familiaris* (el perro), *Canis lupus* (el lobo gris europeo), *Canis occidentalis* (el lobo de los bosques americanos), etc. Las dos especies de camellos son el *Camelus bactrianus* (el camello de Bactriana) y el *Camelus dromedarius* (el camello de Arabia).

Alrededor de 1880, el naturalista francés Georges Leopold Cuvier avanzó un paso más allá de las «clases» y añadió una categoría más general llamada «tipo» (*phylum*) (a partir de una palabra griega que significa «tribu»). Un tipo incluye todos los animales con la misma disposición general del cuerpo (un concepto que fue subrayado y puesto de manifiesto nada menos que por el gran poeta germano Johann Wolfgang von Goethe). Por ejemplo, los mamíferos, pájaros, reptiles, anfibios y peces están agrupados en un solo tipo, porque todos tienen columna vertebral, un máximo de cuatro miembros y sangre roja con un contenido de hemoglobina. Los insectos, las arañas, los crustáceos y los ciempiés están clasificados en otro tipo; las almejas, las ostras y los moluscos (mejillones) en otro, y así sucesivamente. En la década de 1820, el botánico suizo Augustin Pyramus de Candolle, de forma similar, perfeccionó el sistema de clasificación de las plantas de Linneo. En lugar de agrupar las especies entre sí según su apariencia externa, concedió mayor importancia a su estructura y funcionamiento internos.

El árbol de la vida fue ordenado entonces, tal como se describirá en los párrafos siguientes, partiendo de las divisiones más generales hasta llegar a las más específicas.

Empezaremos con los «reinos» -vegetal, animal, e intermedio (es decir aquellos microorganismos, como las bacterias, que no pueden ser definitivamente clasificados como plantas o animales propiamente dichos). El biólogo germano Ernst Heinrich Haeckel sugirió, en 1866, que este grupo intermedio fuera llamado «Protistas», término que viene siendo cada vez más utilizado por los biólogos, a pesar de que el mundo de los seres vivientes está todavía dividido exclusivamente, hablando en términos populares, en «animal y vegetal».

El reino vegetal, según un sistema de clasificación, se divide en dos subreinos. En el primer subreino, llamado Talofitas, figuran todas las plantas que no poseen raíces, tallos u hojas: a saber, las algas (las plantas verdes unicelulares y los diversos líquenes), que contienen clorofila, y los hongos (los mohos unicelulares y

organismos tales como las setas), que no la poseen. Los miembros del segundo subreino, los Emblioíticas, se dividen en dos tipos principales: Biofritas (los distintos musgos) y Traqueofitas (plantas con sistemas de tubos para la circulación de la savia), que incluyen todas las especies que ordinariamente consideramos plantas. Este último gran tipo consta de tres clases principales, las Filicinas, las Gimnospermas, y las Angiospermas. En la primera clase están los helechos, que se reproducen mediante esporas. Las Gimnospermas, que forman las semillas en la superficie de los órganos reproductores, incluyen los diversos árboles coníferos siempre verdes. Las Angiospermas, con las semillas encerradas en los ovarios, constituyen la mayor parte de las plantas familiares.

Igualmente, por lo que se refiere al reino animal, enumeraremos solamente los tipos más importantes.

Los Protozoos («primeros animales») son, por supuesto, los animales unicelulares. A continuación están los Poríferos, animales que consisten de colonias de células dentro de un esqueleto poroso; éstas son las esponjas.

Las células individuales muestran signos de especialización, pero conservan una cierta independencia, pues aunque si en definitiva se separan filtrándose a través de tejido de seda, pueden agregarse para formar una nueva esponja.

(En general, a medida que los tipos animales se hacen más especializados, las células y los tejidos individuales se vuelven menos «independientes». Las criaturas simples pueden volver a crear su organismo completo, incluso aunque éste haya sido bárbaramente mutilado, proceso que recibe el nombre de «regeneración». Otros organismos más complejos pueden regenerar los miembros. Sin embargo, para el tiempo de existencia que le concedemos al hombre, la capacidad de regeneración se ha mostrado muy decepcionante. Somos capaces de regenerar una uña perdida, pero no un dedo perdido.) El primer tipo cuyos miembros pueden ser considerados realmente como animales multicelulares es el de los Celentéreos (palabra que significa «intestino hueco»). Estos animales tienen básicamente la forma de una copa y constan de dos capas de células: el ectodermo («piel exterior») y el endodermo («piel interior»). Los ejemplos más comunes de este tipo son las medusas y las anémonas marinas.

Todos los demás tipos animales tienen una tercera capa de células: el mesodermo («piel media»). A partir de estas tres capas, reconocidas por vez primera, en 1845, por los fisiólogos alemanes Johannes Peter Müller y Robert Remak, se forman la multiplicidad de órganos de los animales, incluso los más complejos, entre los que se encuentra el hombre.

El mesodermo se origina durante el desarrollo del embrión y la forma en que lo hace divide a los animales implicados en dos «supertipos». Aquellos en los que el mesodermo se forma en la unión del ectodermo y el endodermo constituyen el supertipo Anélido; los animales en los cuales el mesodermo se origina solamente en el endodermo forman el supertipo Equinodermo.

Consideraremos primeramente el supertipo Anélido. Su tipo más simple es el de los Platelmintos (del griego «gusanos aplanados»). Éstos incluyen no solamente el parásito solitaria, sino también formas vivientes libres. Los gusanos aplanados tienen fibras contráctiles que pueden ser consideradas como músculos primitivos, y poseen también cabeza, cola, órganos especiales para la reproducción y lo que puede considerarse el comienzo de órganos excretores. Además, los gusanos aplanados muestran simetría bilateral: es decir, que sus lados izquierdo y derecho son las correspondientes imágenes de sus contrarios en el espejo. Se desplazan hacia delante, y sus órganos de los sentidos y nervios rudimentarios están concentrados en el área de la cabeza, de forma que puede afirmarse de ellos que poseen un cerebro rudimentario.

A continuación sigue el tipo Nematodos (procedente de la palabra griega que significa «en forma de hilo»), cuyo miembro más conocido es la lombriz intestinal. Estas criaturas poseen un primitivo flujo sanguíneo: un fluido en el interior del mesodermo que baña todas las células y transporta los alimentos y el oxígeno hasta ellas. Esto hace que los nematodos, en contraste con los animales como la aplanada solitaria, tengan un cierto volumen, para que el fluido pueda llevar el alimento a las células interiores. Los nematodos poseen también un intestino con dos aberturas, una para la entrada de alimentos y la otra (el ano) para la eyección de los residuos. Los dos tipos siguientes en este supertipo poseen duros «esqueletos» externos, es decir, conchas (que se hallan en algunos de los tipos más simples también). Estos dos grupos son los Braquiópodos, que tienen conchas dorsoventrales de carbonato

de calcio y los Moluscos (de la palabra latina «blando»), cuyos cuerpos blandos están encerrados en conchas que se originan desde los lugares derecho e izquierdo del animal, en lugar del dorso y el vientre. Los moluscos más familiares son las almejas, las ostras, y los caracoles. Un tipo particularmente importante dentro del supertipo Anélido es el de los Anélidos. Éstos son también gusanos, pero con una diferencia: están constituidos por segmentos, pudiendo ser considerado cada uno de ellos como una especie de organismo en sí mismo. Cada segmento tiene sus propios nervios que se ramifican a partir del tronco nervioso principal, sus propios vasos sanguíneos, sus propios túbulos para la conducción de los residuos al exterior, sus propios músculos, y así sucesivamente. En el anélido más familiar, la lombriz de tierra, los segmentos están claramente marcados por pequeñas constricciones de la carne, que parecen como diminutos anillos alrededor del animal; en realidad, Anélidos es una palabra que procede del latín y significa «pequeño anillo».

Aparentemente, la segmentación proporciona al animal una eficiencia superior, por lo cual las especies más predominantes del reino animal, incluyendo el hombre, están segmentadas. (De los animales no segmentados, el más complejo y logrado es el calamar.) Si queremos saber en qué forma está segmentado el cuerpo humano, consideraremos las vértebras y las costillas; cada vértebra de la columna vertebral y cada costilla representan un segmento separado del cuerpo, con sus propios nervios, músculos y vasos sanguíneos. Los anélidos, al carecer de esqueleto, son blandos y relativamente indefensos. No obstante, el tipo Artrópodos («pies articulados») consigue combinar la segmentación con el esqueleto, siendo éste tan segmentado como el resto del cuerpo. El esqueleto no sólo es más manejable debido a su capacidad de articulación, sino también ligero y flexible, estando constituido por un polisacárido llamado «quitina», en lugar de la maciza e inflexible piedra caliza o carbonato cálcico. Considerados globalmente, los artrópodos, que incluyen las langostas, las arañas, los ciempiés y los insectos, es el tipo más abundante de todos los existentes. Al menos, comprende mayor número de especies que todos los otros tipos juntos.

Esto rige sólo para los tipos principales del supertipo Anélido. El otro supertipo, el Equinodermo, contiene únicamente dos tipos importantes. Uno es el Equinoideo («piel espinosa»), que incluye criaturas tales como la estrella marina y el erizo de

mar. Los Equinodermos se diferencian de los otros tipos dotados de mesodermo en que posee una simetría radial y en no tener una cabeza y una cola claramente definidas (aunque, en la Antigüedad, los equinodermos mostraban simetría bilateral, condición que han perdido a medida que han ido madurando).

El segundo tipo importante del supertipo Equinode no es verdaderamente importante, dado que a él pertenece el hombre.

La característica general que distingue a los miembros de este tipo (que abarca el hombre, el aveSTRUZ, la serpiente, la rana, la caballa, y una diversidad de otros animales) es el esqueleto interno. Ningún animal, aparte de este tipo, lo posee. El signo particular de tal esqueleto es la columna vertebral. En realidad, la columna vertebral es una característica tan importante que, en el lenguaje común, todos los animales están ampliamente divididos en vertebrados. Realmente, existe un grupo intermedio que tiene una varilla de cartílago llamada «notocordio» («cuerda dorsal») en lugar de la columna vertebral. El notocordio, descubierto por vez primera por Von Baer, quien también había descubierto el huevo de los mamíferos, parece representar una columna vertebral rudimentaria; de hecho, aparece incluso en los mamíferos durante el desarrollo del embrión. Por ello, los animales con notocordios (diversos seres, como el gusano, la babosa y el molusco) se clasifican entre los vertebrados. El tipo, considerado globalmente, fue denominado Cordados, en 1880, por el zoólogo inglés Francis Maitland Balfour; se divide en cuatro subtipos, tres de los cuales poseen solamente notocordio. El cuarto, con una verdadera columna vertebral y un esqueleto general interno, es el de los vertebrados.

Los vertebrados existentes hoy día forman dos superclases: los Piscis («peces») y los Tetrápodos (animales con «cuatro patas»).

El grupo Piscis se compone de tres clases:

1.<sup>º</sup>Los peces Agnatos («sin mandíbulas»), que tienen verdaderos esqueletos, aunque no miembros o maxilas -el espécimen representativo mejor conocido, la lamprea, posee una serie de limas rasposas contorneando una boca en forma de embudo-;

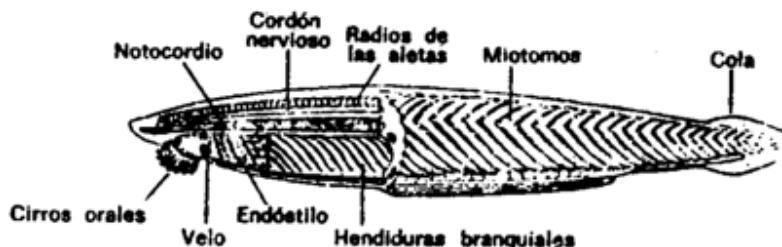
2.<sup>º</sup>Los Elasmobranquios («peces cartilaginosos»), con un esqueleto de cartílago en lugar de hueso, de los que el tiburón es el ejemplo más conocido; y

### 3.º Los Teleóstomos, o «peces óscos».

Los tetrápodos, o animales dotados de cuatro patas y que respiran mediante pulmones, constituyen cuatro clases. Los más simples son los Anfibios («doble vida») -por ejemplo, las ranas y los sapos-. Doble vida significa que, en su infancia inmadura (es decir, cuando son renacuajos), no tienen miembros y respiran por medio de branquias; luego, en el estado adulto, desarrollan cuatro miembros y pulmones. Los anfibios, al igual que los peces, depositan sus huevos en el agua.

La segunda clase son los Reptiles (del latín *reptilis*, «arrastrarse»). Éstos incluyen las serpientes, lagartos, caimanes y tortugas. Estos animales respiran por medio de pulmones desde su nacimiento, y depositan sus huevos (encerrados en una dura cáscara) en la tierra. Los reptiles más desarrollados tienen, en esencia, corazones con cuatro cavidades, en tanto que el corazón de los anfibios tiene tres cavidades y el de los peces solamente dos.

Los últimos dos grupos de tetrápodos son las Aves (pájaros) y los Mamíferos (ídem). Todos poseen sangre caliente: es decir, sus cuerpos están dotados de sistemas para mantener una temperatura interna constante, independientemente de la temperatura exterior (dentro de límites razonables). Dado que la temperatura interna es generalmente más elevada que la exterior, estos animales precisan aislamiento térmico. Con este fin, los pájaros están dotados de plumas y los mamíferos de pelo, sirviendo esto, en ambos casos, para mantener una capa de aire aisladora cerca de la piel. Los pájaros depositan huevos como los reptiles. Los mamíferos, naturalmente, paren, sus pequeños ya «empollados» y los alimentan con la leche producida por las glándulas mamarias (*mammae* en latín).



**Anfioxo, un primitivo cordado en forma de pez con notocordio.**

En el siglo XIX, los zoólogos tuvieron noticia de un hecho tan curioso y sorprendente que rehusaron creer en él. Los australianos habían hallado una criatura, dotada de pelo y productora de leche (mediante unas glándulas mamarias que carecían de pezones) y que, no obstante, ponía huevos! Incluso cuando los zoólogos hubieron contemplado especímenes del animal (por desgracia, muerto, ya que no es fácil mantenerlo vivo fuera de su hábitat natural), se inclinaron a considerarlo como un tosco fraude. La bestia era un animal anfibio, que se parecía bastante a un pato: tenía un pico parecido al de las aves y pies palmípedos. Eventualmente, el «ornitorrinco» tuvo que ser reconocido como un fenómeno genuino y, por tanto, como una nueva clase de mamífero. Otro mamífero ponedor de huevos, el equidna, ha sido hallado desde entonces en Australia y Nueva Guinea. No sólo es el hecho de poner huevos lo que relaciona a estos mamíferos estrechamente con los reptiles; además, tienen sólo imperfectamente caliente su sangre; en los días fríos, su temperatura interna puede alcanzar los 10º C.

Hoy día, los mamíferos se dividen en tres subclases. Los que ponen huevos forman la primera clase, los Prototerios (del griego «primeros animales»). El embrión en el huevo está realmente bien desarrollado en el momento en que éste es depositado, y no necesita ser empollado durante largo tiempo. La segunda subclase de mamíferos, los Metaterios. («animales medios»), incluyen las zarigüeyas y los canguros. Su infancia, aunque nacen vivos, transcurre de una forma muy poco desarrollada, y mueren en breve tiempo, a menos que consigan alcanzar la bolsa protectora de la madre y permanecer junto a los pezones mamarios hasta que están lo suficientemente fuertes como para ir de un lado a otro. Estos animales reciben el nombre de «marsupiales» (del latín *marsupium*, la palabra latina para bolsa).

Por último, en la cúspide de la jerarquía de los mamíferos, llegamos a la subclase Euterios («verdaderos animales»). Su característica distintiva es la placenta, un tejido irrigado por la sangre que permite a la madre proporcionar al embrión los alimentos y el oxígeno y liberarle de sus residuos, de forma que puede desarrollar su cría durante un largo periodo de tiempo dentro de su propio cuerpo (nueve meses en el caso del ser humano; dos años, para los elefantes y las ballenas). Los Euterios se denominan generalmente «mamíferos placentarios».

Los mamíferos placentarios se dividen en una docena de órdenes, de los que son ejemplos los siguientes:

Insectívoros («comedores de insectos») - musarañas, topos, y otros.

Quirópteros («manos-alas») - murciélagos.

Carnívoros («comedores de carne») - la familia del gato, la del perro, comadrejas, osos, focas, etc., pero sin incluir al hombre.

Roedores («que roen») - ratones, ratas, conejos, ardillas, cobayas, castores, puerco espines, etc.

Desdentados («sin dientes») - los perezosos y armadillos, que han echado dentición, y los osos hormigueros, que no lo han hecho.

Artiodáctilos («dedos pares») - animales con cascos, que poseen un número par de dedos en cada pie, tal como los machos cabríos, las ovejas, las cabras, el cerdo, el ciervo, los antílopes, los camellos, las jirafas, etc.

Perisodáctilos («dedos impares») - caballos, asnos, cebras, rinocerontes y tapires.

Proboscídos («nariz larga») - los elefantes, por supuesto.

Odontocetos («cetáceos dentados») - el cachalote y otros con dientes.

Mistacocétidos («cetáceos con barbas») - la ballena propiamente dicha (ballena franca), la ballena azul y otras que filtran los pequeños animales marinos que les sirven de alimento a través de las barbas cónicas que parecen como un inmenso bigote en el interior de la boca.

Primates («primero») - el hombre, los simios, los monos, y algunos otros seres, con los que el hombre puede comprobar se halla asociado, con gran sorpresa por su parte.

Los primates se caracterizan por el hecho de que las manos, y en ocasiones, los pies, están equipados para aprehender, con los pulgares opuestos y grandes dedos gordos del pie. Los dedos terminan en uñas aplanaadas en lugar de garras afiladas o pezuñas. El cerebro tiene un tamaño superior al de las otras especies y el sentido de la vista es más importante que el del olfato. Existen muchos otros criterios anatómicos menos evidentes que éstos.

Los primates se dividen en nueve familias. Algunas tienen tan pocas características de primates, que es difícil considerarlas como tales, aunque así deben ser clasificadas. Una de ellas es la familia de los Tupáyidos, que incluye las musarañas

de los árboles, devoradoras de insectos! Luego, están los lemúridos -de vida nocturna, seres que viven en los árboles y poseen boca parecida a la de la zorra y la apariencia de una ardilla-. Éstos se hallan particularmente en Madagascar.

Las familias más próximas al hombre son, por supuesto, los monos y los simios. Existen tres familias de monos (la palabra posiblemente se deriva de la latina *homunculus*, que significa «hombre pequeño»).

Las dos familias de monos en América, conocidas como los «monos del Nuevo Mundo», son los Cébidos (por ejemplo, el mono lanudo) y los Calitrícidos (por ejemplo, el tití). La tercera, la familia del «Viejo Mundo», son los Cercopitécidos; éstos incluyen los diversos babuinos.

Todos los simios pertenecen a una familia, llamada Póngidos. Son oriundos del hemisferio Oriental. Sus diferencias más notables con respecto a los monos son, por supuesto, su mayor tamaño y el carecer de cola. Los simios se clasifican en cuatro tipos: el gibón, el más pequeño, velludo, mejor armado y más primitivo de la familia; el orangután, de mayor tamaño, aunque también morador de los árboles, al igual que el gibón; el gorila, con un tamaño superior al del hombre, que habita principalmente en el suelo y es oriundo de África; y el chimpancé, que también habita en África, tiene una estatura inferior a la del hombre y es el primate más inteligente, después del hombre mismo.

Y por lo que se refiere a nuestra propia familia, la de los Homínidos, ésta comprende hoy día únicamente un solo género y, en realidad, una sola especie. Linneo la denominó *Homo sapiens* («el hombre sabio»), y hasta ahora nadie se ha atrevido a cambiar este nombre, a pesar de la provocación.

## Evolución

Resulta casi imposible confeccionar la lista de los seres vivientes, tal como acabamos de hacer, sin finalizar con la poderosa impresión de que ha existido una lenta evolución de la vida desde la muy simple hasta la más compleja. Los tipos pueden ser dispuestos de forma que cada uno parece añadir algo al anterior. Dentro de cada tipo, las distintas clases pueden ser clasificadas igualmente, y, dentro de cada clase, los órdenes.

Además, las especies a menudo parecen entremezclarse, como si estuvieran todavía evolucionando por caminos ligeramente separados, a partir de antepasados comunes, no muy lejanos en el tiempo. Algunas especies se hallan tan estrechamente relacionadas que, en especiales circunstancias, pueden entrecruzarse, como ocurre en el caso de la yegua y el asno, que, mediante la adecuada cooperación, pueden engendrar una mula. El ganado vacuno puede ser cruzado con los búfalos, y los leones, con los tigres. Existen también especies intermedias, por así decirlo, seres que enlazan entre sí dos grandes grupos de animales. El leopardo es un gato con determinadas características perrunas, y la hiena, un perro con ciertos rasgos felinos. El platipo es un mamífero que parece haberse quedado a mitad del camino en su evolución desde los reptiles. Existe un ser llamado peripato, que parece medio gusano, medio ciempiés. Las líneas divisorias se vuelven particularmente tenues cuando se consideran ciertos animales en sus estadios más jóvenes. La cría de la rana, o renacuajo, se parece a un pez, y existe un cordado primitivo llamado balanoglosa, descubierto en 1825, que en su estadio inicial es tan parecido a una cría de equinodermo que al principio fue clasificada como tal.

Podemos seguir prácticamente la evolución a través de los tipos, incluso en el desarrollo de un ser humano a partir del huevo fertilizado. El estudio de este desarrollo («embriología») comenzó, en la moderna acepción de la palabra, con Harvey, el descubridor de la circulación de la sangre. En 1759, el fisiólogo alemán Kaspar Friedrich Wolff demostró que el cambio en el interior del huevo era realmente una evolución. Es decir, que crecían tejidos especializados a partir de precursores no especializados mediante una alteración progresiva, en lugar de hacerlo (tal como anteriormente se había supuesto) a través de un simple crecimiento de las tenues estructuras ya especializadas que existían en el huevo para empezar.

En el curso de esta evolución, el huevo empieza como una célula única (una clase de protozoo), posteriormente se transforma en una pequeña colonia de células (como en una esponja), cada una de las cuales, desde el principio, es capaz de separarse e iniciar la vida por su propia cuenta, al igual que ocurre cuando se desarrollan dos gemelos idénticos.

El embrión en desarrollo pasa a través de un estado de dos capas (como un celentérido), luego añade una tercera capa (como un equinodermo), y así continúa añadiendo complejidades en aproximadamente el mismo orden progresivo de las especies. El embrión humano tiene, en algún momento de su desarrollo, el notocordio de un cordado primitivo, más tarde agallas, que le dan una reminiscencia de pez, y aún más tarde, la cola y el vello del cuerpo de un mamífero inferior.

A partir de Aristóteles, muchos hombres especularon sobre la posibilidad de que los organismos hubieran evolucionado partiendo unos de otros. Pero, a medida que el Cristianismo aumentó su influencia, este tipo de especulaciones fueron condenadas. El capítulo primero del Génesis, en la Biblia, establecía claramente que todo ser viviente había sido creado «según su especie», y, tomado literalmente, esto significa que las especies eran «inmutables» y que debían haber tenido la misma forma desde el verdadero principio. Incluso Linneo, quien tenía que haberse sorprendido por las afinidades aparentes entre los seres vivientes, insistió con firmeza en la inmutabilidad de las especies.

La historia literal de la Creación, por muy profunda que estuviera arraigada en las mentes humanas, tuvo que sucumbir más tarde ante la evidencia de los «fósiles» (derivada de una palabra latina que significa «excavar»). Ya en 1669, el científico danés Nicolaus Steno había puesto de manifiesto que las capas inferiores («estratos») de las rocas tenían que ser más antiguas que los estratos superiores. Al considerar cualquier posible curso de la formación de la roca, resulta cada vez más evidente que los estratos inferiores tenían que ser *mucho más* antiguos que los superiores. Los restos petrificados de seres que vivieron en otros tiempos se hallaban a menudo tan profundamente incrustados bajo las capas de roca que tenían que ser muchísimo más antiguos que los pocos miles de años que habían transcurrido desde la Creación, tal como se describe en la Biblia. Las pruebas fósiles también señalaron la existencia de enormes cambios ocurridos en la estructura de la Tierra. En una época tan antigua como el siglo VI a de J.C., el filósofo griego Jenófanes de Colofón había señalado la presencia de conchas marinas fósiles en las montañas y había supuesto que dichas montañas estuvieron bajo las aguas muchos siglos antes.

Los defensores de las palabras literales de la Biblia sostenían que el parecido de los fósiles con organismos vivientes en otro tiempo era sólo accidental, o bien que habían sido creados engañosamente por el diablo. Estas teorías resultaban totalmente inverosímiles; después se hizo una sugerencia más plausible respecto a que los fósiles eran restos de seres ahogados en el Diluvio. Las conchas marinas en las cumbres de las montañas realmente podrían ser la prueba de ello, ya que el relato bíblico del Diluvio dejaba bien sentado que el agua cubrió todas las montañas.

Pero, tras un examen más cuidadoso, muchos de estos organismos fósiles demostraron ser distintos de cualesquiera especies vivientes. John Ray, el primer clasificador, se preguntó si podrían representar a especies extintas. Un naturalista suizo, llamado Charles Bonnet, fue más lejos. En 1770, sugirió que los fósiles eran realmente los restos de especies extinguidas que habían sido destruidas en antiguas catástrofes geológicas que se remontaban a mucho tiempo antes del Diluvio.

Sin embargo, fue un agrimensor inglés, llamado William Smith, quien proporcionó una base científica para el estudio de los fósiles («paleontología»). Mientras trabajaba en unas excavaciones para abrir un canal en 1791, quedó impresionado por el hecho de que la roca a través de la que se estaba abriendo el canal se dividía realmente en estratos y que cada estrato contenía sus propios fósiles característicos. Ahora ya era posible clasificar los fósiles en un *orden* cronológico, según el lugar que ocuparan en la serie de capas sucesivas, y asociar, además, cada fósil con un tipo particular de estrato rocoso que representaría un determinado período en la historia geológica.

Aproximadamente en 1800, Cuvier (el hombre que inventó la noción de tipo) clasificó los fósiles según el sistema de Linneo y extendió la anatomía comparada hasta el pasado remoto. Aunque muchos fósiles representaban especies y géneros no hallados entre los seres vivientes, todas se acomodaban claramente a uno o a otro de los tipos conocidos y, así, entraban a formar parte integral del esquema de la vida. En 1801, por ejemplo, Cuvier estudió un fósil de dedos largos, de un tipo descubierto por vez primera veinte años antes, y demostró que correspondía a los restos de una especie voladora de alas coriáceas, que no existía en la actualidad -al menos que no existía *exactamente*. Fue capaz de mostrar, a partir de la estructura

ósea, que estos «pterodáctilos» («dedos en forma de alas»), tal como los llamó, eran reptiles, claramente emparentados con las serpientes, lagartos, cocodrilos y tortugas de hoy día.

Además, cuanto mayor era la profundidad del estrato en que se hallaba el fósil y mayor, por tanto, la antigüedad del mismo, más simple y menos desarrollado parecía éste. No sólo eso, sino que también, en ocasiones, algunos fósiles representaban formas intermedias que enlazaban dos grupos de seres, los cuales, tomando como referencia las formas vivientes, parecían completamente separadas. Un ejemplo particularmente sorprendente, descubierto después del tiempo de Cuvier, fue un pájaro muy primitivo llamado arqueoptérix (del griego *archaios*, antiguo y *pteryx*, pájaro). Este animal, hoy día extinguido, tenía alas y plumas, ipero también poseía una cola de lagarto, adornada con plumas, y un pico que contenía dientes de reptil! En estos y otros aspectos resultaba evidente que establecía una especie de puente entre los reptiles y los pájaros.

Cuvier supuso también que las catástrofes terrestres, más que la evolución, habían sido las responsables de la desaparición de las formas de vida extinguidas, pero, en la década de 1830, la nueva teoría de Charles Lyell sobre los fósiles y la historia geológica, que ofreció en su histórico trabajo los *Principios de Geología*, liquidó completamente el «catastrofismo» (véase capítulo III). Una teoría razonable sobre la evolución se convirtió en una necesidad, si algún significado tenía que surgir de las pruebas paleontológicas.

Si los animales habían evolucionado de unas formas a otras, ¿qué era lo que les había obligado a hacerlo? Éste fue el escollo principal con que se tropezó en las tentativas efectuadas para explicar las variedades de la vida. El primero en intentar una explicación fue el naturalista francés Jean-Baptiste de Lamarck. En 1809, publicó un libro, titulado *Filosofía Zoológica*, en el que sugirió que el medio ambiente obligaba a los organismos a sufrir pequeños cambios, los cuales eran luego transmitidos a sus descendientes. Lamarck ilustró su idea con la jirafa (una sensación del momento, recientemente descubierta). Supuso que una criatura primitiva, parecida al antílope, que se alimentaba de las hojas de los árboles, habría agotado los alimentos fácilmente alcanzables, viéndose obligada a estirar su cuello tanto como podía para conseguir más comida. Debido al esfuerzo habitual de estirar

el cuello, la lengua y las patas, gradualmente aumentó la longitud de estos apéndices. Luego habría transmitido estas características desarrolladas a sus hijos, los cuales, a su vez, debían de haberse estirado más y transmitido a su vez un cuello aún más largo a sus descendientes; y así sucesivamente. Poco a poco, generación tras generación de esfuerzos encaminados a aumentar la longitud del cuello, el primitivo antílope habría evolucionado hasta la actual jirafa.

La idea de Lamarck sobre la «herencia de los caracteres adquiridos» tropezó rápidamente con dificultades.

¿Cómo se había desarrollado en la jirafa, por ejemplo, su piel manchada? Seguramente ninguna acción por su parte, deliberada o involuntaria, podría haber producido este cambio. Además, un experimentador escéptico, el biólogo alemán August Friedrich Leopold Weismann, cortó las colas de un grupo de ratones durante varias generaciones e informó que la última generación mostraba unas colas no inferiores en tamaño a las de la primera. (Pudo haberse ahorrado este esfuerzo considerando el ejemplo representado por la circuncisión de los varones judíos, los cuales, después de un millar de generaciones, no han conseguido producir ninguna disminución de tamaño en el prepucio.)



*Archaeopteryx.*

En 1883, Weismann había observado que las células germen, que eventualmente habrían de originar el espermatozoide o el huevo, se separaban del resto del embrión en un estadio precoz y permanecían relativamente no especializadas. A partir de esto, y de sus experimentos con las colas de las ratas, Weismann dedujo

la teoría de la «continuidad del plasma germinal». En su opinión, el plasma germinal (es decir, el protoplasma que forma las células germinales) poseía una existencia continua a través de las generaciones, independientemente del resto del organismo, aunque tenía en éste un habitáculo temporal, por así decirlo, que se construía y destruía en cada generación.

El plasma germinal gobernaba las características del cuerpo, pero no era afectado por éste. En su exposición, aparecía como el extremo opuesto de Lamarck, y se equivocaba también, aunque, considerada en conjunto, la situación real se asemeja más estrechamente al punto de vista de Welsmann que al de Lamarck.

A pesar de ser rechazado por la mayor parte de los biólogos, el lamarckismo subsistió hasta el siglo XX, e incluso tuvo una poderosa, aunque en apariencia temporal, resurrección en la forma del lysenkoísmo (modificación hereditaria de las plantas mediante ciertos tratamientos) en la Unión Soviética. (Trofim Denisovich Lysenko, el autor de esta teoría, fue poderoso en la época de Stalin, retuvo parte de su influencia durante el gobierno de Kruschev y al fin cayó en desgracia cuando Kruschev fue apartado del poder en 1964.) Los geneticistas modernos no excluyen la posibilidad de que la acción del medio ambiente pueda dar lugar a ciertos cambios transmisibles en los organismos simples, pero la idea de Lamarck, como tal, fue destruida por el descubrimiento de los genes y de las leyes de la herencia.

En 1831, un joven inglés llamado Charles Darwin, un diletante y deportista que había vivido una juventud un tanto desocupada y que buscaba con insistencia alguna cosa que le permitiera vencer su aburrimiento, fue persuadido por un capitán de barco y un profesor de Cambridge para que embarcara como naturalista en un buque, dispuesto para un viaje alrededor del mundo con una duración de cinco años. La expedición tenía como objetivo estudiar los litorales continentales y realizar observaciones sobre la flora y la fauna durante el trayecto. Darwin, que contaba entonces 22 años de edad, realizó a bordo del *Beagle* el más importante viaje por mar de la historia de la ciencia.

Mientras el barco navegaba lentamente a lo largo de la costa este de Sudamérica y luego remontándola por la costa oeste. Darwin fue recopilando cuidadosamente toda clase de información sobre las diversas formas de vida vegetal y animal. Su descubrimiento más sorprendente tuvo lugar en un grupo de islas del Pacífico,

aproximadamente unas 650 millas al este del Ecuador, llamada islas Galápagos, debido a las tortugas gigantes que vivían en ellas (galápagos procede de la palabra española tortuga). Lo que más atrajo la atención del joven Darwin durante sus cinco semanas de estancia en las islas fue la diversidad de pinzones que había en ellas; éstos se conocen en la actualidad como «los pinzones de Darwin». Halló que los pájaros se dividían en al menos unas catorce especies diferentes, distinguiéndose unas de otras principalmente por las diferencias en la forma y tamaño de sus picos. Estas especies particulares no existían en ningún otro lugar del mundo, pero se parecían a un pariente evidentemente cercano del continente sudamericano. ¿Qué era lo que motivaba el carácter de los pinzones en estas islas? ¿Por qué se diferenciaban de los pinzones ordinarios, y por qué se dividían en no menos de catorce especies? Darwin decidió que la teoría más razonable al respecto era que todas ellas descendían de un tipo principal de pinzón y que se habrían ido diferenciando durante el largo período de aislamiento soportado en el archipiélago. La diferenciación se habría producido como resultado de la variación de los métodos de obtención de los alimentos.

Tres de las especies de pinzones comían todavía semillas, al igual que la especie continental, pero cada una comía una clase distinta de semillas y variaba, por tanto, en su tamaño, existiendo una especie más grande, otra mediana y una tercera más pequeña. Otras dos especies se alimentaban de cactus; la mayor parte de las restantes comían insectos.

El problema de los cambios ocurridos en las costumbres alimentarias y las características físicas de los pinzones preocupó la mente de Darwin durante varios años. En 1838 empezó a vislumbrar un atisbo de respuesta al leer un libro que había sido publicado cuarenta años antes por un clérigo inglés llamado Thomas Roben Malthus. Se titulaba *Un ensayo sobre el principio de la Población*; en él, Malthus sostenía que la población crece siempre en una proporción mayor que su provisión de alimentos, de forma que finalmente el hombre, una epidemia o la guerra la diezmaban. Fue en este libro donde Darwin tropezó con la frase «la lucha por la existencia», que sus teorías convirtieron en famosa más tarde. Recordando los pinzones, Darwin comprendió de pronto que la lucha por los alimentos podía actuar como un mecanismo que favorecía a los individuos más eficientes. Cuando

los pinzones que habían colonizado las Galápagos se hubieran multiplicado hasta el punto de sobrepasar la provisión de semillas, únicamente los pájaros más fuertes, o aquellos particularmente adaptados para conseguir semillas, o también los que habían sido capaces de obtener nuevas formas de alimentos, pudieron sobrevivir. Un pájaro que casualmente estuviera dotado de pequeñas variaciones de las características del pinzón, variaciones que le permitieran comer semillas más grandes o más duras, o, mejor aún, insectos, dispondría de un medio de subsistencia ilimitado. Un pájaro con un pico ligeramente más delgado o más largo podría conseguir alimentos que no estaban al alcance de los demás, o uno que tuviera un pico anormalmente grande podría disponer de alimentos insólitos. Tales pájaros, y sus descendientes, se multiplicarían a expensas de la variedad original de pinzones. Cada uno de los tipos adaptados hallaría y ocuparía un nuevo hábitat, no ocupado, en el medio ambiente. En las islas Galápagos, virtualmente libres de vida ornitológica al comienzo, estaban disponibles toda clase de habitáculos y no existían competidores que estorbaran el camino. En el continente sudamericano, con todos los lugares ocupados, el pinzón antepasado sólo habría podido dedicarse a mantener su estatus. No daría lugar a nuevas especies.

Darwin sugirió que cada generación de animales estaba constituida por una serie de individuos que variaban, en ocasiones, del promedio. Algunos podrían ser ligeramente mayores; otros poseerían órganos de un tamaño ligeramente alterado; algunas de estas modificaciones representarían sólo una proporción sin importancia por encima o por debajo de la normalidad. Las diferencias podían ser efectivamente mínimas, pero aquellos cuyas estructuras estaban ligeramente mejor adaptadas al medio ambiente tenderían a vivir un poco más de tiempo y a tener una mayor descendencia. Eventualmente, a una acumulación de características favorables podría añadirse una incapacidad para aparearse con el tipo original, o con otras variedades de éste, y así nacería una nueva especie.

Darwin denominó a este proceso «selección natural».

Según su teoría, la jirafa había conseguido su largo cuello, no por un proceso de alargamiento, sino debido a que algunas jirafas habían nacido con cuellos más largos que sus compañeras, y, cuanto más largo fuera el cuello, mayor era la posibilidad del animal para conseguir alimento.

Por selección natural, las especies con cuello largo habrían triunfado. La selección natural explicaba también la piel manchada de la jirafa de un modo bastante sencillo: un animal con manchas en su piel podría disimularse mejor contra la vegetación multicolor, y de este modo tendría más posibilidades de escapar a la atención del león al acecho.

La teoría de Darwin acerca del modo como las especies se habían formado explicó también por qué a menudo resultaba tan difícil establecer unas distinciones claras entre las especies o entre los géneros. La evolución de las especies es un proceso continuo y, por supuesto, necesita un período de tiempo muy prolongado. Por fuerza, deben existir algunas especies en las que algunos miembros están, incluso en la actualidad, derivando lentamente en especies separadas.

Darwin empleó muchos años en recoger las pruebas y elaborar su teoría. Se percató de que ésta haría temblar las bases de la biología y del pensamiento humano acerca del lugar que el hombre ocupaba en el esquema de los seres, y esperó a estar seguro de su fundamento en todos los aspectos posibles. Darwin empezó a recoger notas sobre el tema y a meditar sobre él en 1834, incluso antes de leer a Malthus, y, en 1858, estaba todavía trabajando en un libro que trataba sobre el tema. Sus amigos (incluyendo a Lyell, el geólogo) conocían lo que estaba elaborando; varios habían leído ya sus notas preliminares. Le urgían a apresurarse, por temor a que alguien se le anticipara. Pero Darwin no se apresuró (o no pudo), y sucedió lo que temían.

El hombre que se le anticipó fue Alfred Russel Wallace, catorce años más joven que Darwin. La vida de Wallace discursó de modo muy parecido a la de Darwin. En su juventud formó parte también de una expedición científica alrededor del mundo. En las Indias Orientales, observó que las plantas y los animales de las islas situados más al Este eran completamente distintos de los de las islas occidentales. Podía establecerse una línea divisoria entre los dos tipos de formas vivientes; esta línea discurría entre Borneo y las Célebes, por ejemplo, y entre las pequeñas islas de Bali y Lombok, más allá, hacia el Sur. La línea se conoce todavía con el nombre de «línea de Wallace».

(Posteriormente, Wallace llegó a dividir la Tierra en seis grandes regiones, caracterizadas por distintas variedades de animales, una división que, con pequeñas

modificaciones, es todavía considerada válida.) Ahora bien, los mamíferos de las islas más orientales y de Australia eran claramente más primitivos que los de las islas occidentales y Asia, y, en realidad, que los del resto del mundo. Parecía como si Australia y las islas orientales se hubieran separado de Asia en alguna época remota de la Historia, cuando sólo existían mamíferos primitivos, y que los mamíferos placentarios únicamente se hubieran desarrollado más tarde en Asia. Nueva Zelanda debía de haber quedado aislada incluso durante más tiempo, ya que carecía en absoluto de mamíferos y estaba habitada por pájaros primitivos sin alas, de los cuales el superviviente más conocido hoy día es el kiwi.

Pero, ¿cómo habían surgido en Asia los mamíferos más evolucionados? Wallace comenzó a intentar descifrarlo en 1855, y en 1858, también él, leyó el libro de Malthus, y a partir de él dedujo, asimismo, idénticas conclusiones a que había llegado Darwin. Pero Wallace no empleó veinticuatro años en escribir sus conclusiones. Una vez la idea estuvo clara en su mente, se sentó y escribió un artículo sobre el tema en un par de días. Wallace decidió enviar sus manuscritos a algún competente biólogo reconocido, para su crítica y revisión, y eligió a Charles Darwin.

Cuando Darwin recibió el manuscrito, quedó atónito. Expresaba sus propias ideas casi en sus mismos términos. Inmediatamente remitió el artículo de Wallace a otros científicos importantes y se ofreció a colaborar con Wallace en los posibles informes, reuniendo sus conclusiones. Las comunicaciones de ambos aparecieron en el *Diario de la Sociedad Lineana*, en 1858.

Al año siguiente, el libro de Darwin se publicó finalmente. Su título completo es *Sobre el Origen de las Especies por Medio de la Selección Natural, o la Supervivencia de las Razas Favorecidas en la Lucha por la Vida*. Nosotros lo conocemos simplemente como *El Origen de las Especies*.

La teoría de la evolución ha sido modificada y perfeccionada desde la época de Darwin, gracias al conocimiento del mecanismo de la herencia, de los genes y de las mutaciones (véase capítulo XII). No fue hasta 1930, realmente, cuando el estadístico y geneticista inglés Ronald Aylmer Fisher tuvo éxito en la demostración de que los genes mendelianos proporcionaban el mecanismo necesario para la evolución basada en la selección natural. Solamente entonces consiguió la teoría de

la evolución su forma moderna. No obstante, la concepción básica de Darwin sobre la evolución por medio de la selección natural ha permanecido firme, y realmente la idea evolutiva se ha extendido a todos los campos de la ciencia, tanto física como biológica y social.

Naturalmente, la publicación de la teoría darwiniana, desencadenó una tormenta. Al principio, un cierto número de científicos se mostró contrario a la idea. El más importante de ellos fue el zoólogo inglés Richard Owen, quien representaba el papel de sucesor de Cuvier como experto en fósiles y su clasificación. Owen descendió a niveles más bien indignos en su lucha contra el darwinismo. No solamente empujaba a los demás a la contienda, mientras él permanecía en la oscuridad, sino que incluso escribió de forma anónima en contra de la teoría, citándose a sí mismo como una autoridad en la materia. El naturalista inglés Philip Henry Gosse intentó soslayar el dilema, sugiriendo que la Tierra había sido creada por Dios completa, incluyendo los fósiles, para probar la fe del hombre. Para la mayoría de la gente, no obstante, la sugerencia de que Dios podía jugar estratagemas infantiles a la Humanidad parecía tener un cariz más blasfemo que cualquier cosa que Darwin hubiera afirmado.

Los contraataques decrecieron, la oposición dentro del mundo científico disminuyó gradualmente, y, dentro de la misma generación, casi desapareció. Sin embargo, los adversarios ajenos a la ciencia lucharon durante mucho más tiempo y con mayor denuedo. Los fundamentalistas (intérpretes literales de la Biblia) se sintieron ultrajados por la implicación de que el hombre podía ser un simple descendiente de un antepasado simiesco. Benjamin Disraeli (más tarde Primer Ministro de Gran Bretaña) creó una frase inmortal señalando con acidez: «La pregunta planteada hoy día a la sociedad es ésta: ¿es el hombre un mono o un angel? Yo me pongo de parte de los ángeles». Los eclesiásticos, uniéndose para la defensa de los ángeles, se encargaron del ataque contra Darwin.

El propio Darwin no estaba preparado, por temperamento, para entrar violentamente en la controversia, pero tenía un bien dotado campeón en el eminente biólogo Thomas Henry Huxley. Como el «bulldog de Darwin», Huxley combatió incansablemente en las salas de conferencia de Inglaterra. Consiguió su más notable victoria, casi al comienzo de su lucha, en el famoso debate con Samuel

Wilberforce, obispo de la iglesia anglicana, un matemático y un orador tan instruido y locuaz, que era conocido familiarmente con el nombre de *Sam el adulador*.

El obispo Wilberforce, después de haber conquistado aparentemente al auditorio, se volvió al fin a su solemne y serio adversario. Como el informe que había dado lugar al debate se refería a él, Wilberforce «solicitaba saber si era a través de su abuelo o de su abuela como (Huxley) pretendía descender de un mono».

Mientras el auditorio estallaba en carcajadas, Huxley se levantó lentamente y contestó: «Si, por tanto, se me hace la pregunta de si desearía tener más bien a un miserable como abuelo que a un hombre generosamente dotado por la Naturaleza y poseedor de grandes medios de influencia, y que sin embargo, emplea estas facultades e influencias con el mero fin de introducir el ridículo en una grave discusión científica, indudablemente afirmo mi preferencia por el mono.» La contestación de Huxley aparentemente no sólo replicó al abrumado Wilberforce, sino que también puso a los fundamentalistas a la defensiva. En realidad, resultaba tan evidente la victoria de la teoría darwiniana que, cuando Darwin murió, en 1882, fue enterrado, con general veneración, en la abadía de Westminster, donde reposan los grandes de Inglaterra. Además, la ciudad de Darwin, en el norte de Australia, fue llamada así en su honor. Otro importante defensor de las ideas evolucionistas fue el filósofo inglés Herbert Spencer, quien popularizó la expresión «la supervivencia del más apto» y también la palabra «evolución», término que el propio Darwin raramente utilizaba. Spencer intentó aplicar la teoría de la evolución al desarrollo de las sociedades humanas (se le considera como el fundador de la ciencia de la sociología). Sus argumentos, contrariamente a su intención, fueron mal utilizados con posterioridad para apoyar la guerra y el racismo.

La última batalla abierta contra la evolución tuvo lugar en 1925. Finalizó con la victoria de los antievolucionistas, pero con la pérdida de la guerra.

La legislatura de Tennessee había dictado una ley prohibiendo a los maestros de las escuelas estatales subvencionadas públicamente enseñar que el hombre había evolucionado a partir de las formas más bajas de vida. Para probar la inconstitucionalidad de la ley, algunos científicos y educadores persuadieron a un joven profesor de biología de una escuela de enseñanza media, John T. Scopes, dar su clase sobre el darvinismo. Scopes fue inmediatamente acusado de violar la ley y

llevado a juicio en Dayton, Tennessee, el lugar donde enseñaba. El mundo entero prestó suma atención a este juicio. La población local y el juez estaban firmemente de parte de la antievolución. Wilham Jennings Bryali, el famoso orador, tres veces candidato fracasado para la presidencia, y destacado fundamentalista, actuaba como uno de los fiscales acusadores. Scopes tenía como defensores al notable criminalista Clarence Darrow y a otros abogados asociados.

El juicio fue, en su mayor parte, decepcionante, ya que el juez negaba el permiso para que la defensa llamara a los científicos al estrado con objeto de testificar sobre las pruebas de la teoría darwiniana, y restringía el testimonio únicamente a la cuestión de si Scopes había o no enseñado esta teoría. Pero el asunto, no obstante, se planteó por fin en la sala, cuando Bryan, venciendo las protestas de sus compañeros acusadores, se sometió voluntariamente a un careo sobre la posición fundamentalista. Darrow demostró prontamente que Bryan estaba «in albis» acerca de los desarrollos modernos en la ciencia y que tenía únicamente un conocimiento estereotipado, de escuela dominical, sobre la religión y la Biblia.

Scopes fue hallado culpable y condenado a pagar 100 dólares. (Posteriormente la sentencia fue revocada por razones técnicas por el Tribunal Supremo de Tennessee.) Pero la posición fundamentalista (y el Estado de Tennessee) había aparecido con un aspecto tan ridículo a los ojos del mundo culto que los antievolucionistas no han presentado ninguna polémica seria desde entonces -al menos no lo han hecho a la clara luz del día-.

En realidad, si se precisaba alguna confirmación del darwinismo, podía acudirse a los ejemplos de selección natural que habían tenido lugar ante los mismos ojos de la Humanidad (ahora que la Humanidad sabe qué es lo que tiene que observar). Un ejemplo notable tuvo lugar en la tierra nativa de Darwin.

En Inglaterra, según parece, la polilla manchada existe en forma de dos variedades: una clara y otra oscura. En tiempos de Darwin, la variedad blanca era la que predominaba debido a que destacaba menos con la luz en la corteza de los árboles cubiertos de liquen que frecuentaba. Su «coloración protectora» la salvaba, con mayor frecuencia que a la variedad oscura claramente visible, de todos aquellos animales que se alimentaban de ella. Sin embargo, en la Inglaterra moderna, industrializada, el hollín ha ocultado la capa de liquen y ha oscurecido la corteza del

árbol. En la actualidad, es la variedad oscura la que resulta menos visible contra la corteza y, por tanto, queda más protegida. Así pues, la variedad oscura es la que predomina hoy día -gracias a la acción de la selección natural.

El estudio de los fósiles ha permitido a los paleontólogos dividir la historia de la Tierra en una serie de «eras». Éstas fueron bosquejadas y bautizadas por diversos geólogos británicos del siglo XIX, incluyendo al propio Lyell, a Adam Sedgwick, y a Roderick Impey Murchison.

Las eras comienzan hace unos 500 ó 600 millones de años, con los primeros fósiles (cuando ya todos los tipos, excepto los cordados, estaban establecidos). Naturalmente, los primeros fósiles no representan la primera vida en la Tierra. En la mayor parte de los casos, son únicamente las partes duras de los seres las que se fosilizan, de forma que un registro fósil concreto consta sólo de aquellos animales que poseyeron conchas o huesos. Incluso las más simples y antiguas de tales especies estaban ya considerablemente desarrolladas y debía tener un largo respaldo evolutivo. Prueba de ello es que, en 1965, se descubrieron restos fosilizados de pequeñas criaturas semejantes a las almejas cuya antigüedad parecía rondar los setecientos veinte millones de años.

Hoy día, los paleontólogos pueden hacerlo mucho mejor. Es lógico pensar que la vida unicelular, sumamente elemental, se remonte a fechas mucho más distantes que cualquier cosa con un caparazón; y por cierto se han descubierto sobre algunas rocas diversas algas verdiazules y bacterias cuya antigüedad se cifra en miles de millones de años por lo menos. Allá por 1965, el paleontólogo americano Elso Sterrenberg Barghoorn descubrió en unas rocas diminutos objetos bacteriformes («microfósiles») cuya antigüedad rebasa los tres mil millones de años. Son tan minúsculos que el examen de su estructura requiere el microscopio electrónico.

Podría parecer, pues, que la evolución química moviéndose hacia el origen de la vida, se inició casi tan pronto como la Tierra adquirió su forma actual, es decir, hace cuatro mil seiscientos millones de años. Transcurridos mil quinientos millones de años, la evolución química había alcanzado ya una fase donde se formaban sistemas suficientemente complicados para recibir el calificativo de vivientes. Es posible que las algas verdiazules existieran hace dos mil quinientos millones de años, y entonces el proceso de fotosíntesis suscitaría la lenta transición desde una

atmósfera de nitrógeno-anhídrido carbónico, a otra de nitrógeno-oxígeno. Mil millones de años atrás aproximadamente, la vida unicelular de los mares debe haber sido muy diferente, incluyendo los protozoos que sin duda habrán tenido las formas más complicadas de vida entre las existentes entonces... ¡los monarcas del mundo!

Durante los dos mil millones de años transcurridos desde la llegada al mundo de las algas verdiazules, el contenido de oxígeno debe haberse incrementado, aunque muy lentamente. Cuando empezó a desarrollarse la historia terrestre en los dos últimos miles de millones de años, la concentración de oxígeno debe haber representado el 1 ó 2 % de la atmósfera. Lo suficiente para crear un rico manantial de energía destinada a las células animales, algo jamás existente en épocas anteriores. El cambio evolutivo se orientó hacia una complejidad creciente, y, por tanto, cabe suponer que hace seiscientos millones de años pudo comenzar la abundante fosilización de organismos complejos. Las rocas más primitivas con fósiles complejos pertenecen, según se ha dicho, al período Cámbrico, y hasta fechas muy recientes se desestimó la historia completa de nuestro planeta que le precedió en sus cuatro mil millones de años, dándosele el título menoscipativo de «período Precámbrico». Ahora, una vez descubiertos los rastros inconfundibles de vida, se emplea el nombre más apropiado de «eón criptozoico» (expresión griega que significa «vida oculta»), mientras que los últimos millones de años constituyen el «eón-fanerozoico» («vida visible»).

El «eón criptozoico» se divide incluso en dos secciones: la primera, «era arqueozoica» («vida antigua»), contiene las primeras huellas de vida unicelular; la segunda se denomina «era proterozoica» («vida anterior»).

La divisoria entre los eones «criptozoico» y «fanerozoico», es sumamente tajante. En un instante del tiempo, por así decirlo, no hay ni un solo fósil más allá del nivel microscópico, y al momento siguiente surgen organismos complejos con una docena de tipos básicos bien diferenciados. Se ha llamado «disconformidad» a esa división rotunda, y la disconformidad conduce invariablemente a especulaciones sobre posibles catástrofes. Se diría que la aparición de fósiles debería haber sido más gradual; puede haber ocurrido que algunos acontecimientos geológicos de extrema rigurosidad barrieran los primeros antecedentes.

En 1967, Walter S. Olson formuló una sugerencia muy interesante, aunque considerablemente especulativa. Este científico opinó que hace mil millones de años, o quizás algo menos, la Tierra capturó a nuestra Luna y que con anterioridad a ello no tenía satélite alguno. (Los astrónomos consideran seriamente tal posibilidad como un medio para explicar ciertas anomalías del sistema Tierra-Luna.) Cuando sucedió dicha captura, la Luna estaba bastante más próxima que ahora. Las enormes mareas desatadas súbitamente quebrantaría los estratos rocosos superficiales de la Tierra y borrarían, por así decirlo, los antecedentes de fósiles; éstos no reaparecieron (y entonces aparentemente bien desarrollados) hasta que las poderosas mareas se replegaron hacia los puntos donde la superficie rocosa había quedado relativamente incólume.

Las amplias divisiones del fanerozoico son el Paleozoico («vida antigua» en griego), el Mesozoico («vida media») y el Cenozoico («nueva vida»). Según los modernos métodos utilizados para establecer la cronología geológica, el Paleozoico abarcó un período de quizá trescientos cincuenta millones de años, el Mesozoico ciento cincuenta millones, y el Cenozoico, los últimos cincuenta millones de años de la historia de la Tierra.

Cada era se subdivide a su vez en períodos. El Paleozoico empieza con el período Cámbrico (llamado así por un lugar en Gales -en realidad, por el nombre de una antigua tribu que lo habitaba-, donde estos estratos fueron descubiertos por vez primera). Durante el período Cámbrico, los mariscos fueron las formas de vida más evolucionadas. Ésta fue la era de los «trilobites», los artrópodos primitivos de los que el moderno límulo es el pariente viviente más próximo. El límulo, debido a que ha sobrevivido con pocos cambios evolutivos a través de largas edades, es un ejemplo de lo que en ocasiones se llama, más bien dramáticamente, un «fósil vivo». Debido a que el Cámbrico es el primero de los períodos ricos en fósiles, los dilatados eones que le precedieron, con las rocas realmente tan primitivas que ofrecen pocos o ningún registro fósil, son generalmente denominados el «Precámbrico.» El siguiente período es el Ordovicense (denominado así también por otra tribu galesa). Éste fue el período, hace de unos cuatrocientos a quinientos millones de años, en el que los cordados hicieron su aparición en la forma de los «graptolites», pequeños animales que vivían en colonias y que hoy día están

extinguidos. Posiblemente están relacionados con los «balonoglosos», que, al igual que los graptolites, pertenecen a los «hemicordados», el más primitivo subtipo del tipo cordados.

Luego vino el Silúrico (llamado así también a causa de otra tribu de Gales) y el Devónico (a partir de Devonshire). El período Devónico, hace de unos trescientos a cuatrocientos millones de años, fue testigo del acceso de los peces a la supremacía del océano, una posición que se mantiene todavía hoy. No obstante, en este período tuvo lugar también la colonización de la tierra firme por las formas vivientes. Es duro comprobar, pero es cierto que, durante quizás las tres cuartas partes o más de nuestra historia la vida quedó limitada tan sólo a las aguas y la tierra permaneció muerta y estéril. Considerando las dificultades representadas por la carencia de agua, por las variaciones extremas de la temperatura y por la fuerza integral de la gravedad, no mitigada por la flotabilidad del agua, debe comprenderse que la propagación a la tierra de las formas vivas que estaban adaptadas a las condiciones del océano representó la mayor victoria singular conseguida por la vida sobre el mundo inanimado.

La emigración hacia la tierra probablemente empezó cuando la lucha por los alimentos en el océano superpoblado empujó a algunos organismos hacia las aguas poco profundas de la marea, hasta entonces desocupada debido a que el suelo quedaba expuesto al aire durante horas, en el momento de la marea baja. A medida que más y más especies se fueron apiñando en las playas, sólo podía conseguirse algún alivio en la contienda desplazándose cada vez más hacia la tierra, hasta que al fin algunos organismos mutantes fueron capaces de establecerse en la tierra seca.

Las primeras formas vivas en conseguir esta transición fueron las plantas. Esto tuvo lugar aproximadamente hace unos cuatrocientos millones de años. De entre ellas, las pioneras pertenecían al grupo vegetal actualmente extinguido llamado «psilotales» -las primeras plantas multicelulares-. (El nombre procede de la palabra griega para significar «desnudo», porque los tallos estaban desnudos de hojas, signo éste de la primitiva naturaleza de dichas plantas.) Con el tiempo, fueron desarrollándose plantas más complejas y, hace trescientos cincuenta millones de años, la tierra se cubrió finalmente de bosques. Una vez la vida vegetal

hubo empezado a crecer sobre la tierra firme, la vida animal pudo a continuación efectuar su propia adaptación. En unos pocos millones de años, la tierra firme fue ocupada por los artrópodos, ya que los animales de gran tamaño, carentes de un esqueleto interno, habrían sido aplastados por la fuerza de la gravedad. En el océano, por supuesto, la flotabilidad anulaba en gran parte a la gravedad, por lo que ésta no representaba un factor negativo. (Incluso hoy día los mayores animales viven en el mar.) Las primeras criaturas terrestres en conseguir una gran movilidad fueron los insectos; gracias al desarrollo de sus alas, fueron capaces de contrarrestar la fuerza de la gravedad. Que obligaba a los otros animales a arrastrarse lentamente. Por último, cien millones de años después de la primera invasión de la tierra firme, tuvo lugar una nueva invasión de seres vivientes que podían permitirse el lujo de ser voluminosos a pesar de la existencia de la gravedad, porque poseían un esqueleto óseo en su interior. Los nuevos colonizadores procedentes del mar eran peces óseos que pertenecían a la subclase Crosopterigios («aletas pedunculadas»). Algunos de sus compañeros habían emigrado a las profundidades marinas no pobladas; entre ellos estaba el celacanto, el cual los biólogos hallaron en 1939, con gran sorpresa.

La invasión de la tierra firme por los peces comenzó como resultado de la pugna para arrebatar el oxígeno en las extensiones de agua salobre. Entonces la atmósfera contenía oxígeno respirable en cantidades ilimitadas, y, por consiguiente, los peces mejor dotados para sobrevivir eran aquellos capaces de aspirar grandes bocanadas de aire cuando el agua contenía un porcentaje de oxígeno inferior al punto de supervivencia. Los dispositivos orgánicos para almacenar esas bocanadas tenían un valor incalculable, y el pez desarrolló unas bolsas en las vías alimentarias donde podía conservar el aire aspirado. Las bolsas de algunos individuos evolucionaron hasta formar sencillos pulmones. Entre los descendientes de ese pez primitivo figura el «pez pulmón», algunas de cuyas especies existen todavía en África y Australia. Estos animales viven en aguas estancadas donde se asfixiaría cualquier pez ordinario, e incluso sobreviven a las sequías estivales cuando su hábitat se deseca. Hasta los peces cuyo elemento natural es el agua marina, donde el oxígeno no plantea problema alguno, evidencian todavía los rasgos heredados de aquellas

criaturas primigenias provistas de pulmones, pues aún poseen bolsas llenas de aire, si bien éstas son simples flotadores y no órganos respiratorios.

Sin embargo, algunos peces poseedores de pulmones llevaron el asunto hasta su lógica culminación y empezaron a vivir totalmente fuera del agua durante períodos más o menos largos. Las especies crossopterigias, provistas de poderosas aletas, pudieron hacerlo con éxito, pues al faltarles la flotabilidad tuvieron que recurrir a sus propios medios para contrarrestar la fuerza de gravedad.

Hacia finales del Devónico, algunos de los primitivos crossopterigios pulmonados se encontraron a sí mismos en tierra firme, sosteniéndose de forma insegura sobre cuatro patas rudimentarias.

Tras el Devónico vino el Carbonífero («formación de carbón»), llamado así por Lyell debido a que éste fue el período de los enormes bosques pantanosos que, hace unos trescientos millones de años, representaron lo que quizás haya sido la vegetación más luxuriante de la historia de la Tierra; con el tiempo, estos bosques inmensos fueron sepultados y dieron lugar a los casi interminables yacimientos carboníferos del planeta. Éste fue el período de los anfibios; los crossopterigios, para entonces, estaban consumiendo sus completas vidas adultas sobre la tierra. A continuación vino el período Pérmico (llamado así por una región en los Urales, para estudiar la cual Murchison hizo un largo viaje desde Inglaterra). Los primeros reptiles hicieron su aparición en ese momento. Estos animales se extendieron en el Mesozoico, que se inició a continuación, y llegaron a dominar la Tierra tan por completo que este período se ha conocido con el nombre de la era de los reptiles. El Mesozoico se divide en tres períodos: el Triásico (porque fue hallado en tres estratos), el Jurásico (a partir de los montes del Jura, en Francia), y el Cretáceo («formador de creta»). En el Triásico aparecieron los dinosaurios («lagartos terribles», en griego). Éstos alcanzaron su supremacía en el Cretáceo, cuando reinaba sobre la Tierra el *Tyrannosaurus rex*, el mayor animal carnívoro terrestre de la historia de nuestro planeta.

Fue durante el Jurásico cuando se desarrollaron los primeros mamíferos y pájaros, ambos a partir de un grupo separado de reptiles. Durante millones de años; estas especies permanecieron en la oscuridad. Sin embargo, a finales del Cretáceo, los gigantescos reptiles empezaron a desaparecer (debido a alguna razón desconocida,

por lo que la causa de «el gran exterminio» sigue siendo uno de los problemas más atormentadores en Paleontología), y los mamíferos y los pájaros ocuparon su lugar. El Cenozoico, que siguió a continuación, se convirtió en la era de los mamíferos; dio lugar a los mamíferos placentarios y al mundo que conocemos.

La unidad de la vida actual se demuestra, en parte, por el hecho de que todos los organismos están compuestos de proteínas creadas a partir de los mismos aminoácidos.

Igualmente, la misma clase de evidencia ha establecido recientemente nuestra unidad con el pasado. La nueva ciencia de la «Paleobioquímica» (la Bioquímica de las formas de vida antiguas) se inició a finales de la década de 1950, al demostrarse que algunos fósiles, de 300 millones de años de antigüedad, contenían restos de proteínas compuestas precisamente de los mismos aminoácidos que constituyen las proteínas hoy día: glicina, alanina, valina, leucina, ácido glutámico y ácido aspártico. Ninguno de los antiguos aminoácidos se diferenciaba de los actuales. Además, se localizaron restos de hidratos de carbono, celulosa, grasas y porfirinas, sin (nuevamente) nada que pudiera ser desconocido o improbable en la actualidad. A partir de nuestro conocimiento de bioquímica podemos deducir algunos de los cambios bioquímicos que han desempeñado un papel en la evolución de los animales.

Consideremos la excreción de los productos de desecho nitrogenados. En apariencia, el modo más simple de librarse del nitrógeno es excretarlo en forma de una pequeña molécula de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), la cual puede fácilmente pasar a través de las membranas de la célula a la sangre. Da la casualidad que el amoníaco es sumamente tóxico. Si su concentración en la sangre excede de la proporción de una parte en un millón, el organismo perecerá. Para un animal marino, esto no representa un gran problema; puede descargar el amoníaco en el océano, continuamente, a través de sus agallas. Sin embargo, para un animal terrestre, la excreción de amoníaco es imposible. Para descargar el amoníaco con tanta rapidez como éste se forma, se precisaría una excreción de orina de tal magnitud que el animal quedaría pronto deshidratado y moriría. Por tanto, un organismo terrestre debe liberar sus productos de desecho nitrogenados en una forma menos tóxica que el amoníaco. La solución viene representada por la urea. Esta sustancia puede ser

transportada en la sangre a concentraciones superiores al uno por mil, sin representar un serio peligro.

Ahora bien, el pez elimina los desechos nitrogenados en forma de amoníaco, y así lo hace también el renacuajo. Pero, cuando el renacuajo madura y se convierte en una rana, empieza a eliminarlos en forma de urea. Este cambio en la química del organismo es, en cada momento, tan crucial para la evolución desde la vida acuática a la vida terrestre, como lo son los cambios visibles de agallas a pulmones. Este cambio bioquímico debió de haber tenido lugar cuando, los crossoptérigios invadieron la tierra firme y se convirtieron en anfibios. Por este motivo, existen bases suficientes para creer que la evolución bioquímica tuvo un papel tan importante en el desarrollo de los organismos como la evolución «morfológica» (es decir los cambios en la forma y la estructura).

Otro cambio bioquímico fue necesario antes de que pudiera darse el gran paso de los anfibios a los reptiles. Si el embrión de un huevo de reptil excretara urea, ésta llegaría a elevarse hasta concentraciones tóxicas, en la limitada cantidad de agua existente en el huevo. El cambio que se cuidó de resolver este problema fue la formación de ácido úrico en lugar de urea. El ácido úrico (una molécula purínica que se parece a la de la adenina y la guanina, que existen en los ácidos nucleicos) es insoluble en el agua; por tanto, precipita en forma de pequeños gránulos y de este modo no puede penetrar en las células. Este cambio desde la excreción de urea a la de ácido úrico fue tan fundamental en el desarrollo de los reptiles como, por ejemplo, la evolución del corazón de tres cavidades al de cuatro cavidades.

En su vida adulta, los reptiles continúan eliminando los productos de desecho nitrogenados en forma de ácido úrico. No tienen orina en forma líquida. En lugar de ello, el ácido úrico se elimina como una masa semisólida a través de la misma abertura en el cuerpo que le sirve para la eliminación de las heces. Este orificio corporal recibe el nombre de «cloaca» (de la palabra latina para este término).

Los pájaros y los mamíferos ponedores de huevos, que depositan huevos del mismo tipo de los reptiles, mantienen el mecanismo del ácido úrico y la cloaca. De hecho, los mamíferos que ponen huevos se llaman a menudo «monotremas» (de las palabras griegas que significan «un agujero»).

Por otra parte, los mamíferos placentarios pueden expulsar fácilmente los productos de desecho nitrogenados del embrión, ya que éste se halla conectado indirectamente con el sistema circulatorio de la madre. Los embriones de los mamíferos, por tanto, no tienen problemas con la urea. Ésta es transferida al flujo sanguíneo materno y liberada más tarde a través de los riñones de la madre. Un mamífero adulto tiene que excretar cantidades sustanciales de orina para desembarazarse de su urea. Esto exige la presencia de dos orificios separados: un ano para eliminar los residuos sólidos indigeribles de los alimentos y un orificio uretral para la orina líquida.

Los sistemas explicados de la eliminación de nitrógeno demuestran que, aunque la vida es básicamente una unidad, existen también pequeñas variaciones sistemáticas de una especie a otra. Además, estas variaciones parecen ser mayores a medida que la distancia evolutiva entre las especies es mayor.

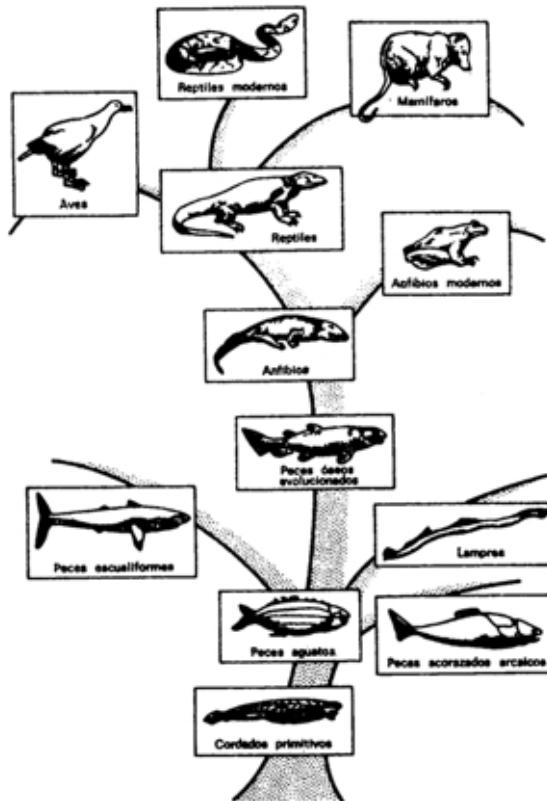
Consideremos, por ejemplo, aquellos anticuerpos que pueden crearse en la sangre animal en respuesta a una proteína o proteínas extrañas, como, por ejemplo, las existentes en la sangre humana. Estos «antisueros», si son aislados, reaccionarán poderosamente en la sangre humana, coagulándola, pero no reaccionarán de este modo con la sangre de otras especies. (Ésta es la base de las pruebas que indican que las manchas de sangre tienen un posible origen humano, lo que en ocasiones da un tono dramático a las investigaciones criminales.) De forma interesante, los antisueros que reaccionan con la sangre humana ofrecen una respuesta débil con la sangre del chimpancé, en tanto que los antisueros que reaccionan intensamente con la sangre de un pollo lo hacen de modo débil con la sangre de un pato, y así sucesivamente. Por tanto, la especificidad de los anticuerpos puede ser utilizada para indicar las estrechas relaciones entre los seres vivientes.

Estas pruebas indican, como era de esperar, la existencia de pequeñas diferencias en la compleja molécula de proteína; diferencias que son tan pequeñas en las especies muy afines que impiden la producción de algunas reacciones antiséricas.

Cuando los bioquímicos consiguieron desarrollar técnicas para la determinación de la estructura exacta de los aminoácidos en las proteínas, en la década de 1950, este método de clasificar las especies según su estructura proteínica fue considerablemente perfeccionado.

En 1965 se dio cuenta de estudios más minuciosos todavía sobre las moléculas hemoglobínicas de diversos primates, incluido el hombre. Una de las dos cadenas de péptidos en la hemoglobina, la llamada «cadena alfa», variaba poco de un primate a otro. La otra, la «cadena beta», señalaba importantes variaciones.

Entre un primate determinado y el hombre había sólo seis puntos diferentes respecto a los aminoácidos y la cadena alfa, pero veintitrés por cuanto se refiere a las cadenas beta. Considerando las diferencias halladas en las moléculas hemoglobínicas, se pensó que el hombre había empezado a divergir de los demás simios hace setenta y cinco millones de años, más o menos el período de las primeras divergencias entre los caballos y los asnos ancestrales.



*Árbol filogenético, mostrando las líneas evolutivas de los vertebrados.*

Todavía se observan distinciones más acentuadas cuando se comparan las moléculas del «citocromo C», una molécula proteínica que contiene hierro, compuesta por 105 aminoácidos y hallada en las células de toda especie consumidora de oxígeno -vegetal, animal o bacteria indistintamente-. Analizando las

moléculas de citocromo C de diversas especies, se descubrió que la diferencia entre las moléculas del hombre y las del mono Rhesus estribaba solamente en un aminoácido a lo largo de toda la cadena. Entre el citocromo C del hombre y el del canguro había diez diferencias de aminoácidos; entre el del hombre y el del atún, veintiuna; entre el del hombre y una célula de fermento, cuarenta diferencias aproximadamente.

Con ayuda de computadoras, los bioquímicos realizaron análisis exhaustivos y llegaron a la conclusión de que el cambio en un aminoácido residual requería como promedio unos siete millones de años para consolidarse, y que se podía calcular aproximadamente las fechas de remoto pretérito en que un organismo concreto divergía de otro. Sería hace dos mil quinientos millones de años, a juzgar por el análisis del citocromo C, cuando los organismos superiores divergieron de la bacteria (es decir, en aquellas lejanas fechas vivía todavía una criatura a la cual podemos conceptuar como un antepasado común). Igualmente, las plantas y los animales tuvieron un antepasado común hace mil quinientos millones de años, y los vertebrados e insectos lo tuvieron hace mil millones de años.

Si las mutaciones de la cadena de ADN conducentes a cambios en el esquema de «aminoácidos» quedaran determinadas únicamente por los factores accidentales, cabría suponer que el ritmo de la evolución se atendría aproximadamente a una constante. Sin embargo, la evolución parece progresar con mayor rapidez en ciertas ocasiones..., y entonces se produce un súbito florecimiento de nuevas especies o una avalancha no menos súbita de muertes entre las más antiguas. Para ejemplificar este caso citemos las postrimerías del Cretáceo, cuando los dinosaurios, que vivían entonces juntamente con otros grupos de organismos, se extinguieron por completo en un período relativamente corto, mientras otros organismos proseguían viviendo sin sufrir perturbaciones. Posiblemente, el ritmo de las mutaciones es más vivo en ciertas épocas de la historia terrestre que en otras, y esas mutaciones más frecuentes promueven un número extraordinario de nuevas especies o anulan un número igualmente excepcional de las antiguas. (También pudiera ocurrir que las nuevas especies fueran más eficientes que las antiguas y compitieran con ellas hasta ocasionarles la muerte.) Un factor ambiental que estimula la producción de mutaciones es la radiación energética, e indudablemente

la Tierra sufre un constante bombardeo de radiación energética procedente de todas direcciones y en todo tiempo. La atmósfera absorbe una gran parte de esa energía, pero ni la atmósfera siquiera es capaz de rechazar la radiación cósmica. Aquí cabe preguntarse si la radiación cósmica no será mayor en algún período determinado que en otros.

Se puede dar por supuesta una diferencia en cada uno de dos caminos distintos. El campo magnético terrestre desvía en cierta medida la radiación cósmica. Ahora bien, ese campo magnético tiene una intensidad variable y durante ciertos períodos, a intervalos cambiantes, desciende hasta la intensidad cero. En 1966, Bruce Heezen adujo que, cuando el campo magnético atraviesa una época de intensidad cero durante su proceso de inversión, dichos períodos pueden representar el momento en que una cantidad insólita de radiación cósmica alcance la superficie terrestre y acelere súbitamente el ritmo de la mutación. Este pensamiento resulta inquietante si se considera el hecho de que la Tierra parece encaminarse hacia un período similar de intensidad cero.

Por otra parte, podríamos hacernos también algunas preguntas sobre esas supernovas presentes en la vecindad de la Tierra... es decir, lo bastante próximas al Sistema Solar para incrementar perceptiblemente el bombardeo de la superficie terrestre por los rayos cósmicos. Dos astrónomos americanos, K. D. Terry y Wallace H. Tucker, han formulado ciertas especulaciones sobre dicha posibilidad. Ellos se preguntan si no podría haber tenido lugar una combinación de ambos efectos con simultaneidad fortuita -el acercamiento de una supernova justamente cuando el campo magnético terrestre sufría un descenso temporal- que explicara la súbita muerte de los dinosaurios. Bien, quizá sea posible, pero hasta ahora no existen pruebas concluyentes.

### **El Origen Del Hombre**

James Ussher, arzobispo irlandés del siglo XVII, determinaba la fecha exacta de la creación del hombre precisamente en el año 4004 a. de J.C.

Anteriormente a Darwin, pocos hombres se atrevieron a dudar de la interpretación bíblica de la historia antigua del hombre. La fecha más antigua, razonablemente concreta, a la que pueden referirse los acontecimientos relatados en la Biblia es el

reinado de Saúl, el primer monarca de Israel, quien se cree que subió al trono aproximadamente en el año 1025 a. de J.C. El obispo Ussher y otros investigadores de la Biblia, que estudiaron el pasado a través de la cronología bíblica, llegaron a la conclusión de que tanto el hombre como el universo no podían tener una existencia superior a la de unos pocos miles de años.

La historia documentada del hombre, tal como está registrada por los historiadores griegos, se iniciaba sólo alrededor del año 700 a. de J.C., más allá de esta fecha clave de la historia, confusas tradiciones orales se remontaban hasta la guerra de Troya, aproximadamente en el año 1200 a. de J.C., y, más vagamente todavía, hasta una civilización prehelénica en la isla de Creta sometida al rey Minos.

A principios del siglo XIX, los arqueólogos empezaron a descubrir los primeros indicios de las civilizaciones humanas que existieron antes de los períodos descritos por los historiadores griegos y hebreos. En 1799, durante la invasión de Egipto por Napoleón Bonaparte, un oficial de su ejército, llamado Boussard, descubrió una piedra con inscripciones, en la ciudad de Roseta, en una de las bocas del Nilo. El bloque de basalto negro presentaba tres inscripciones diferentes: una en griego, otra en una forma antigua de escritura simbólica egipcia llamada «jeroglífico» («escritura sagrada») y otra en una forma simplificada de escritura egipcia llamada «demótico» («del pueblo»).

La inscripción en griego era un decreto rutinario del tiempo de Tolomeo V, fechado en el equivalente al 27 de marzo del año 196 a. de J.C. Forzosamente tenía que ser una traducción del mismo decreto que se ofrecía en las otras dos lenguas sobre la tabla (comparamos con las indicaciones de «no fumar» y otros avisos oficiales que a menudo aparecen hoy día escritos en tres idiomas, en los lugares públicos, especialmente en los aeropuertos). Los arqueólogos se mostraron entusiasmados: al menos tenían una «clave» con la que descifrar las escrituras egipcias anteriormente incomprensibles. Se llevó a cabo un trabajo bastante importante en el «desciframiento del código» por parte de Thomas Young, el hombre que había establecido por vez primera la teoría ondulatoria de la luz (véase capítulo VII), pero le tocó en suerte a un estudiante francés de antigüedades, Jean-François Champollion, resolver por completo la «piedra de Roseta». Aventuró la suposición de que el copto, una lengua todavía empleada por ciertas sectas cristianas en

Egipto, podía ser utilizado como guía para descifrar el antiguo lenguaje egipcio. En 1821, había conseguido descifrar los jeroglíficos y la escritura demótica, y abierto el camino para comprender todas las inscripciones halladas en las ruinas del antiguo Egipto.

Un hallazgo ulterior casi idéntico consiguió resolver el problema de la indescifrable escritura de la antigua Mesopotamia. En un elevado farallón, cerca del pueblo en ruinas de Behistun, al oeste del Irán, los científicos hallaron una inscripción que había sido grabada, aproximadamente en el 520 a. de J.C., por orden del emperador persa Darío I. Explicaba la forma en que éste había conseguido llegar al trono tras derrotar a un usurpador. Para estar seguro de que todo el mundo pudiera leerlo, Darío había mandado grabarla en tres idiomas: persa, sumerio y babilónico. Las escrituras sumerias y babilónicas, con una antigüedad que se remonta al año 3100 a. de J.C., estaban basadas en imágenes pictográficas, que se formaban haciendo muescas en la arcilla con un punzón; estas escrituras habían evolucionado hasta una de tipo «cuneiforme» («en forma de cuña»), que siguió utilizándose hasta el siglo I d. de J.C.

Un oficial del ejército inglés, Henry Creswicke Rawlinson, subió al farallón, copió la inscripción completa y, en 1846, después de diez años de trabajo, había conseguido realizar una traducción total, utilizando los dialectos locales como guía cuando los necesitaba. El desciframiento de las escrituras cuneiformes permitió leer la historia de las civilizaciones antiguas entre el Tigris y el Éufrates.

Se enviaron una expedición tras otra a Egipto y Mesopotamia en busca de más tablas y restos de las antiguas civilizaciones. En 1854, un científico turco, Hurmuzd Rassam, descubrió los restos de una biblioteca de tablas de arcilla en las ruinas de Nínive, la capital de la Antigua Asiria, una biblioteca que había sido compilada por el último gran rey asirio, Asurbanipal, aproximadamente en el 650 a. de J.C. En 1873, el investigador de la cultura asiria, el inglés George Smith, descubrió tablillas de arcilla que ofrecían relatos del bíblico Diluvio, lo cual demuestra la veracidad del libro del Génesis. En 1877, una expedición francesa al Irak descubrió los restos de una cultura que precedía a la babilónica: la anteriormente mencionada de los sumerios. Esto hacía remontar la historia de aquella región a los más antiguos tiempos egipcios.

Sin embargo, Egipto y Mesopotamia no estaban realmente al mismo nivel cultural que Grecia, cuando se produjeron los espectaculares hallazgos sobre los orígenes de la moderna cultura occidental. Quizás el momento más excitante en la historia de la arqueología ocurrió en 1873, cuando un antiguo dependiente de ultramarinos alemán halló la más famosa de todas las ciudades legendarias.

Heinrich Schliemann, desde niño, había desarrollado una verdadera obsesión por Homero. A pesar de que la mayor parte de los historiadores consideraban la *Ilíada* como un simple relato mitológico, Schliemann vivía y soñaba con la guerra de Troya. Decidió que tenía que hallar la ciudad de Troya, y, gracias a esfuerzos casi sobrehumanos, consiguió elevarse desde dependiente de ultramarinos a millonario, por lo que al fin pudo financiar la empresa.

En 1868, a los cuarenta y seis años de edad, se dio a conocer. Persuadió al Gobierno turco que le concediera permiso para excavar en el Asia Menor, y, siguiendo únicamente los escasos indicios geográficos aportados por los relatos de Homero, por fin sentó sus reales sobre un montículo cerca del pueblo de Hissarlik. Convenció a la población local para que le ayudara a excavar en el terraplén. Haciéndolo de un modo completamente aficionado, destructivo y sin un método científico, empezó a desenterrar una serie de antiguas ciudades sepultadas, cada una de ellas construida sobre las ruinas de la anterior. Y luego, hacia el final, surgió el éxito: desenterró Troya -o, al menos, una ciudad que él pretendía que era Troya-. Realmente, respecto a las ruinas particulares que él denominaba Troya, se sabe hoy día que son muchísimo más antiguas que la Troya de Homero, aunque, a pesar de todo, Schliemann había conseguido demostrar que los relatos de Homero no eran sólo simples leyendas.

Enormemente excitado por su triunfo, Schliemann se trasladó a territorio griego y empezó a excavar en las ruinas de Micenas, un poblado que Homero había descrito como la en otro tiempo poderosa ciudad de Agamenón, la que había guiado a los griegos en la guerra de Troya.

De nuevo realizó un hallazgo sorprendente: las ruinas de una ciudad con gigantescas murallas, de la que hoy día se sabe que se remonta a 1.500 años a. de J.C.

Los éxitos de Schliemann impulsaron al arqueólogo británico Arthur John Evans a iniciar sus propias excavaciones en la isla de Creta, lugar descrito en las leyendas griegas como la sede de una poderosa civilización primitiva bajo el gobierno del rey Minos. Evans, explorando la isla en la década de 1800, descubrió una brillante, y profusamente ornamentada, civilización «minoica», que se extendía hacia el pasado muchos siglos antes del tiempo de la Grecia de Homero. Aquí también se hallaron tablillas escritas. Aparecían en dos clases de escritura diferentes; una de ellas, llamada «lineal B», fue finalmente descifrada en la década de 1950, demostrando ser una variante del griego, mediante una notable proeza de análisis criptográfico y lingüístico realizada por el joven arquitecto inglés Michael Ventris.

A medida que se descubrieron otras civilizaciones primitivas -los hititas y los mitanis, en el Asia Menor; la civilización hindú, en la India, etc.-, se hizo evidente que los hechos históricos registrados por Heródoto de Grecia y el Antiguo Testamento de los hebreos representaban estadios comparativamente avanzados de la civilización humana. Las ciudades más primitivas del hombre eran, al menos, miles de años más antiguas y la existencia prehistórica del ser humano en unas formas de vida menos civilizadas debían de extenderse muchos miles de años más allá hacia el pasado.

Los antropólogos hallaron que era conveniente dividir la historia cultural en tres grandes períodos: la Edad de Piedra, la Edad del Bronce y la Edad del Hierro (una división sugerida, por vez primera, por el poeta y filósofo romano Lucrecio, e introducida en la ciencia moderna por el paleontólogo danés C. J. Thomson, en 1834). Anteriormente a la Edad de Piedra, debió de haber existido una «Edad del Hueso», en la que los cuernos de animal afilados, los dientes en forma de escoplo y los fémures, utilizados como mazas, prestaron un servicio al hombre en un momento en que el pulimento de la relativamente intratable piedra no había sido aún perfeccionado.

Las Edades del Bronce y del Hierro son, por supuesto, muy recientes; tan pronto como nos sumergimos en el estudio de la época anterior a la historia escrita, nos encontramos ya en la Edad de Piedra. Lo que llamamos civilización (expresión procedente de la palabra latina para significar «ciudad») empezó quizás alrededor del año 6000 a. de J.C., cuando el hombre por vez primera se transformó de

cazador en agricultor, aprendió a domesticar a los animales, inventó la alfarería y nuevos tipos de herramientas y empezó a desarrollar las comunidades permanentes y un sistema de vida más sedentario. Debido a que los restos arqueológicos que proceden de este período de transición están jalonados por la aparición de utensilios de piedra avanzados, construidos con nuevas formas, este período es conocido con el nombre de la Nueva Edad de Piedra, o período «Neolítico».

Esta revolución neolítica parece haberse iniciado en el próximo Oriente, en la encrucijada de los caminos de Europa, Asia y África (donde posteriormente se originaron también las Edades del Bronce y del Hierro). Al parecer, a partir de allí la revolución se difundió lentamente, en ondas expansivas, al resto del mundo. No alcanzó la Europa Occidental y la India hasta el año 3000 a. de J.C., el norte de Europa y el Asia Oriental hasta el 2000 a. de J.C., y el África Central y el Japón hasta quizás el año 1000 a. de J.C., o quizás incluso posteriormente. El África meridional y Australia permanecieron en el Paleolítico hasta los siglos XVIII y XIX. La mayor parte de América estaba también aún en la fase de comunidades cazadoras cuando los europeos llegaron en el siglo XVI, aunque una civilización bien desarrollada, posiblemente originada por los mayas, había florecido en América Central y el Perú en una época tan antigua como el siglo I de la Era Cristiana.

Las pruebas de la existencia de culturas humanas pre-neolíticas empezaron a salir a la luz en Europa a finales del siglo XVIII. En 1797, un inglés llamado John Frere descubrió en Suffolk, algunos útiles de pedernal toscamente fabricados, demasiado primitivos para haber sido realizados por el hombre neolítico. Se hallaron a una profundidad de cuatro metros bajo tierra, lo cual, según el índice normal de la sedimentación, demostraba su enorme antigüedad. Justamente con los instrumentos, en el mismo estrato se hallaron huesos de animales extinguidos. Se descubrieron nuevos signos de la gran antigüedad del hombre fabricante de utensilios, principalmente por dos arqueólogos franceses del siglo XIX, Jacques Boucher de Perthes y Édouard-Armand Lartet. Éste, por ejemplo, halló un diente de mamut sobre el que algún hombre primitivo había realizado un excelente dibujo de dicho animal, evidentemente partiendo de modelos vivientes. El mamut era una especie de elefante peludo, que desapareció de la Tierra justamente antes del comienzo de la Nueva Edad de Piedra.

Los arqueólogos se lanzaron a una activa búsqueda de primitivos instrumentos de piedra. Hallaron que éstos podían ser atribuidos a una relativamente corta Edad Media de Piedra («Mesolítico») y a una dilatada Edad Antigua de Piedra («Paleolítico»). El Paleolítico fue dividido en los períodos Inferior, Medio y Superior. Los objetos más antiguos que podían ser considerados verdaderos utensilios («eolitos», o «piedras de la aurora») aparecían remontarse a una época de cerca de un millón de años atrás!

¿Qué tipo de criatura había fabricado los utensilios de la edad Antigua de Piedra? Se decidió que el hombre paleolítico, al menos en sus últimos estadios, era bastante más que un animal cazador. En 1879, un aristócrata español, el marqués de Sautuola, exploró algunas cuevas que habían sido descubiertas unos pocos años antes -después de haber estado bloqueadas por los deslizamientos de rocas desde los tiempos prehistóricos- en Altamira, en el norte de España, cerca de la ciudad de Santander. Mientras estaba excavando en el suelo de la cueva, su hija de cinco años, que le había acompañado para observarle, gritó súbitamente: «¡Toros! ¡Toros!» El padre se acercó a mirar, y allí, en las paredes de la cueva, aparecían las pinturas de diversos animales que mostraban un vivo color y un detalle vigoroso.

Los antropólogos hallaron que era difícil aceptar que estas sofisticadas pinturas pudieran haber sido realizadas por el hombre primitivo. Sin embargo, algunos de los animales dibujados representaban tipos claramente extinguidos. El arqueólogo francés Henri-Édouard-Prosper Breuil halló manifestaciones de un arte similar en unas cuevas del sur de Francia. Por último, las diversas pruebas obligaron a los arqueólogos a aceptar los puntos de vista firmemente expresados por Breuil y a llegar a la conclusión de que los artistas habían vivido en la última parte del Paleolítico, es decir, aproximadamente en el año 10.000 a. de J.C.

Algo se conocía ya acerca del aspecto físico de estos hombres paleolíticos. En 1868, los trabajadores que estaban efectuando las obras de una explanación para el ferrocarril habían descubierto los esqueletos de cinco seres humanos en las llamadas cuevas de Cro-Magnon, al sudeste de Francia. Los esqueletos eran indudablemente de *Homo sapiens*, aunque algunos de ellos, y otros esqueletos similares que pronto se descubrieron en otros lugares, parecían tener una antigüedad de 35.000 a 40.000 años, según las pruebas geológicas de

determinación cronológica. Estos ejemplares fueron denominados el «hombre de CroMagnon». De mayor talla que el promedio del hombre moderno, y dotado de una gran bóveda craneana, el hombre de Cro-Magnon es dibujado por los artistas como un individuo bien parecido y vigoroso, lo suficientemente moderno, en realidad su apariencia lo es, como para ser capaz de cruzarse con los seres humanos de hoy día.



Cráneos reconstruidos del (A) *Zinjanthropus*. (B) *Pithecanthropus*, (C) Neandertal y (D) Cro-Magnon.

La Humanidad, en esta época tan remota, no era una especie extendida por todo el planeta, tal como lo es en la actualidad. Con anterioridad al año 2.000, aproximadamente, a. de J.C., estaba confinada en la gran «isla mundo» de África, Asia y Europa. Fue solamente en un período posterior cuando las bandas de cazadores empezaron a emigrar, a través de los estrechos pasos que cruzaban el océano, a las Américas, Indonesia y Australia. Pero hasta el año 400 a. de J.C., e incluso más tarde, los navegantes polinesios no se atrevieron a cruzar las amplias extensiones del Pacífico, sin brújula y en embarcaciones que apenas eran algo más que simples canoas, para colonizar las islas de este océano. Finalmente, hasta bien entrado el siglo XX, el hombre no se asentó en la Antártica.

Pero si hemos de investigar la suerte del hombre prehistórico en el momento en que estaba confinado a una sola parte del área terrestre del planeta, tiene que existir alguna forma de datar los acontecimientos, al menos aproximadamente. Para ello, se han utilizado diversos métodos ingeniosos.

Por ejemplo, los arqueólogos se han servido de los anillos de los árboles, una técnica (la «dendrocronología») introducida en 1914 por el astrónomo americano Andrew Ellicott Douglass. Los anillos de los árboles están muy separados en los veranos húmedos, cuando se produce mucha madera nueva, y estrechamente espaciados en los veranos secos. Esta disposición, a través del paso de los siglos, se distingue perfectamente. La estructura anular de un trozo de madera que forma parte de un yacimiento primitivo puede coincidir con la imagen de un esquema cronológico conocido y, de este modo, obtenerse su edad.

Un sistema similar puede ser aplicado a las capas de sedimentos, o «varvas», abandonadas verano tras verano por los glaciares en fusión, en lugares como Escandinavia. Los veranos cálidos dejarán gruesas capas, los veranos fríos capas delgadas, y aquí también tenemos una medida diferenciadora. En Suecia, los acontecimientos pueden ser investigados por este procedimiento hasta hace dieciocho mil años.

Una técnica aún más notable es la que desarrolló, en 1946, el químico americano Willard Frank Libby. El trabajo de Libby tenía su origen en el descubrimiento hecho por el físico americano Serge Korff, en 1939, de que el bombardeo de la atmósfera por los rayos cósmicos produce neutrones. El nitrógeno reacciona con estos neutrones, dando lugar a carbono 14 radiactivo en nueve reacciones de cada 10 y produciendo hidrógeno 3 radiactivo en la restante reacción.

Como resultado de ello, la atmósfera contendría pequeñas trazas de carbono 14 (e incluso restos más pequeños de hidrógeno 3). Libby dedujo que el carbono 14 radiactivo, creado en la atmósfera por los rayos cósmicos, penetraría en todos los tejidos vivos sirviendo de vía de entrada el anhídrido carbónico, absorbido en primer lugar por las plantas y transmitido luego a los animales. Durante toda su vida, la planta y el animal estarían recibiendo continuamente carbono radiactivo y mantendrían un nivel constante de él en sus tejidos. Pero, al morir el organismo, cesando con ello la adquisición de carbono, el carbono radiactivo en sus tejidos

empezaría a disminuir por agotamiento radiactivo, en una proporción que viene determinada por sus cinco mil seiscientos años de vida media. Por tanto, un trozo de hueso conservado, o un resto de carbón vegetal de una antigua hoguera, o bien los residuos orgánicos de cualquier especie, podrían ser fechados midiendo la cantidad de carbono radiactivo perdido. El método ofrece una razonable precisión para objetos con una antigüedad de hasta 30.000 años, y este plazo abarca la historia arqueológica comprendida entre las civilizaciones antiguas y los comienzos del hombre de Cro-Magnon. Por el desarrollo de esta técnica de «arqueometría» Libby fue galardonado con el premio Nobel de Química en 1960.

El hombre de Cro-Magnon no fue el primer ser humano primitivo sacado a la luz por los arqueólogos. En 1857, en el valle de Neandertal de la región alemana del Rin, un labrador descubrió parte de un cráneo y algunos huesos largos que parecían humanos en esencia, aunque sólo imperfectamente humanos. El cráneo tenía una frente con una inclinación hacia atrás muy acusada y arcos superciliares muy pronunciados. Algunos arqueólogos sostuvieron que se trataba de los restos de un ser humano cuyos huesos habían sido deformados por la enfermedad, pero, a medida que pasaron los años, se hallaron otros esqueletos del mismo tipo, y se elaboró así una imagen detallada y consistente del hombre de Neandertal. Éste era un bípedo corto de talla, rechoncho y encorvado, con un promedio de estatura de metro y medio en el hombre, siendo el de la mujer algo menor. El cráneo era suficientemente voluminoso para albergar un cerebro de tamaño casi igual al del hombre moderno. Los artistas antropológicos dibujan a este ser con pecho abombado, velludo, frente pronunciada, barbilla hundida y expresión brutal, una imagen creada por el paleontólogo francés Marcellin Boule, quien fue el primero en describir un esqueleto casi completo de Neandertal, en 1911. Realmente, es probable que no tuviera un aspecto tan infrahumano como el que refleja esta imagen. El examen moderno del esqueleto descrito por Boule demuestra que había pertenecido a una criatura gravemente enferma de artritis. Un esqueleto normal proporcionaría una imagen muchísimo más humana. De hecho, el hombre de Neandertal, con un afeitado y un corte de pelo y vestido con un traje bien cortado, probablemente podría pasear por la Quinta Avenida de Nueva York sin llamar demasiado la atención.

Con posterioridad se hallaron restos del hombre de Neandertal no sólo en Europa, sino también en África del Norte, en Rusia y Siberia, en Palestina y en el Irak. Recientemente se han localizado cerca de 100 esqueletos diferentes en 40 lugares distintos y los hombres de esta clase existieron sin duda no hace más que 30.000 años. Y se descubrieron restos de esqueletos, en cierto modo parecidos a los del hombre de Neandertal, en lugares aún más remotos; éstos fueron el hombre de Rhodesia, descubierto en el norte de Rhodesia, en el África meridional, en 1921, y el hombre de Solo, hallado en las riberas del río Solo en Java, en 1931.

Se consideró que éstas eran especies separadas del género *Homo*, y así los tres tipos fueron denominados *Homo neanderthalensis*, *Homo rhodesiensis*, y *Homo solensis*. Pero algunos antropólogos y evolucionistas sostenían que los tres debían ser colocados en la misma especie de *Homo sapiens*, como «variedades» o «subespecies» del hombre. Existieron hombres que llamamos *sapiens* viviendo en la misma época que el hombre de Neandertal y se han hallado formas intermedias que sugieren que pudieron haberse cruzado entre sí. Si el hombre de Neandertal y sus parientes pueden ser clasificados como *sapiens*, en este caso nuestra especie tiene quizás una antigüedad de doscientos mil años. Otro supuesto pariente del hombre de Neandertal, «el hombre de Heidelberg» (del cual solamente se descubrió un hueso de mandíbula en 1907 y desde entonces ningún otro resto), es mucho más antiguo, y, si lo incluimos en nuestra especie, la historia del *Homo sapiens* debe remontarse aún mucho más atrás en el pasado. Realmente, en Swanscombe, Inglaterra, los arqueólogos han encontrado fragmentos de un cráneo que parecen ser definitivamente *sapiens* y pertenecer a una época considerablemente más antigua que el hombre de Neandertal. En 1966 se descubrió, cerca de Budapest, un resto de *Homo sapiens* con una antigüedad de unos 500.000 años.

*El origen de las Especies* de Darwin, por supuesto, desencadenó una frenética búsqueda de antepasados del hombre claramente subhumanos -lo que la Prensa popular dio en llamar el «eslabón perdido» entre el hombre y sus antepasados supuestamente simiescos. Esta búsqueda no podía resultar fácil. Los primates son inteligentes y pocos de ellos se dejan atrapar en situaciones que permitan la fosilización. Se ha estimado que la posibilidad de encontrar al azar un esqueleto de primate es de sólo una entre un cuatrillón.

En la década de 1880 a 1890, un paleontólogo holandés, Marie Eugene François Thomas Dubois, se empeñó en que los antepasados del hombre tenían que ser hallados en las Indias Orientales (la moderna Indonesia), donde todavía habitaban grandes simios (y también donde él podía trabajar cómodamente, ya que estas islas pertenecían entonces a Holanda). De forma bastante sorprendente, Dubois, trabajando en Java, la isla más populosa de Indonesia, encontró en algún lugar una criatura intermedia entre el mono y el hombre! Después de tres años de búsqueda, halló la parte superior de un cráneo que tenía un tamaño superior al de un mono, aunque era más pequeño que uno de tipo humano. Al año siguiente, halló un fémur igualmente intermedio. Dubois denominó a su «hombre de Java» *Pithecanthropus erectus* («hombre mono erecto»). Medio siglo más tarde, en la década de 1930 a 1940, otro holandés, Gustav H. R. von Koenigswald, descubrió más huesos de *Pithecanthropus* y confeccionó una imagen clara de una criatura de pequeño cerebro, pecho muy abombado y con un remoto parecido al hombre de Neandertal. Mientras tanto, otros trabajadores habían hallado, en una cueva cerca de Pekín, cráneos, mandíbulas y dientes de un hombre primitivo, llamado por tanto, «el hombre de Pekín». Una vez se hubo hecho este descubrimiento, se supo que dientes semejantes ya habían sido localizados anteriormente en una farmacia de Pekín en donde eran guardados con fines medicinales. El primer cráneo intacto fue localizado en diciembre de 1929, y entonces se consideró que era muy similar al «hombre de Java». Quizás existió hace medio millón de años, empleó el fuego y poseyó herramientas de hueso y de piedra. Con el tiempo, se acumularon los fragmentos de cuarenta y cinco individuos, aunque desaparecieron en 1941, durante un intento de evacuación de los restos ante el peligro del avance japonés. El hombre de Pekín fue llamado *Sinanthropus pekinensis* («el hombre chino de Pekín»). Sin embargo, al efectuar diversos exámenes de esos, comparativamente, homínidos de cerebro reducido, parece improcedente clasificar a los hombres de Pekín y de Java en géneros distintos. El biólogo germano americano Ernst Walter Mayr consideró erróneo clasificarlos en un género diferente al del hombre moderno, de modo que hoy se considera a los hombres de Pekín y de Java con dos variedades del *Homo erectus*. No obstante, es improbable que la Humanidad tuviera su origen en Java, pese a la existencia allí de una variedad de criatura humanoide de pequeño

cerebro. («Homínido» es el término que se aplica a todas las criaturas que se parecen más al hombre que al mono.) Durante algún tiempo se sospechó que el enorme continente de Asia primitivamente habitado por el «hombre de Pekín», era el lugar de origen del hombre, pero, a medida que avanzó el siglo XX, la atención se dirigió cada vez con mayor firmeza al continente africano, el cual, después de todo, es el continente más rico en vida primate en general, y en primates superiores en particular.

Los primeros hallazgos significativos en África fueron realizados por dos científicos ingleses, Raymond Dart y Robert Broom. Un día de primavera, en 1924, los obreros que efectuaban voladuras en una cantera de piedra caliza, cerca de Taungs, en Sudáfrica, sacaron a la luz un pequeño cráneo de apariencia casi humana. Lo enviaron a Dart, un anatomista que trabajaba en Johannesburgo. Inmediatamente, éste identificó el cráneo como perteneciente a un ser intermedio entre el hombre y el mono, y lo denominó *Australopithecus africanus* («mono del sur de África»). Cuando su artículo describiendo el hallazgo se publicó en Londres, los antropólogos creyeron que había sufrido un error y confundido a un chimpancé con un hombre mono. Pero Broom, un entusiasta buscador de fósiles, que desde siempre había estado convencido de que el hombre tuvo su origen en África, corrió a Johannesburgo y proclamó que el *Australopithecus* era lo más parecido al eslabón perdido que hasta entonces se había descubierto.

Durante las décadas siguientes, Dart, Broom y diversos antropólogos intensificaron sus esfuerzos, consiguiendo hallar muchos más huesos y dientes del hombre mono sudafricano, así como también las mazas que utilizaban para cazar, los huesos de los animales muertos por él y las cuevas donde vivía. El *Australopithecus* era una especie de criatura dotada de un pequeño cerebro, con una cara puntiaguda, en muchos aspectos «menos humano que el hombre de Java. Pero, sin embargo, tenía cejas y dientes más humanos que el *Pithecanthropus*. Caminaba erecto, utilizaba herramientas, y probablemente poseía una forma primitiva de lenguaje. En resumen, era una variedad africana de homínido que había vivido, como mínimo, medio millón de años atrás y que era más primitivo que el *Homo erectus*.

No existían pruebas suficientes para deducir una prioridad entre el *Australopithecus* de África y el *Pithecanthropus* de Asia o Indonesia, pero la balanza se inclinó

definitivamente, hacia África como resultado del trabajo del súbdito inglés, nacido en Kenya, Louis S. B. Leakey y su esposa Mary. Con paciencia y tenacidad, los Leakey rastrearon áreas prometedoras de África Oriental en busca de primitivos restos de homínidos. El más prometedor fue Olduvai Gorge, en lo que hoy es Tanzania y, luego, el 17 de julio de 1959, Mary Leakey coronó más de un cuarto de siglo de esfuerzos al descubrir los huesos de un cráneo que, una vez juntadas las piezas, demostraron haber contenido el cerebro más pequeño de cualquier homínido descubierto hasta entonces. Sin embargo, otras características demostraban que este homínido estaba más próximo al hombre que al simio, ya que caminaba erecto y alrededor de sus restos se encontraron pequeños utensilios fabricados con guijarros. Los Leakey denominaron a su hallazgo *Zinjanthropus* («hombre del este de África», utilizando la designación árabe para el África Oriental). El *Zinjanthropus* no parece estar en la línea directa de ascendencia del hombre moderno. Sin embargo, otros fósiles anteriores, cuya antigüedad se cifra en dos millones de años, pueden haber estado más capacitados. Éstos, a quienes se ha dado el nombre de *Homo habilis* (hombre diestro), eran criaturas con una talla, de 1,40 m, tenían ya manos de pulgares articulados y suficientemente diestras (de ahí el nombre) para darles una apariencia humana en ese aspecto.

Con anterioridad al *Homo habilis* encontramos fósiles demasiado primitivos para recibir la denominación de homínidos, y nos aproximamos cada vez más al antecesor común del hombre y de los demás antropoides. Es el *Ramapithecus*, del cual se localizó una mandíbula superior en la India septentrional a principios de la década de 1930; su descubridor fue G. Edward Lewis. Este maxilar superior era bastante más parecido al humano que el de cualquier otro primate viviente, con la excepción, claro está, del propio hombre; tendría quizás una antigüedad de tres millones de años. En 1962, Leakey descubrió una especie allegada que, tras el análisis con isótopos, resultó remontarse a catorce millones de años atrás.

En 1948, Leakey descubrió un fósil todavía más antiguo (quizás veinticinco millones de años), que denominó «Procónsul». (Este nombre, que significa «antes de cónsul», fue asignado en honor de un chimpancé del Zoo londinense, llamado así.) El «Procónsul» parece ser el antepasado común de la mayor parte de familias de los grandes monos, el gorila, el chimpancé y el orangután. Anteriormente a éste, por

tanto, debió existir un antepasado común del «Procónsul» y el *Ramapithecus* (y del primitivo simio que fue el antepasado del moderno simio más pequeño, el gibón). Este ser, el primero de todas las especies simiescas, quizá debió existir hace unos cuarenta millones de años.

Durante muchos años, los antropólogos estuvieron grandemente desorientados por culpa de un fósil que parecía ser una especie de eslabón perdido, aunque de un tipo curioso e increíble. En 1911, cerca de un lugar llamado Piltdown Common, en Sussex, Inglaterra, los obreros que construían una carretera hallaron un cráneo antiguo, roto, en un lecho de arena. El cráneo atrajo la atención de un abogado llamado Charles Dawson, quien hizo que lo examinara un paleontólogo, Arthur Smith Woodward, en el Museo Británico. El cráneo tenía frente alta, aunque los arcos superciliares eran poco pronunciados; parecía más moderno que el hombre de Neandertal. Dawson y Woodward se dedicaron a investigar en el lecho de arena para tratar de encontrar otras partes del esqueleto. Un día, Dawson, en presencia de Woodward, halló una mandíbula, aproximadamente en el mismo lugar en que habían encontrado los fragmentos del cráneo. Tenía la misma tonalidad pardorrojiza de los otros fragmentos, y, por tanto, al parecer procedía de la misma cabeza, ¡Pero la mandíbula, contrariamente al desarrollado cráneo humano, parecía pertenecer a un simio! Asimismo resultaba extraño que los dientes de la mandíbula, aunque simiescos, aparecían desgastados, como lo están los dientes humanos a causa de la masticación.

Woodward decidió que este mitad-hombre, mitad-mono podía ser una criatura primitiva, con un cerebro bien desarrollado y, sin embargo, con una mandíbula retrógrada. Presentó el hallazgo al mundo como el «hombre de Piltdown» o *Eoanthropus dawsoni* («el nombre original de Dawson»).

El hombre de Piltdown se convirtió cada vez más en una anomalía, al apreciar los antropólogos que en todos los restos fósiles, inclusive la mandíbula, el desarrollo del maxilar guardaba concordancia con el desarrollo del cráneo.

Finalmente, a principios de la década de 1950, tres científicos británicos, Kenneth Oakley, W. E. Le Gros Clark y J. S. Weiner, decidieron investigar la posibilidad de un fraude.

En efecto, resultó un fraude. La mandíbula pertenecía a un mono moderno y había sido añadida.

Otra singular anécdota sobre las reliquias de primates tuvo un final más feliz. Allá por 1935, Von Koenigswald encontró un inmenso colmillo fosilizado, aunque de apariencia humana, puesto a la venta en una farmacia de Hong Kong. Según parecía, el farmacéutico chino lo tomaba por un «diente de dragón» con inapreciables propiedades medicinales. Von Koenigswald rebuscó en otras farmacias chinas y consiguió otros cuatro molares semejantes antes de que la Segunda Guerra Mundial pusiera fin temporalmente a sus actividades.

La naturaleza casi humana de aquellos dientes hizo pensar que en algún tiempo pretérito habían merodeado por la Tierra unos seres humanos gigantescos, tal vez con una talla de 2,70 m. Por aquellas fechas se tendió a aceptar esta posibilidad, quizás porque la Biblia dice (Génesis, 6:4): «Existían entonces los gigantes en la Tierra.» Sin embargo, entre 1956 y 1968 se encontraron cuatro maxilares en los cuales encajaban dichos dientes. Se conceptuó a este ser, el *Gigantopithecus*, como el mayor primate de todos los conocidos hasta entonces; pero evidentemente se trataba de un antropoide y no de un homínido, pese a la apariencia humana de su dentadura. Probablemente sería una criatura semejante al gorila, con 2,70 m de altura en posición vertical y 272 kg de peso. Quizás fuera coetáneo del *Homo erectus* y poseyera los mismos hábitos alimentarios (de ahí la similitud entre ambas dentaduras). Desde luego, su especie debe haberse extinguido hace un millón de años y, por tanto, no puede haber dado pie al mencionado versículo bíblico.

Es importante hacer constar que el resultado claro de la evolución humana ha sido la producción de una sola especie tal como existe hoy día. Es decir, aunque haya habido un número considerable de homínidos, sólo una especie ha sobrevivido. Todos los hombres del presente son *Homo sapiens*, cualesquiera sean sus diferentes apariencias, y la diferencia entre negros y blancos es aproximadamente la misma que, entre caballos de diferente pelaje.

Ahora bien, desde los albores de la civilización, el hombre ha manifestado recelo ante las diferencias raciales, y usualmente las restantes razas humanas le han hecho exteriorizar las emociones que despierta lo exótico, recorriendo toda la gama desde la curiosidad hasta el desprecio o el odio. Pero el racismo ha tenido raras

veces repercusiones tan trágicas y persistentes como el conflicto moderno entre blancos y negros. (Se suele dar a los hombres blancos el calificativo de «caucásicos», término implantado, en 1775, por el antropólogo alemán Johann Friedrich Blumenbach, quien tenía la errónea noción de que en el Cáucaso se hallaban los representantes más perfectos del grupo.

Blumenbach clasificó también a los negros como «etiópicos» y a los asiáticos orientales como «mogólicos», denominaciones que se usan todavía ocasionalmente.) El conflicto entre blanco y negro, entre caucásico y etíope por así decirlo, tuvo su peor fase en el siglo XV, cuando las expediciones portuguesas a lo largo de la costa occidental africana iniciaron un pingüe negocio con el transporte de negros para la esclavitud. Cuando prosperó este negocio y las naciones fundaron sus economías en el trabajo de los esclavos, se formularon rationalizaciones para justificar la esclavitud de los negros, invocando las Sagradas Escrituras, la moralidad social e incluso la ciencia.

Según la interpretación de la Biblia por los esclavistas -interpretación a la cual sigue dando crédito mucha gente hoy día- los negros eran descendientes de Cam, y, como consecuencia, formaban una tribu inferior marcada por la maldición de Noé: «...siervo de los siervos de sus hermanos será» (Génesis 9: 25). A decir verdad, se pronunció esa maldición contra el hijo de Cam, Canán, y sus descendientes los «cananitas», quienes fueron reducidos a la esclavitud por los israelitas cuando éstos conquistaron la tierra de Canán. Sin duda, las palabras en el Génesis 9: 25 representan un comentario «a posteriori» concebido por algún escritor hebreo de la Biblia para justificar la esclavitud de los cananitas. Sea como fuere, el punto crucial de la cuestión es que se hace referencia exclusivamente a los cananitas, y por cierto los cananitas eran hombres blancos.

Aquello fue una tergiversación interpretativa de la Biblia que aprovecharon los esclavistas con efectos contundentes en siglos pretéritos para abogar por la esclavitud del negro.

Los racistas «científicos» de tiempos más recientes pretendieron afirmarse sobre un terreno más trepidante todavía. Adujeron que el hombre negro era inferior al blanco porque, evidentemente, personificaba una fase más primitiva de la evolución. ¿Acaso su piel negra y su nariz aplastada, por ejemplo, no recordaban las del simio?

Por desgracia, para su causa, ese curso de razonamiento conduce en dirección opuesta. El negro es el menos peludo de todos los grupos humanos. ¡A este respecto el negro se distancia más del mono que el hombre blanco! Téngase presente también que su pelo es lanudo y crespo, no largo y liso. Lo mismo podría decirse sobre los gruesos labios del negro; se asemejan a los del mono bastante menos que los labios usualmente delgados del hombre blanco.

La cuestión es ésta a fin de cuentas: cualquier tentativa para encasillar a los diversos grupos de *Homo sapiens* en el clasificador evolutivo es lo mismo que intentar hacer un trabajo delicado con toscas herramientas. La Humanidad consta de una sola especie y las variaciones habidas en su seno como respuesta a la selección natural son absolutamente triviales.

La piel oscura de quienes pueblan las regiones tropicales y subtropicales de la Tierra tiene innegable valor para evitar las quemaduras del sol. La piel clara de los europeos septentrionales es útil para absorber la mayor cantidad posible de radiación ultravioleta, considerando la luz solar relativamente débil de aquella zona, pues así los esteroles epidérmicos pueden producir suficiente vitamina D. Los ojos de estrecha abertura, comunes entre esquimales y mongoles, son muy valiosos para la supervivencia en países donde el reflejo de la nieve o de la arena del desierto es muy intenso. La nariz de puente alto y apretadas ventanillas nasales del europeo sirve para calentar el aire frío de los inviernos boreales, y así sucesivamente.

Como el *Homo sapiens* ha propendido siempre a hacer de nuestro planeta un mundo, en el pasado no han surgido diferencias básicas entre las constituciones de los grupos humanos, y todavía es menos probable que surjan en el futuro. El mestizaje está nivelando paulatinamente los rasgos hereditarios del hombre. El negro americano representa uno de los ejemplos más característicos. Pese a las barreras sociales contra los matrimonios mixtos, se calcula que las cuatro quintas partes aproximadamente de los negros estadounidenses tienen algún ascendiente blanco. Hacia fines del siglo XX, probablemente ya no habrá ningún negro de «pura raza» en los Estados Unidos.

No obstante, los antropólogos muestran sumo interés por la raza, pues este tema puede orientarles ante todo para estudiar las migraciones del hombre primitivo. No

es nada fácil identificar específicamente cada raza. El color de la piel, por ejemplo, proporciona escasa orientación; el aborigen australiano y el negro africano tienen piel oscura, pero la relación entre ambos es tan estrecha como la que pudieran tener con los europeos. Tampoco es muy informativa la línea del cráneo - «dolicocéfalo» (alargado) frente a «braquicéfalos» (redondeado), términos implantados en 1840 por el anatomista sueco Anders Adolf Retzius- aún cuando se clasifique a los europeos en función de ella para formar subgrupos. La relación entre la longitud y anchura de la cabeza multiplicada por ciento («índicecefálico», o «índice craneal», si se emplean las medidas del cráneo) sirvió para dividir a los europeos en «nórdicos», «alpinos» y «mediterráneos». Sin embargo, las diferencias entre un grupo y otro son pequeñas, y las diferenciaciones dentro de cada grupo, considerables. Por añadidura, los factores ambientales tales como deficiencias vitamínicas, tipo de cuna donde duerme el lactante, etc., influyen sobre la forma del cráneo.

Pero los antropólogos han encontrado un excelente indicador de la raza en los grupos sanguíneos. El bioquímico William Clouser Boyd, de la Universidad de Boston, fue una eminencia en este terreno. Él puntualizó que el grupo sanguíneo es una herencia simple y comprobable, no la altera el medio ambiente, y se manifiesta claramente en las diferentes distribuciones entre los distintos grupos raciales.

Particularmente el indio americano constituye un buen ejemplo. Algunas tribus son casi por completo de sangre O; otras tienen O, pero con una considerable adición de A; prácticamente ningún indio tiene sangre B o AB, y si algún indio americano posee B o AB, es casi seguro que tienen algún ascendiente europeo. Asimismo, los aborígenes australianos tienen un elevado porcentaje de O y A con la inexistencia casi virtual de B. Pero se distinguen de los indios americanos por el elevado porcentaje de un grupo sanguíneo descubierto recientemente, el M, y el bajo porcentaje del grupo N, mientras que los indios americanos tienen abundante N y poco M.

En Europa y Asia, donde la población está más mezclada, las diferencias entre los pueblos son pequeñas, pero están bien definidas. Por ejemplo, en Londres el 70 % de la población tiene sangre O, el 25 % A y el 5% B. En la ciudad rusa de Jarkov, esa distribución es del 60, 25 y 15 %, respectivamente. Generalmente, el

porcentaje de B aumenta cuanto más se avanza hacia la Europa Oriental, alcanzando el punto culminante del 40 % en Asia central.

Ahora bien, los genes del tipo sanguíneo revelan las huellas no borradas totalmente todavía de migraciones pretéritas. La infiltración del gen B en Europa puede ser un leve indicio de la invasión de los hunos en el siglo XV y de los mongoles en el XIII. Otros estudios similares de la sangre en el Extremo Oriente parecen sugerir una infiltración relativamente reciente del gen A en Japón, desde el Sudoeste, y del gen B en Australia, desde el Norte.

Una repercusión particularmente interesante e insospechada de las primeras migraciones europeas se da en España. Este caso se descubrió en un estudio sobre la distribución de la sangre Rh. (Los grupos sanguíneos Rh se denominan así por la reacción de la sangre frente al antisuero preparado en combinación con los hematíes del mono Rhesus. Ahí hay por lo menos ocho alelomorfos del correspondiente gen; siete se llaman «Rh positivos», y el octavo, recesivo con respecto a todos los demás, se denomina «Rh negativo», porque surte efecto solamente cuando una persona ha recibido los alelomorfos de ambos padres.) En los Estados Unidos, el 85 % de la población es Rh positivo, y el 15 % Rh negativo. Esa misma proporción se mantiene en casi todos los pueblos europeos.

Pero, como nota curiosa, los vascos constituyen una excepción con un 60 % aproximado de Rh negativo y un 40 % de Rh positivo, y los vascos son también similares por su lengua, la cual no está relacionada lo más mínimo con ningún otro idioma conocido.

De ahí se puede inferir esta conclusión: los vascos son el remanente de algún pueblo Rh negativo que invadió Europa en tiempos prehistóricos. Se supone que alguna oleada ulterior de tribus invasoras Rh positivas les harían replegarse a su montañoso refugio en el rincón occidental del continente; es decir, hoy permanece allí el único grupo superviviente de los «primitivos europeos». Los pequeños residuos de genes Rh negativos en el resto de Europa y entre los descendientes americanos de colonizadores europeos pueden representar un legado de aquellos europeos primigenios.

Los pueblos asiáticos, los negros africanos, los indios americanos y los aborígenes australianos son casi totalmente Rh positivos.

## El Futuro Del Hombre

Todo intento de profecía sobre el futuro de la raza humana es una proposición muy aventurada, y por ello creemos preferible dejársela a los místicos y los escritores de ciencia-ficción (aunque, por cierto, yo también escribo obras de ciencia-ficción entre otras cosas). Pero sí podemos afirmar una cosa con bastante seguridad. A menos que no sobrevenga una catástrofe mundial, tal como una guerra nuclear total, o un ataque masivo desde el espacio exterior o la pandemia de una enfermedad nueva y letal, la población humana crecerá rápidamente. Ahora es ya tres veces mayor que hace solamente siglo y medio. Según se ha calculado, el número de seres humanos que han vivido sobre la Tierra durante el período de los últimos 60.000 años se eleva a setenta y siete billones. Si ese cálculo es acertado, en estos momentos vive el 4 % de todos los seres humanos que han alentado sobre la corteza terrestre, y la población mundial sigue aumentando a un ritmo tremendo..., un ritmo más rápido que en ninguna época anterior.

Como no tenemos censos de las poblaciones antiguas, debemos calcularlos por aproximación, tomando como base todo cuanto conocemos sobre las condiciones de la vida humana. Los ecólogos opinan que el abastecimiento de alimentos «preagrícolas» -obtenidos mediante la caza, la pesca, la recolección de frutos silvestres y nueces, etc.-, no pudo haber procurado la manutención de una población mundial superior a los veinte millones, y con toda probabilidad, la población existente durante el Paleolítico fue solamente la tercera parte de esa cifra o la mitad a lo sumo. Esto significa que en el año 6.000 a. de J.C. habría entre seis y diez millones de personas, es decir, aproximadamente la población de una ciudad actual, como Tokio o Nueva York. (Cuando se descubrió América, los indios colectores de alimentos no sumarían más de 250.000 en lo que es hoy Estados Unidos, lo cual equivale a imaginar la población de Dayton [Ohio] extendida por todo el continente.) El primer gran salto de la población mundial llegó con la revolución neolítica y la agricultura. El biólogo británico Julian Sorrell Huxley (nieto de aquel Huxley que fuera el «bulldog de Darwin») calcula que la población inició entonces su crecimiento a un ritmo que la duplicaba cada mil setecientos años más o menos. Al comenzar la Edad de Bronce, la población sumaría un total aproximado

de veinticinco millones; con el comienzo de la Edad de Hierro serían setenta millones, y al iniciarse la Era Cristiana, ciento cincuenta millones, cuya tercera parte poblaría el Imperio romano, otra tercera parte el Imperio chino y la última estaría diseminada en diversas regiones.

Allá por 1600, la población totalizaría, quizá, ciento cincuenta millones, una cifra considerablemente inferior a la población actual de China solamente.

Llegados a ese punto, concluyó el discreto ritmo de crecimiento y la población estalló. Exploradores del mundo entero, abrieron para la colonización europea unos 4.500.000 km: en nuevos continentes casi desiertos. La revolución industrial del siglo XVIII aceleró la producción de alimentos... y personas. Incluso los dos gigantes rezagados, China e India, participaron en esa explosión demográfica. Desde entonces, la duplicación de la población mundial no requirió un período de casi dos milenios, sino dos siglos. La población se elevó de quinientos millones en 1600 a novecientos millones en 1800. A partir de aquel salto, siguió creciendo a un ritmo más acelerado todavía.

En 1900, alcanzó ya los mil seiscientos millones. Durante los primeros setenta años del siglo XX ha escalado hasta los tres mil seiscientos millones, pese a dos demoledoras guerras mundiales.

Corrientemente, la población mundial aumenta al ritmo de 220.000 personas por día o setenta millones cada año.

Esto es un incremento al ritmo del 2 % anual (algo muy considerable comparado con el aumento del 0,3 % anual en 1650). A esta marcha, la población terrestre se duplicará dentro de treinta y cinco años aproximadamente, y en ciertas regiones, tales como América Latina, esa duplicación tendrá lugar dentro de un período más breve. Hay buenas razones para temer que la población mundial rebase la cota de seis mil millones en el año 2000.

Por el momento, los analistas de la explosión demográfica propenden acentuadamente al criterio «maltusiano» que se hizo impopular desde su divulgación en 1798. Como ya he dicho anteriormente, Thomas Robert Malthus aseveró en su obra *An Essay on the Principle of Population*, que la población tiende siempre a crecer más aprisa que la producción de alimentos teniendo como inevitable desenlace las plagas de hambre y las guerras. A despecho de sus

predicciones, la población mundial ha seguido creciendo sin sufrir percances graves durante el último siglo y medio. Pero debemos agradecer en gran medida el aplazamiento de lo catastrófico al hecho de que se ofrezcan todavía vastas áreas terrestres para la expansión y la producción de alimentos. Ahora empiezan a escasear las nuevas tierras laborables. Una gran mayoría de la población mundial está desnutrida, y la Humanidad debe esforzarse denodadamente por superar ese estado famélico crónico.

Desde luego, puede explotarse el mar de forma más racional y multiplicar su entrega de alimentos. El empleo de fertilizantes químicos debe implantarse todavía en inmensas zonas. La aplicación apropiada de pesticidas debe reducir la pérdida de alimentos producida por los insectos depredadores en áreas donde no se ha remediado aún tal pérdida. Se dispone también de medios para estimular directamente el desarrollo de las plantas. Hormonas vegetales, tales como la «gibelerina» (descubiertas por bioquímicos japoneses antes de la Segunda Guerra Mundial, sometidas a la atención de los occidentales en la década 1950-1960), podrían acelerar el crecimiento vegetal, mientras que pequeñas porciones de antibióticos, agregadas al pienso de los animales, acelerarían asimismo su crecimiento (tal vez suprimiendo la bacteria intestinal que les disputa el alimento cuando llega a los intestinos, y eliminando las infecciones benignas, pero debilitantes). No obstante, al haber tantas nuevas bocas para alimentar, multiplicándose con la rapidez antedicha, se requerirán gigantescos esfuerzos para mantener meramente la población mundial en el mediocre nivel presente, donde trescientos millones de niños menores de cinco años esparcidos por el mundo entero sufren una depauperación continua hasta el punto de contraer dolencias cerebrales permanentes.

Incluso un recurso tan común (y tan desdeñado hasta fechas muy recientes) como es el agua potable, está empezando a resentirse de la escasez general. Hoy día se consume agua potable en el mundo entero a razón de 7.000.000.000.000 de litros diarios, aunque el total del agua de lluvia -por el momento, principal fuente suministradora de agua potable- equivale a esa cantidad multiplicada por cincuenta, sólo una fracción de ella es fácilmente recuperable. Y en los Estados Unidos, donde se consume agua potable a razón de doce mil trescientos millones de litros diarios -

una proporción per cápita mayor, por lo general, que en el resto del mundo- sólo se embalsa y emplea de una forma u otra el 10 % del total del agua de lluvia.

Así, resulta que la construcción de presas en los lagos y ríos del mundo es cada vez más intensa. (Las presas de Siria e Israel, en el Jordán, o de Arizona y California, en el río Colorado, sirven como ejemplo.) Se abren pozos cada vez más profundos, y en algunas regiones terrestres el nivel de las aguas subterráneas desciende peligrosamente. Se han efectuado diversas tentativas para conservar el agua potable, incluyendo el uso del alcohol cetílico para cubrir lagos y embalses en zonas de Australia, Israel y África Oriental. El alcohol cetílico se extiende como una película con un grosor igual al de una molécula, e impide la evaporación del agua sin contaminarla. (Desde luego, la contaminación del agua mediante las aguas fecales y los desperdicios industriales ocasiona un perjuicio adicional a las menguantes reservas de agua potable.) Al parecer, algún día se hará necesario obtener agua potable de los océanos, pues éstos ofrecen un abastecimiento ilimitado para un futuro previsible. Entre los métodos más prometedores de desalinización figuran la destilación y el congelamiento. Por añadidura, se están haciendo experimentos con membranas que seleccionarán las moléculas de agua para darles paso y rechazarán los diversos iones. Reviste tal importancia este problema que la Unión Soviética y los Estados Unidos están proyectando emprender la tarea conjuntamente, cuando resulta tan difícil concertar la cooperación entre esos dos países siempre dispuestos a competir entre sí.

Pero seamos optimistas mientras nos sea posible y no reconozcamos ninguna limitación del ingenio humano. Supongamos que mediante los milagros tecnológicos se decuplica la productividad de la Tierra; supongamos que extraemos los metales del océano, abrimos innumerables pozos petrolíferos en el Sahara, encontramos minas carboníferas en la Antártica, domeñamos la energía de la luz solar y acrecentamos el poder de la fusión. ¿Qué ocurrirá entonces? Si la población humana sigue creciendo sin control al ritmo actual, toda nuestra Ciencia, todos nuestros inventos técnicos, serían equiparables al incansante laborar de Sísifo.

Si alguien no se sintiera muy dispuesto a aceptar esa apreciación pesimista, consideremos por un momento el poder de la progresión geométrica. Se ha calculado que la cantidad total de materia viva sobre la Tierra es igual hoy día a  $2 \times$

$10^{19}$  g. Pues bien, entonces la masa total humana representará aproximadamente 1/100.000 de la masa total de la vida.

Si la población terrestre continúa duplicando su número cada treinta y cinco años (como lo está haciendo ahora) cuando llegue el 2750 A.D., se habrá multiplicado por 100.000. Entonces tal vez resulte extremadamente difícil incrementar la masa de vida como un conjunto que la Tierra pueda soportar (aunque algunas especies puedan multiplicarse siempre a costa de otras). En tal caso, cuando llegue el 2750 A.D., la masa humana abarcará la vida entera y nosotros quedaremos reducidos al canibalismo, si es que hay supervivientes.

Aunque nos sea posible imaginar una producción artificial de alimentos pertenecientes al mundo inorgánico, mediante el cultivo de fermentos, el cultivo hidropónico (crecimiento de las plantas en soluciones químicas) y así sucesivamente, ningún progreso concebible podrá igualar el inexorable desarrollo numérico producido por la duplicación cada treinta y cinco años. A este tenor, en el 2600 A.D. la población alcanzará los 630.000.000.000! Nuestro planeta sólo nos ofrecerá espacio para mantenemos derechos, pues se dispondrá únicamente de 3 cm: por persona en la superficie sólida, incluyendo Groenlandia y la Antártica. Es más, si la especie humana continúa multiplicándose al mismo ritmo, en el 3550 A.D., la masa total de tejido humano será igual a la masa de la Tierra.

Si hay quienes ven un escape en la emigración a otros planetas, tendrán materia suficiente para alimentar esos pensamientos con el siguiente hecho: suponiendo que hubieran 1.000.000.000.000 de planetas habitables en el Universo y se pudiera transportar gente a cualquiera de ellos cuando se estimara conveniente, teniendo presente el actual ritmo del crecimiento cuantitativo, cada uno de esos planetas quedaría abarrotado literalmente y sólo ofrecerían espacio para estar de pie allá por el 5000 A.D. ¡en el 7000 A.D., la masa humana sería igual a la masa de todo el Universo conocido! Evidentemente, la raza humana no puede crecer durante mucho tiempo al ritmo actual, prescindiendo de cuanto se haga respecto al suministro de alimentos, agua, minerales y energía. Y conste que no digo «no querrá», «no se atreverá» o «no deberá»: digo lisa y llanamente «no puede».

A decir verdad, los meros números no serán lo que limiten nuestro crecimiento, si éste prosigue con el mismo ritmo. No será sólo que haya más hombres, mujeres y

niños cada minuto, sino también que cada individuo utilizará (como promedio) más recursos no reintegrables de la Tierra, consumirá más energía, producirá más desperdicios y contaminación cada minuto. Mientras la población continúe duplicándose cada treinta y cinco años como hasta ahora, la utilización de energía se acrecentará en tal medida que al cabo de treinta y cinco años no se duplicará ¡se septuplicará! El ciego afán por desperdiciar y envenenar más y más aprisa cada año nos conduce hacia la destrucción con mayor celeridad incluso que la mera multiplicación. Por ejemplo, los humos producidos por la combustión de carbón y petróleo salen libremente al aire en el hogar y la fábrica, tal como los desperdicios químicos gaseosos de las plantas industriales. Los automóviles por centenares de millones expulsan el humo de la gasolina y los productos resultantes de su desintegración y oxidación, por no mencionar el monóxido de carbono o los compuestos de plomo. Los óxidos de sulfuro de nitrógeno (formados bien directamente o por oxidación ulterior bajo la luz ultravioleta del sol) pueden, juntamente con otras sustancias, corroer los metales, desgastar el material de construcción, agrietar el caucho, perjudicar las cosechas, causar y agravar enfermedades respiratorias e incluso figurar entre las causas del cáncer pulmonar. Cuando las condiciones atmosféricas son tales que el aire sobre una ciudad permanece estático durante cierto tiempo, las materias contaminadoras se aglomeran, ensucian el aire, favorecen la formación de una bruma humosa (*smog*) sobre la cual se hizo publicidad por vez primera en Los Ángeles, aunque ya existía desde mucho tiempo atrás en numerosas ciudades y hoy día existe en muchas más. Mirándolo desde su aspecto más nocivo, puede arrebatar millares de vidas entre aquellas personas cuya edad o enfermedad les impide tolerar esa tensión adicional en sus pulmones. Han tenido lugar desastres semejantes en Donora (Pennsylvania), en 1948, y en Londres, en 1952.

Los desperdicios químicos contaminan el agua potable de la Tierra, y algunas veces ocasionan la noticia dramática. Así, por ejemplo, en 1970 se comprobó que los compuestos de mercurio vertidos con absoluta inconsciencia en las aguas mundiales se habían abierto camino hasta los organismos marinos, a veces en cantidades peligrosas.

A este paso, el océano dejará de ser para nosotros una fuente alimentaria ubérrima, pues habremos hecho ya un buen trabajo preliminar para envenenarlo por completo.

El uso desmedido de pesticidas persistentes ocasiona primero su incorporación a las plantas y luego a los animales. Debido a este envenenamiento progresivo, los pájaros encuentran cada vez más dificultades para formar normalmente las cáscaras de sus huevos; tanto es así que nuestro ataque contra los insectos amenaza con la extinción al halcón peregrino.

Prácticamente, cada uno de los llamados avances tecnológicos - concebidos apresurada e irreflexivamente para superar a los competidores y multiplicar los beneficios- suele crear dificultades. Los detergentes sintéticos vienen sustituyendo a los jabones desde la Segunda Guerra Mundial. Entre los ingredientes importantes de esos detergentes hay varios fosfatos que disueltos en el agua facilitan y aceleran prodigiosamente el crecimiento de microorganismos, los cuales consumen el oxígeno del agua causando así la muerte de otros organismos acuáticos. Esos cambios deletéreos del hábitat acuático («eutroficación») están produciendo el rápido envejecimiento, por ejemplo, de los Grandes Lagos -sobre todo, el poco profundo lago Erie- y abreviando su vida natural en millones de años. Así, el lago Erie será algún día la ciénaga Erie, mientras que el pantano de Everglades se desecará totalmente.

Las especies vivientes son interdependientes a ultranza. Hay casos evidentes como la conexión entre plantas y abejas, donde las abejas polinizan las plantas y éstas alimentan a las abejas, y millones de otros casos menos evidentes. Cada vez que la vida facilita o dificulta las cosas a una especie determinada, docenas de otras especies sufren las repercusiones... Algunas veces de forma difícilmente previsible. El estudio de esas interconexiones vitales, la ecología, no ha despertado hasta ahora el interés general, pues en muchos casos la Humanidad, en su afán por obtener ganancias a corto plazo, ha alterado la estructura ecológica hasta el punto de crear graves dificultades a largo plazo. Es preciso aprender a explorar el terreno concienzudamente antes de saltar.

Incluso se hace necesario reflexionar con cordura sobre un asunto tan exótico aparentemente como es la cohetería. Un solo cohete de gran tamaño puede inyectar

gases residuales por centenares de toneladas en la atmósfera más allá de los 155 km. Esas cantidades pueden alterar apreciablemente las propiedades de la tenue atmósfera superior y desencadenar cambios climáticos imprevisibles. Hacia 1971 se propuso emplear gigantescos aviones comerciales supersónicos (SST) cuyas trayectorias atravesarían la estratosfera para permitirles viajar a velocidades superiores a la del sonido. Quienes se oponen a su utilización no sólo citan el factor «ruido» debido a las explosiones sónicas, sino también la posibilidad de una contaminación que podría perturbar el clima.

Otro elemento que da aún peor cariz al desarrollo cuantitativo, es la distribución desigual del género humano en la superficie terrestre. Por todas partes se tiende al apiñamiento dentro de las áreas urbanas. En los Estados Unidos, donde la población crece sin cesar, los Estados agrícolas no sólo participan en la explosión, sino que también están perdiendo pobladores. Se calcula que la población urbana del globo terráqueo se duplica no cada treinta y cinco años, sino cada once años. En el 2005 A.D., cuando la población total del globo terráqueo se haya duplicado, la población metropolitana habrá aumentado, a este ritmo, más de nueve veces.

Eso es inquietante. Hoy estamos presenciando ya una dislocación de las estructuras sociales, una dislocación que se acentúa en aquellas naciones progresivas donde la urbanización es más aparente. Dentro de esos países hay una concentración exorbitante en las ciudades, destacando especialmente sus distritos más populosos. Es indudable que cuando el hacinamiento de los seres vivientes rebasa ciertos límites, se manifiestan muchas formas de comportamiento patológico. Así se ha verificado mediante los experimentos de laboratorio con ratas: la Prensa y nuestra propia experiencia nos convencen de que ello es también aplicable a los seres humanos.

Así pues, parece evidente que *si las actuales tendencias prosiguen sin variación su camino*, las estructuras sociales y tecnológicas del mundo se vendrán abajo dentro del próximo medio siglo con derivaciones incalculables. La Humanidad, en su desenfrenado enloquecimiento, puede recurrir al cataclismo postrero, la guerra termonuclear.

Pero. ¿proseguirán las actuales tendencias?

Indudablemente su cambio requerirá un gran esfuerzo general, lo cual significa que también será preciso cambiar unas creencias veneradas desde lejanas fechas. Durante casi toda la historia del hombre, éste ha vivido en un mundo donde la vida era breve y muchos niños morían en plena lactancia todavía. Para que no se extinguiera la población tribal, cada mujer debía engendrar tantos hijos como pudiera. Por esa razón se deificaba la maternidad y se estigmatizaba toda propensión tendente a reducir el índice de natalidad. Se restringía la posición social de las mujeres reduciéndolas a máquinas procreadoras y de crianza. Se supervisaba estrictamente la vida sexual aprobándose tan sólo aquellas acciones que culminasen con la concepción; todo lo demás se conceptuaba como perversión pecaminosa.

Pero ahora vivimos en un mundo superpoblado. Si hemos de evitar la catástrofe, será preciso considerar la maternidad como un privilegio muy especial otorgado con restricción. Deben evolucionar nuestras opiniones sobre el sexo y su asociación al alumbramiento.

Por otra parte, los problemas del mundo -los problemas verdaderamente serios- tienen carácter global. Los peligros inherentes a la superpoblación, la supercontaminación, la desaparición de recursos, el riesgo de guerra nuclear, afectan a cada nación y no podrá haber soluciones auténticas mientras no cooperen todos los países. Esto significa que una nación no puede seguir marchando sola por su propio camino desentendiéndose de las demás; las naciones no pueden continuar actuando con arreglo a la suposición de que hay una cosa llamada «seguridad nacional», según la cual algo bueno les sucederá a ellas si les sucede algo malo a las demás. En suma, se requiere urgentemente un gobierno mundial.

La Humanidad se orienta hacia ese fin (muy a pesar suyo en muchos casos), pero la cuestión es saber si el movimiento se consumará con la suficiente rapidez.

Nada más lejos de mi intención que dar una impresión de desesperanza, como si el género humano se hubiese metido en un callejón sin salida del cual ya no hubiera escape.

Una posible fuente de optimismo es la inminente revolución en materia de comunicaciones. Tal vez los satélites de comunicaciones, con su continua multiplicación, posibiliten, en un próximo futuro, la correspondencia entre cada persona y todas las demás. Entonces los países subdesarrollados se ahorrarán la

necesidad de instalar una red antigua de comunicaciones con las consiguientes inversiones de capital, y se incorporarán directamente a un mundo de donde cada ser humano tenga su propia estación de televisión, por así decirlo, para recibir y emitir mensajes.

Así, el mundo se empequeñecerá considerablemente hasta parecer, por su estructura social, una especie de pueblo donde todos se conozcan. (Por cierto, que se ha empleado la expresión «pueblo global» para describir la nueva situación.) La pedagogía podrá llegar hasta los últimos rincones de ese pueblo global gracias a la ubicuidad de la Televisión. La nueva generación de cada país subdesarrollado crecerá aprendiendo los métodos modernos del agro, el uso apropiado de los fertilizantes y pesticidas y las técnicas para controlar la natalidad.

Tal vez se profile incluso, por primera vez en la historia terrestre, una tendencia hacia la descentralización. Mediante la omnipresente televisión todos los lugares del mundo se beneficiarán por igual de las conferencias comerciales, las bibliotecas y los programas culturales, y como resultado no será tan necesario aglomerarlo todo para formar una masa inmensa y decadente.

¿Quién sabe, pues? La catástrofe parece haber cobrado ventaja, pero quizás no haya concluido todavía la carrera hacia la salvación.

Suponiendo que se gana esa carrera hacia la salvación, que los niveles de la población se estabilicen y dé comienzo un lento decrecimiento humano, que se instituya un gobierno Mundial efectivo y sensato, que tolere la diversidad local, pero no el crimen local, que se atienda a la estructura ecológica y se preserve sistemáticamente la Tierra... ¿cuál será entonces nuestro rumbo?

Por lo pronto, el hombre continuará extendiendo su radio de acción. Habiendo comenzado como un homínido primitivo en el África Oriental -inicialmente su difusión y sus éxitos serían tal vez similares a los del gorila, actual-, se extendió con parsimonia hasta que, hace quince mil años, colonizó toda la «isla mundial» (Asia, África y Europa). Luego dio el salto a las Américas, Australia y, por último, las islas del Pacífico. Llegado el siglo XX, la población siguió siendo escasa en áreas particularmente ingratas -tales como el Sahara, el desierto arábigo y Groenlandia-, pero ninguna zona de tamaño medio estuvo deshabitada salvo la Antártica. (Hoy

día, las estaciones científicas por lo menos se han instalado permanentemente en el más inhabitable de los continentes.) ¿Qué hacer a continuación?

Una respuesta posible es el mar. Fue precisamente en el mar donde se originó la vida, donde mejor florece todavía en términos puramente cuantitativos. Cada especie de animal terrestre, exceptuando los insectos, ha intentado experimentalmente el retorno al mar, atraída por sus reservas alimentarias relativamente inagotables y por la relativa uniformidad del medio. Entre los mamíferos, el ejemplo de la nutria, la foca o la ballena denotan unas fases progresivas de readaptación al medio acuático.

¿Podría retornar el hombre al mar, no mediante un cambio evolutivo de su cuerpo, lo cual requeriría una transformación demasiado lenta, sino con la ayuda rápida y eficaz del progreso tecnológico? Encerrado entre las paredes metálicas de submarinos y batiscafos, ha descendido ya hasta las mayores profundidades oceánicas.

Para el sumergimiento a cuerpo descubierto se requiere mucho menos. En 1943, el oceanógrafo francés Jacques-Ives Cousteau inventó el pulmón acuático. Este artefacto aporta oxígeno a los pulmones humanos desde un cilindro de aire comprimido, que el usuario lleva cargado a la espalda para practicar el moderno deporte del buceo «scuba» («scuba» es un monograma imperfecto de «self-contained underwater-breathing apparatus» es decir, aparato autónomo para la respiración submarina). Esto posibilita la permanencia del hombre bajo el agua durante largos períodos y, completamente desnudo, por así decirlo, sin necesidad de encajonarse en naves submarinas ni cubrirse siquiera con ropas.

Cousteau promocionó asimismo la construcción de viviendas submarinas, donde el hombre pudiera permanecer sumergido durante períodos más largos todavía. Por ejemplo, en 1964, dos individuos vivieron durante dos días en una tienda provista con aire a 130 m bajo el nivel del mar. (Uno fue John Lindbergh, hijo del aviador.) El hombre ha vivido ya varias semanas bajo el agua a menores profundidades.

Aún reviste más espectacularidad el acontecimiento ocurrido a principios de 1961. Por aquellas fechas, el biólogo Johannes A. Kylstra, de la Universidad de Leiden, empezó a hacer experimentos con el «agua respirable» empleando mamíferos. Al fin y al cabo, el pulmón y las branquias funcionan de la misma forma, si bien las

branquias se han adaptado para trabajar en niveles inferiores de oxigenación. Kylstra elaboró una solución acuosa suficientemente parecida a la sangre del mamífero para evitar lesiones del tejido pulmonar, y luego la oxigenó a fondo. Comprobó que tanto los ratones como los perros podían respirar ese líquido durante períodos prolongados sin sufrir aparentemente daño alguno.

Los hámsteres se mantienen vivos bajo el agua corriente si se les envuelve con una fina hoja de silicona, que deja pasar el oxígeno del agua hasta el hámster y el anhídrido carbónico del hámster hasta el agua. Esa membrana es virtualmente una branquia artificial. Con tales avances y otros ya en proyecto, el hombre puede mirar hacia un futuro prometedor. ¿Le será posible entonces permanecer bajo el agua durante períodos indefinidos y convertir toda la superficie del planeta -tierra y mar- en morada suya?

Y ¿qué decir del espacio exterior? ¿Necesita mantenerse el hombre sobre su planeta natal o puede aventurarse en otros mundos?

Apenas puesto en órbita el primer satélite el año 1957, se pensó, como es natural, que el sueño de los viajes espaciales, realizado solamente hasta entonces en las novelas de ciencia-ficción, podría llegar a ser una realidad, y, efectivamente, se dejaron transcurrir tan sólo tres años y medio tras el lanzamiento del *Sputnik I*, para dar el primer paso.

El 12 de abril de 1961, el cosmonauta soviético Yuri Alexeievich Gagarin fue situado en órbita y regresó de su aventura sano y salvo. Tres meses después, el 6 de agosto, otro cosmonauta soviético, Germán Stepánovich Títov, trazó 17 órbitas antes de volver a la Tierra, pasando 24 horas en vuelo libre. El 20 de febrero de 1962, los Estados Unidos colocaron su primer hombre en órbita: el astronauta John Herschel Glenn circunvoló tres veces la Tierra.

También hubo una mujer -la cosmonauta soviética Valentina V. Tereshkova-, que fue lanzada el 16 de junio de 1963. Permaneció en vuelo libre durante 71 horas describiendo un total de 17 órbitas.

Otros cohetes han partido de la Tierra transportando dos y tres hombres juntos. El primer lanzamiento de ese tipo se hizo con los cosmonautas soviéticos Vladimir M. Komarov, Konstantin P. Feokstistov y Boris G. Yegorov el 12 de octubre de 1964.

Los americanos lanzaron a Virgil I. Grissom y John W. Young, en el primer cohete «multitripulado» estadounidense, el 23 de marzo de 1965.

El hombre que abandonó su astronave y salió al espacio fue el cosmonauta soviético Alexei A. Leonov, quien realizó la hazaña el 18 de marzo de 1965. El astronauta americano Edward H. White emuló ese «paseo espacial» el 3 de junio de 1965.

Aunque casi todas las «primicias» espaciales en 1965 corrieron a cargo de los soviéticos, desde aquella fecha los americanos tomaron la delantera. Vehículos tripulados maniobraron en el espacio, dándose cita allí, acoplando sus cápsulas, distanciándose cada vez más.

Pese a todo, el programa espacial no siguió adelante sin los inevitables holocaustos. En enero de 1967, tres astronautas americanos -Grissom, White y Roger Chaffee- murieron en tierra, víctimas de un incendio que estalló en su cápsula espacial durante una prueba rutinaria. Más tarde, el 23 de abril de 1967, Komarov murió al fallar su paracaídas durante el retorno. Fue el primer muerto en el curso de un vuelo espacial.

Aquellas tragedias retrasaron los planes americanos para alcanzar la Luna mediante naves con tres tripulantes (programa «Apolo»); se prefirió diseñar nuevamente las cápsulas espaciales para darles mayor seguridad, pero no se renunció a esos planes. El 11 de octubre de 1968 se lanzó el primer vehículo Apolo tripulado, *Apolo VII*; una tripulación de tres hombres bajo el mando de Walter M. Schirra. El *Apolo VIII*, lanzado el 21 de diciembre de 1968 al mando de Frank Borman, se aproximó a la Luna y la circunvoló a corta distancia. El *Apolo X* (18 de mayo de 1969) se aproximó también a la Luna, destacó el módulo lunar hasta unos 15 km de la superficie lunar.

Por último, el 16 de julio de 1969, se lanzó el *Apolo XI* al mando de Neil A. Armstrong. El 20 de julio, Armstrong fue el primer ser humano que pisó el suelo de otro mundo.

Desde entonces se lanzaron varios vehículos Apolo. Tres de ellos, los *Apolo XII*, *XIII* y *XIV* cumplieron sus misiones con extraordinario éxito. El *Apolo XIII* tuvo averías en el espacio y tuvo que regresar sin llevar a cabo el alunizaje, pero regresó incólume, sin pérdida de vidas.

El programa espacial soviético no ha incluido todavía los vuelos de astronaves tripuladas a la Luna. No obstante, el 12 de septiembre de 1970, se proyectó una nave no tripulada hacia la Luna. El artefacto alunizó suavemente, recogió muestras del terreno, rocas, y las trajo a la Tierra sin dificultad. Más tarde, un vehículo automático soviético alunizó y evolucionó durante varios meses por la superficie lunar mediante control remoto, enviando datos sin cesar.

¿Qué hay acerca del futuro? El programa espacial ha sido muy costoso y ha tropezado con la resistencia creciente de ciertos científicos que lo juzgan demasiado tendente a las relaciones públicas y poco científico, o de quienes estiman que eclipsa otros programas cuya importancia científica es mucho mayor. Se ha encontrado también con la oposición creciente del gran público, que lo considera demasiado caro, sobre todo si se tienen en cuenta los acuciantes problemas sociológicos de la Tierra.

No obstante, el programa espacial proseguirá probablemente su marcha, aunque a paso más lento; y si la Humanidad ideara algún procedimiento para gastar menos energías y recursos en la locura suicida de una guerra, sería muy probable que el programa incluso se acelerase. Se han forjado ya planes para establecer estaciones espaciales (grandes vehículos trazando órbitas más o menos duraderas alrededor de la Tierra y con suficiente capacidad para alojar un número crecido de hombres y mujeres durante extensos períodos) que permitan hacer observaciones y experimentos cuyos resultados serán presuntamente muy valiosos. Se diseñarán también astronaves menores para los viajes de enlace.

Se espera que las futuras visitas al satélite culminen con el establecimiento de colonias más o menos permanentes, y asimismo es de esperar que éstas puedan explotar los recursos lunares y prescindan del auxilio cotidiano desde la Tierra.

Ahora bien, ¿será posible ir más allá de la Luna? Teóricamente no hay impedimentos, pero los vuelos al siguiente mundo cuyo suelo se pueda pisar. Marte (Venus, aunque más cercano, tiene temperaturas excesivas para una astronave tripulada), no requerirán días como en el caso de la Luna, sino meses. Y para pasar esos meses, el hombre necesitará llevar consigo un medio ambiente donde pueda vivir.

El hombre ha adquirido ya alguna experiencia en ese terreno al descender a las profundidades oceánicas con submarinos y recipientes herméticos, como el batiscafo. A semejanza de esos viajes, se internará en el espacio con una gran burbuja de aire encerrada dentro de una resistente envoltura metálica, llevará consigo alimentos, agua y otros elementos necesarios para el viaje. Pero la salida al espacio se complicará enormemente con el problema de la irresistible gravedad. En la nave espacial se dedicará una gran proporción del peso y del volumen a la maquinaria y el combustible; por consiguiente, la «carga útil» de tripulación y provisiones será al principio mínima.

Las vituallas deberán ser sumamente compactas: allí no habrá lugar para ningún alimento indigesto. El alimento artificial condensado podría estar compuesto por los siguientes elementos: lactosa, aceite vegetal digerible, mezclas apropiadas de aminoácidos, vitaminas, minerales con algo de condimento, y todo ello embalado en una caja minúscula de hidratos de carbono comestible. Una caja semejante, que contuviera 180 g de alimentos sólidos, bastaría para una comida. Tres cajas proporcionarían 3.000 calorías. A esto se debería agregar un gramo de agua por caloría (entre 2,5 y 3 litros diarios por persona); una parte podría mezclarse con el alimento para hacerlo más apetecible, lo cual requeriría una caja de mayor tamaño. Por añadidura, la nave debería transportar oxígeno respirable en la proporción de un litro (1.150 g) en forma líquida, por día y persona.

Así pues, las provisiones diarias para cada persona serían: 540 g de alimento seco, 2.700 g de agua y 1.150 g de oxígeno: Total: 4.390 g. Imaginemos ahora un viaje a la Luna, que requiriera una semana de ida, otra de vuelta y dos días para explorar la superficie lunar. Cada tripulante necesitará llevar 68 kg de alimentos, agua y oxígeno.

Con los niveles actuales de la tecnología, eso será factible probablemente.

Para una expedición de ida y vuelta a Marte, las necesidades serían infinitamente mayores. Un viaje semejante duraría dos años y medio, incluyendo una estancia de espera en Marte hasta que las posiciones orbitales planetarias llegasen a la fase favorable para emprender el regreso. Partiendo de esa base, el viaje requeriría unas cinco toneladas de alimentos, agua y oxígeno por tripulante.

El transporte de semejante carga en una nave espacial es impracticable en las actuales condiciones tecnológicas.

La única solución razonable para tan largo viaje es prestar autonomía a la nave espacial, tal como la Tierra -ella misma una «nave» masiva surcando los espacios- es autónoma. Será preciso regenerar hasta el infinito, mediante reiterativos sistemas cílicos, los alimentos, el agua y el aire que se lleven al partir. Ya se ha elaborado en teoría esos «sistemas cerrados». La regeneración de los desperdicios tienen un sabor desagradable, pero éste es, al fin y al cabo, el proceso que mantiene la vida sobre la Tierra. Los filtros químicos a bordo de la nave podrían almacenar el anhídrido carbónico y el vapor de agua exhalado por los tripulantes; mediante la destilación y otros procesos se podría recuperar la urea, la sal y el agua de la orina y los excrementos; mediante la luz ultravioleta se esterilizarían los residuos fecales secos que, junto con el anhídrido carbónico y el agua, servirían para alimentar a las algas cultivadas en tanques. Mediante la fotosíntesis... estas algas convertirían el anhídrido carbónico y los compuestos nitrogenados de las heces en alimento orgánico -más oxígeno- para la tripulación. Lo único que se requeriría del exterior sería energía para los diversos procesos, incluida la fotosíntesis; pero el propio Sol la facilitaría.

Se ha calculado que una cantidad comparativamente insignificante -113 kg de algas por individuo- abastecería de alimentos y oxígeno a la tripulación durante un período indefinido. Añadiendo a eso el equipo necesario para tales manipulaciones, se tendría un peso total de provisiones por tripulante de 159 kg quizá, pero desde luego no más de 453 kg. Asimismo, se han hecho experimentos con sistemas donde se emplean bacterias consumidoras de hidrógeno. Éstas no requieren luz, simplemente hidrógeno, obtenible mediante la electrólisis del agua. Según los informes presentados, esos sistemas son mucho más eficaces que los organismos sintetizadores.

A parte de los problemas planteados por el abastecimiento, existen también los de la prolongada ingravidez. Diversos individuos han vivido varias semanas de continua ingravidez sin sufrir daños permanentes, pero las perturbaciones menores han sido lo bastante numerosas para convertir la ingravidez prolongada en un factor inquietante. Por fortuna, existen medios de contrarrestar sus efectos. Por ejemplo,

una lenta rotación de la nave espacial produce cierta sensación de peso en virtud de la fuerza centrífuga que actúa ahí como fuerza gravitatoria.

Más serios y menos evitables son los riesgos de la gran aceleración y la súbita deceleración que los viajeros espaciales deberán soportar sin remedio en el despegue y aterrizaje de los cohetes.

Se denomina  $1\ g$  a la fuerza normal de gravedad en la superficie terrestre. La ingravidez es  $0\ g$ . Una aceleración (o deceleración) que duplique el peso del cuerpo será  $2\ g$ ; si lo triplica,  $3\ g$ , y así sucesivamente.

La posición del cuerpo durante la aceleración es esencial. Si uno sufre esa aceleración con la cabeza hacia delante (o la deceleración con los pies hacia delante), la sangre escapará de su cabeza. Esto acarrearía la pérdida de conocimiento si la aceleración es suficientemente elevada (digamos,  $6\ g$  durante cinco segundos). Por otra parte, si se sufre la aceleración con los pies hacia delante (llamada «aceleración negativa» en contraposición a la «positiva» con la cabeza hacia delante) la sangre acude de golpe a la cabeza. Esto es más peligroso, porque la exagerada presión puede romper vasos sanguíneos en los ojos o el cerebro. Los investigadores de la aceleración lo denominan *redout*. Una aceleración de  $2\frac{1}{2}\ g$ , durante 10 segundos, basta para lesionar varios vasos.

Así pues, la posición más conveniente para resistir tales efectos es la «transversal»: así se aplica la aceleración en ángulo recto al eje longitudinal del cuerpo. Varios individuos han resistido aceleraciones transversales de  $10\ g$  durante dos minutos en una cámara centrífuga sin perder el conocimiento.

En los períodos, más breves, la tolerancia será mucho mayor. El coronel John Paul Stapp y otros voluntarios mostraron una asombrosa resistencia al soportar elevadas deceleraciones  $g$  en la pista de pruebas de la base aérea de Holloman, en Nuevo México. En su famosa carrera del 10-12-1954, Stapp soportó una deceleración de  $25\ g$  durante un segundo aproximadamente. Su deslizador, lanzado a 372 km por hora, se detuvo bruscamente al cabo de 1,4 segundos. Según se calculó, eso era lo mismo que lanzarse con un automóvil contra una pared a 190 km por hora! Desde luego, Stapp marchó bien sujeto con correas y tirantes al deslizador para reducir en lo posible las probabilidades de lesiones. Sólo sufrió algunas contusiones y un doloroso trauma en la cara que le amorató los dos ojos.

Al despegar, el astronauta puede absorber (durante un breve lapso) hasta  $6,5\ g$ , y en el retorno,  $11\ g$  como máximo.

Artificios tales como divanes amoldables al cuerpo o correajes y quizás, incluso, inmersión en una cápsula llena de agua o indumentaria espacial, proporcionan suficiente margen de seguridad contra las poderosas fuerzas  $g$ .

Se han emprendido estudios y experimentos similares sobre los riesgos de la radiación, el tedio producido por un prolongado aislamiento, la extraña experiencia de encontrarse en un espacio insonoro donde nunca anocchece y otras condiciones atemorizantes que han de soportar los aviadores espaciales. A pesar de todo, quienes se preparan para la primera expedición humana lejos del planeta natal no parecen arredrarse ante los obstáculos.

## Capítulo 16

### LA MENTE

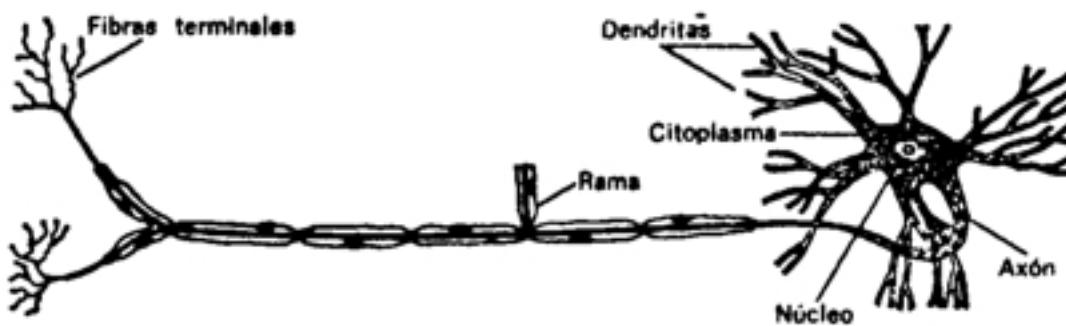
#### El Sistema Nervioso

Hablando en términos físicos, el ser humano es un ente que, a diferencia de otros organismos, realmente llama poco la atención. No puede competir en fuerza con la mayor parte de los otros animales de su tamaño, camina torpemente cuando se le compara, digamos, con el gato; no puede correr como el perro y el gamo; por lo que respecta a su visión, oído y sentido del olfato, es inferior a un cierto número de otros animales. Su esqueleto está mal adaptado a su postura eructa: el ser humano es probablemente el único animal que sufre lumbago a causa de su postura y actividades normales. Cuando pensamos en la perfección evolutiva de otros organismos -la maravillosa capacidad del pez para nadar o del ave para volar, la enorme fecundidad y adaptabilidad de los insectos, la perfecta simplicidad y eficacia del virus-, el hombre parece, por supuesto, una criatura desgarbada y pobemente constituida. Como organismo, apenas puede competir con las criaturas que ocupan cualquier nicho ecológico específico en la Tierra. No obstante, ha conseguido dominar este planeta gracias únicamente a una especialización bastante importante: su cerebro.

Una célula es sensible a un cambio en su medio ambiente («estímulo») y reacciona de forma apropiada («reapuesta»). Así, un protozoo nadará hacia una gota de una solución de azúcar depositada en el agua a su alrededor, o se alejará de una gota de ácido. Ahora bien, este tipo directo y automático de respuesta es adecuado para una sola célula, pero significaría el caos para una agrupación de células. Cualquier organismo constituido por un cierto número de células debe tener un sistema que coordine sus respuestas. Sin tal sistema, sería semejante a una ciudad con personas recíprocamente incomunicadas y que actuarán en virtud de objetivos contrapuestos. Así, ya los celentéridos, los animales multicelulares más primitivos, tienen los rudimentos de un sistema nervioso. Podemos ver en ellos las primeras células nerviosas («neuronas»), células especiales con fibras que se extienden desde el cuerpo celular y que emiten ramas extraordinariamente finas.

El funcionamiento de las células nerviosas es tan sutil y complejo que, incluso a este nivel simple, nos hallamos ya algo desbordados cuando intentamos explicar lo que

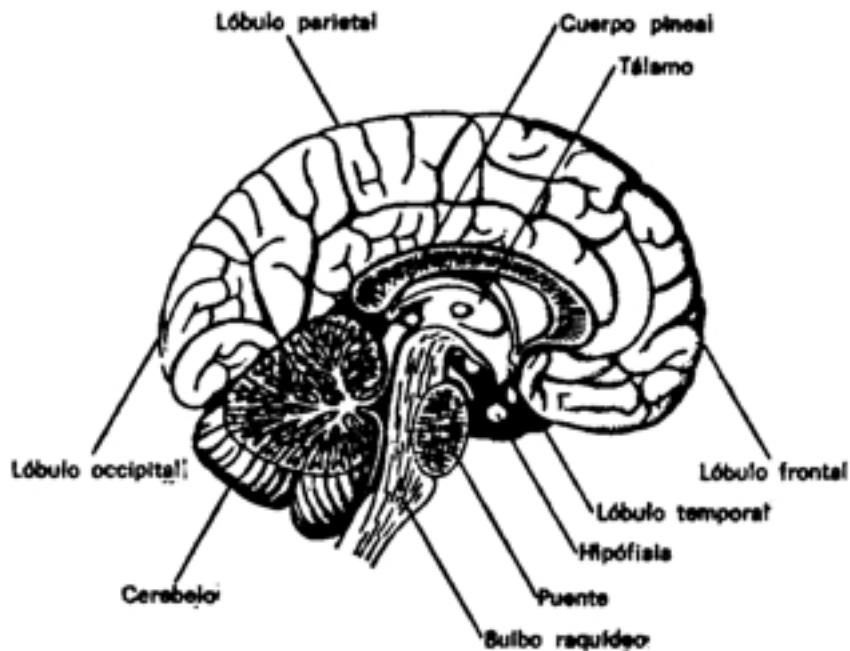
realmente ocurre. De alguna manera aún no comprendida, un cambio en el medio ambiente actúa sobre la célula nerviosa. Puede tratarse de un cambio en la concentración de alguna sustancia, en la temperatura, en la cantidad de luz, o en el movimiento del agua, o bien puede entrar en contacto real con algún otro objeto. Cualquiera que sea el estímulo, la neurona emite un «impulso» que corre a lo largo de la fibra nerviosa; en el extremo de la fibra el impulso salta una delgada hendidura («sinapsis») y alcanza la próxima célula nerviosa; y de este modo se transmite de una célula a la siguiente. En el caso de un celentérido, tal como la medusa, el impulso es transmitido por todo el organismo. La medusa responde contrayendo alguna parte o la totalidad de su cuerpo. Si el estímulo es un contacto con una partícula de alimento, el organismo la incorpora por contracción de sus tentáculos.



### Célula nerviosa.

Todo esto ocurre, por supuesto, de forma totalmente automática, pero, ya que representa una ventaja para la medusa, deseamos ver una finalidad en el comportamiento de este organismo. Realmente, el ser humano, como criatura que se comporta con vistas a la consecución de un objetivo, es decir, con una motivación, naturalmente tiende a atribuir una finalidad incluso a la naturaleza inanimada. Los científicos denominan a esta actitud «teleología», e intentan evitar cuanto pueden esa forma de pensar y hablar. Pero, al descubrir los resultados de la evolución, es tan conveniente hablar en términos del desarrollo hacia el logro de una mayor eficacia, que incluso los científicos, salvo los puristas más fanáticos, ocasionalmente caen en la teleología. (Los lectores de este libro ya habrán

apreciado, por supuesto, que a menudo he incurrido en esta falta.) Sin embargo, permítasenos evitar la actitud teleológica, al considerar el desarrollo del sistema nervioso y del cerebro. La Naturaleza no ha ideado el cerebro; éste es el resultado de una larga serie de accidentes evolutivos, por así decirlo, que lograron producir caracteres que representaban una mejora en cada etapa y proporcionaban ventajas al organismo que los poseía. En la lucha por la supervivencia, un animal que sea más sensible a los cambios del medio ambiente que sus competidores, y pueda responder a ellos más deprisa, se verá favorecido por la selección natural. Si, por ejemplo, un animal logró poseer una, mancha sobre su cuerpo que era excepcionalmente sensible a la luz, esta ventaja fue tan grande que la evolución hacia el desarrollo de manchas oculares, y eventualmente de ojos, resultó ser la consecuencia inevitable.



### *Cerebro humano.*

En los platelmintos comienzan a aparecer grupos especializados en células que forman «órganos de los sentidos» rudimentarios. Además, los platelmintos también muestran los rudimentos de un sistema nervioso que evita emitir indiscriminadamente impulsos nerviosos a través del cuerpo, pero que, en cambio, los transmite hasta los puntos críticos de respuesta. La estructura desarrollada que

realiza esta función es una médula neutral central. Los platelmintos son los primeros que han desarrollado un «sistema nervioso central».

Esto no es todo. Los órganos de los sentidos de los platelmintos están localizados en su extremo cefálico, la primera parte de su cuerpo que se pone en relación con el medio ambiente cuando se desplaza, y así, naturalmente, la médula neural se halla particularmente bien desarrollada en la región cefálica. La pequeña masa desarrollada es el rudimento de un cerebro.

Gradualmente aparecen nuevos caracteres a medida que se incrementa la complejidad de los grupos. Los órganos de los sentidos aumentan en número y sensibilidad. La médula neural y sus ramas aumentan en complejidad, desarrollando un sistema extenso de células nerviosas aferentes, que conducen los mensajes hacia la médula neural, y eferentes, que transmiten los mensajes hacia los órganos de respuesta. Las agrupaciones o núcleos de células nerviosas en las vías de entrecruzamiento, en el seno cerebral, se hacen cada vez más complicadas. Las fibras nerviosas adquieren formas que pueden transportar los impulsos con mayor rapidez. En el calamar, el animal más ampliamente desarrollado de los no segmentados, esta rápida transmisión se logra gracias al aumento de espesor de la fibra nerviosa. En los animales segmentados, la fibra desarrolla una vaina de material lipídico («mielina»), que incluso es más eficaz para aumentar la velocidad del impulso nervioso. En el ser humano, algunas fibras nerviosas pueden transmitir el impulso a cien metros por segundo (aproximadamente 360 km por hora), mientras que esta velocidad es aproximadamente de solo 16 m por hora en algunos de los invertebrados.

Los cordados introducen un cambio radical en la localización de la médula neural. En ellos, este tronco nervioso principal (conocido mejor como médula espinal) corre a lo largo de la parte dorsal en vez de la ventral, que es lo que ocurre en todos los animales inferiores. Esto puede parecer un retraso -el situar la médula espinal en una región más expuesta-. Pero los vertebrados tienen la médula espinal bien protegida, en el interior de la columna ósea vertebral. La columna vertebral, aunque su primera función es la de proteger la médula espinal, produjo sorprendentes ventajas, pues sirvió como una visa sobre la que los cordados pudieron colgar masa y peso. Desde la columna vertebral pudieron extenderse las costillas, con las que se

cierra el tórax, los maxilares, con los dientes para masticar, y los huesos largos que forman las extremidades.

El cerebro de los cordados se desarrolla a partir de tres estructuras, que ya se hallan presentes de una forma rudimentaria en los vertebrados más primitivos. Estas estructuras, que al principio eran simples expansiones de tejido nervioso, son el «cerebro anterior», el «cerebro medio» y el «cerebro posterior», división señalada, por vez primera, por el anatomista griego Erasístrato de Quíos, aproximadamente 280 años a. de J.C. En el extremo cefálico de la médula espinal, ésta aumenta ligeramente de espesor y forma la parte posterior del cerebro conocida como «bulbo raquídeo». Por detrás de esta sección, en casi todos los cordados primitivos existe una extensión denominada el «cerebelo» («cerebro pequeño»). Por delante de éste se encuentra el cerebro medio. En los vertebrados inferiores, el cerebro medio se halla relacionado, sobre todo, con la visión y tiene un par de lóbulos ópticos, mientras que el cerebro anterior se halla relacionado con el olfato y el gusto y contiene los lóbulos olfatorios. El cerebro anterior, yendo de delante hacia atrás, se halla dividido en la sección de los lóbulos olfatorios, el «cerebro» y el «tálamo», cuya porción más inferior es el «hipotálamo». (El cerebro, palabra de origen latino, al menos en el ser humano, es la parte más grande e importante del órgano.) Eliminando el cerebro de animales y observando los resultados, el anatomista francés Marie-Jean-Pierre Flourens demostró, en 1824, que era precisamente el cerebro el responsable de la actividad intelectual y de la voluntad. El revestimiento del cerebro, denominado corteza cerebral, es el componente de más importancia. En los peces y anfibios, éste simplemente se halla representado por una delgada capa (denominada *pallium* o manto). En los reptiles aparece una nueva capa de tejido nervioso, llamado *neopallium* («manto nuevo»). Es el verdadero precursor de las estructuras que aparecen más tarde en el proceso evolutivo. Eventualmente se hace cargo del control de la visión y otras sensaciones. En los reptiles, el centro integrador para los mensajes visuales ya se ha desplazado, en parte, desde el cerebro medio al cerebro anterior; en las aves se completa esta traslación. Se extiende virtualmente por toda la superficie del cerebro. Al principio persiste como un delgado revestimiento, pero a medida que crece en los mamíferos superiores, su superficie se hace mucho mayor que la del cerebro, por lo que

experimenta inflexiones o «circunvoluciones». Este plegamiento es responsable de la complejidad y capacidad del cerebro de los mamíferos superiores, en especial del ser humano.

A medida que se avanza en esta dirección del desarrollo de las especies, el cerebro adquiere una importancia cada vez mayor, llegando a constituir el principal componente del encéfalo. El cerebro medio o mesencéfalo se reduce considerablemente de tamaño. En el caso de los primates, en los que el sentido de la vista se ha perfeccionado a expensas del sentido del olfato, los lóbulos olfatorios del cerebro anterior se han reducido a simples bulbos. En esta fase evolutiva, el cerebro se ha extendido ya sobre el tálamo y el cerebelo. Incluso los primeros fósiles homínidos tenían encéfalos mucho mayores que los monos más evolucionados. Mientras que el cerebro del chimpancé o del orangután pesa menos de 400 g, y el gorila, de dimensiones mucho mayores que el ser humano, tiene un cerebro que pesa por término medio 540 g, el cerebro del *Pithecanthropus* pesaba unos 850 a 1.000 g, y éste fue un homínido «poco inteligente». El cerebro del hombre de Rhodesia pesaba unos 1.300 g; el cerebro del hombre del Neandertal y del moderno *Homo sapiens* pesaban unos 1.500 g. El mayor desarrollo mental del hombre moderno con respecto al hombre del Neandertal parece obedecer al hecho de que en el primero una mayor proporción de su cerebro se halla concentrada en las regiones anteriores de este órgano, que al parecer controlan los aspectos más superiores de la función mental. El hombre de Neandertal tenía frente estrecha, con la masa cerebral desplazada hacia las regiones posteriores del cráneo, mientras que, por el contrario, el hombre moderno, de frente despejada, muestra un mayor desarrollo de las regiones frontales del cerebro.

El cerebro del hombre moderno representa 1/50 parte de su peso corporal. Cada gramo de cerebro corresponde, por así decirlo, a 50 g de su organismo. En comparación, el cerebro del chimpancé pesa aproximadamente la 1/150 parte de su cuerpo y el de gorila cerca de 1/500 parte del peso de su organismo. En realidad, algunos de los primates más pequeños tienen un cociente cerebro/cuerpo más elevado que el del ser humano. (Así ocurre también, por ejemplo, en los colibríes.) Un mono puede tener un cerebro que represente la 1/18 parte del peso de su cuerpo. Sin embargo, en este caso la masa de su cerebro es tan pequeña en

términos absolutos, que no puede contener la necesaria complejidad para manifestar la inteligencia del ser humano. En resumen, lo que es necesario, es lo que el ser humano tiene, un cerebro que es grande en términos absolutos y en relación con el tamaño de su organismo.

Esto se hace evidente con más claridad en el hecho de que dos tipos de mamíferos poseen cerebros que son mucho mayores que el ser humano y que, no obstante, no confieren a esos mamíferos una inteligencia superior. Los elefantes más grandes pueden tener cerebros de hasta 6.000 g y las ballenas más grandes pueden poseer cerebros de hasta 9.000 g. No obstante, el tamaño de los cuerpos que deben ser gobernados por estos cerebros es enorme.

El cerebro del elefante, a pesar de su tamaño, sólo representa la 1/1.000 parte del peso de su cuerpo, mientras que el cerebro de una ballena grande puede representar sólo la 1/10.000 parte del peso de su cuerpo.

No obstante, sólo en una dirección tiene el ser humano un posible rival. Los delfines y las marsopas, pequeños miembros de la familia de los cetáceos, tienen posibilidades de emular al hombre. Algunos de estos animales no pesan más que un ser humano y, sin embargo, sus cerebros son mayores (con pesos de hasta 1.700 g) y con más circunvoluciones.

Pero, a partir de este solo hecho, no puede llegarse a la conclusión de que el delfín sea más inteligente que el ser humano, por cuanto debe considerarse, además, la cuestión de la organización interna del cerebro. El cerebro del delfín (al igual que el del hombre del Neandertal) puede estar más orientado en la dirección de lo que podemos considerar las «funciones inferiores».

La única manera segura de poder establecerlo es intentar medir experimentalmente la inteligencia del delfín. Algunos investigadores, principalmente John C. Lilly, parecen estar convencidos de que la inteligencia del delfín es comparable a la nuestra, que los delfines y las marsopas tienen un tipo de lenguaje tan complicado como el nuestro, y que posiblemente pueden haber establecido una forma de comunicación interespecífica.

Incluso aunque esto sea así, está fuera de toda duda que los delfines, aunque inteligentes, perdieron la oportunidad de aplicar su inteligencia al control del medio ambiente cuando se readaptaron a la vida marina. Es imposible hacer uso del fuego

bajo el agua, y fue el descubrimiento del uso del fuego lo que diferenció por vez primera a la Humanidad de todos los demás organismos. Más fundamental todavía, la locomoción rápida a través de un medio tan viscoso como el agua requiere una forma aerodinámica. Esto ha hecho imposible en el delfín el desarrollo del cualquier equivalente del brazo y la mano humanos, con los que el medio ambiente puede ser delicadamente investigado y manipulado.

Al menos por lo que respecta a la inteligencia eficaz, el *Homo sapiens* carece de parangón en la Tierra en la que vive actualmente y, por lo que sabemos, en el pasado.

Mientras consideramos la dificultad que supone determinar el nivel preciso de inteligencia de una especie tal como el delfín, vale la pena decir que no existe un método completamente satisfactorio para medir el nivel exacto de inteligencia de miembros individuales de nuestra propia especie.

En 1904, los psicólogos franceses Alfred Binet y Théodore Simon idearon medios para estudiar la inteligencia en función de las respuestas dadas a preguntas juiciosamente seleccionadas. Tales «tests de inteligencia» dieron origen a la expresión «cociente intelectual» (o «CI»), que representa el cociente entre la edad mental, medida por la prueba, y la edad cronológica; este cociente es multiplicado por 100 para eliminar los decimales. El vulgo ha llegado a conocer la importancia del CI principalmente a través de la labor del psicólogo americano Lewis Madison Terman.

El problema radica en que no se ha ideado ningún test independiente de una determinada cultura. Preguntas sencillas sobre arados pueden resultar chocantes para un muchacho inteligente de ciudad, y cuestiones simples sobre escaleras rodantes pueden igualmente confundir a un muchacho inteligente educado en un ambiente rural. Ambas pueden desconcertar a un aborigen australiano igualmente inteligente, que, sin embargo, podría plantearnos preguntas acerca de bumeranes que nos dejarían perplejos.

Otro test familiar tiene como misión explorar un aspecto de la mente aún más sutil y huidizo que la inteligencia. Consiste en una serie de figuras hechas con tinta, creadas por vez primera por un médico suizo, Hermann Rorschach, entre 1911 y 1921. Se le pide a la persona que se va a examinar que convierta estas manchas de

tinta en imágenes; del tipo de imagen que una persona construye en la «prueba de Rorschach» se deducen conclusiones acerca de su personalidad. Sin embargo, incluso en el mejor de los casos, es probable que tales conclusiones no sean del todo concluyentes.

Sorprendentemente, muchos de los filósofos de la Antigüedad desconocieron casi por completo la significación del órgano situado en el interior del cráneo humano. Aristóteles consideró que el cerebro era simplemente una especie de dispositivo de acondicionamiento de aire, por así decirlo, cuya función sería la de enfriar la sangre excesivamente caliente. En la generación que siguió a la de Aristóteles, Herófilo de Chacedón, investigando al respecto en Alejandría, reconoció correctamente que el cerebro era el asiento de la inteligencia, pero, como era usual, los errores de Aristóteles tenían más peso que las verdades de otros.

Por tanto, los pensadores antiguos y medievales tendieron a menudo a localizar las emociones y la personalidad en órganos tales como el corazón, el hígado y el bazo (de ahí las expresiones «con el corazón destrozado», «descarga su bilis», y otras similares).

El primer investigador moderno del cerebro fue un médico y anatómista inglés del siglo XVII, llamado Thomas Willis; describió el trayecto seguido por los nervios hasta el cerebro. Posteriormente, un anatómista francés llamado Felix Vicq d'Azry y otros bosquejaron la anatomía del cerebro, pero no fue hasta el siglo XVIII cuando un fisiólogo suizo, Albrecht von Haller, efectuó el primer descubrimiento crucial sobre el funcionamiento del sistema nervioso, Von Haller halló que podía determinar la contracción de un músculo mucho más fácilmente cuando estimulaba el nervio, que cuando era el músculo el estimulado. Además, esta contracción era involuntaria; incluso podía producirla estimulando el nervio después que el organismo hubiera muerto. Seguidamente, Von Haller señaló que los nervios conducían sensaciones. Cuando seccionaba los nervios de tejidos específicos, éstos ya no podían reaccionar. El fisiólogo llegó a la conclusión que el cerebro recibía sensaciones a través de los nervios y luego enviaba, de nuevo a través de los nervios, mensajes que provocaban respuestas tales como la contracción muscular, Supuso que todos los nervios se unían en el centro del cerebro. En 1811, el médico austriaco Franz Joseph Gall llamó la atención sobre la «sustancia gris» en la

superficie del cerebro (que se distingue de la «sustancia blanca» en que ésta consta simplemente de las fibras que proceden de los cuerpos de las fibras nerviosas, siendo estas fibras de color blanco debido a sus vainas de naturaleza grasa). Gall sugirió que los nervios no se reunían en el centro del cerebro, como había supuesto Von Haller, sino que cada uno de ellos corría hasta una determinada región de la sustancia gris, que él consideró el área coordinadora del cerebro. Gall opinaba que diferentes zonas de la corteza cerebral tenían la misión de recibir sensaciones procedentes de distintos lugares del organismo y también de enviar mensajes a zonas específicas que provocaran respuestas.

Si una parte específica de la corteza era responsable de una propiedad específica de la mente, lo más natural era suponer que el grado de desarrollo de aquella parte reflejaría el carácter o mentalidad de la persona. Mediante la búsqueda de protuberancias en el cráneo de una persona, podría determinarse si esta o aquella porción del cerebro estaba aumentada y así juzgarse si dicha persona era particularmente generosa o depravada o poseía un carácter especial. Siguiendo esta forma de pensar, algunos de los seguidores de Gall fundaron la seudociencia de la «frenología», que estuvo bastante en boga en el siglo XIX y que, en realidad, aún no ha muerto hoy día. (Sorprendentemente, aunque Gall y sus seguidores señalaron que la frente alta y la cabeza redonda eran signos de inteligencia -un punto de vista que todavía influye en la opinión de las gentes- el propio Gall tuvo un cerebro desusadamente pequeño, casi un 15 % inferior al promedio.) Pero el hecho de que la frenología, tal como la desarrollaron los charlatanes, carezca de sentido, no significa que la idea original de Gall, de la especialización de funciones en zonas particulares de la corteza cerebral, fuera errónea. Incluso antes de que se realizaran estudios específicos del cerebro, se observó que la lesión de una porción particular del cerebro podía dar lugar a una afección particular. En 1861, el cirujano francés Pierre-Paul Broca, mediante un cuidadoso estudio *post mortem* del cerebro, demostró que los pacientes con «afasia» (la incapacidad para hablar o comprender el lenguaje) por lo general presentaban la lesión física de un área particular del cerebro izquierdo, un área llamada «circunvolución de Broca» a consecuencia de ello. Luego, en 1870, dos científicos alemanes, Gustav Fritsch y Eduard Hitzig, empezaron a localizar las funciones de supervisión del cerebro por estimulación de

varias zonas de él y observación de los músculos que respondían. Varios años más tarde, esa técnica fue considerablemente perfeccionada por el fisiólogo suizo Walter Rudolf Hess, que compartió (con Egas Moniz) el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1949 por este trabajo.

Con tales métodos se descubrió que una banda específica de la corteza se hallaba particularmente implicada en la estimulación de los diversos músculos voluntarios. Por tal motivo, esta banda se denomina «área motora». Al parecer, presenta una relación invertida con respecto al cuerpo; las porciones más superiores del área motora, hacia la parte superior del cerebro, estimulan las partes más inferiores de la pierna; cuando se avanza hacia abajo en el área motora, son estimulados los músculos más proximales de la pierna, luego los músculos del tronco, después los del brazo y la mano y, finalmente, los de la nuca y la mano.

Detrás del área motora existe otra zona de la corteza que recibe muchos tipos de sensaciones y que, por este motivo, fue denominada «área sensitiva». Como en el caso del área motora, las regiones del área sensitiva en la corteza cerebral se hallan divididas en secciones que parecen dispuestas inversamente con respecto al organismo. Las sensaciones procedentes del pie alcanzan la parte superior del área, sucesivamente, a medida que vamos hacia abajo, llegan al área las sensaciones procedentes de la pierna, cadera, tronco, nuca, brazo, mano y dedos y, por último, de la lengua. Las secciones del área sensitiva relacionadas con los labios, lengua y la mano son (como era de esperar) mayores, en proporción al tamaño real de aquellos órganos, que lo son las secciones correspondientes a otras partes del cuerpo.

Si a las áreas motora y sensitiva se les añaden aquellas secciones de la corteza cerebral que primariamente reciben las impresiones procedentes de los principales órganos de los sentidos, los ojos y los oídos, todavía queda una porción importante de la corteza sin una función claramente asignada y evidente.

Esta aparente falta de asignación ha dado origen a la afirmación corriente de que el ser humano sólo usa una quinta parte de su cerebro. Por supuesto, esto no es así; lo que realmente podemos decir es que una quinta parte del cerebro del ser humano tiene una función evidente. Del mismo modo podríamos decir que una empresa constructora de rascacielos está usando sólo la quinta parte de sus,

empleados, debido a que precisamente esta quinta parte es realmente la que se halla colocando el armazón de acero, los cables eléctricos, transportando el equipo, etcétera. Se ignoraría entonces a los ejecutivos, secretarias, oficinistas, supervisores y otros empleados. De forma análoga, la porción más importante del cerebro se halla dedicada a lo que podríamos llamar una «labor administrativa», recopilando los datos de naturaleza sensorial, analizándolos, decidiendo qué es lo que debe ignorarse, qué es lo que debe modificarse y exactamente cómo debe modificarse. La corteza cerebral tiene «áreas de asociación», algunas para las sensaciones auditivas, otras para las sensaciones visuales y otras para otros tipos de sensaciones.

Cuando se tienen en cuenta todas estas áreas de asociación, todavía persiste un área del cerebro que no tiene una función específica y fácil de definir. Ésta es la situada exactamente por detrás de la frente, que ha sido denominada «lóbulo prefrontal». Su evidente falta de función es tal que por ello se ha denominado algunas veces «área silenciosa». Ciertos tumores han exigido eliminar áreas importantes del lóbulo prefrontal, sin que se observe un efecto significativo particular en el individuo; pero, con toda seguridad, no es una masa inútil de tejido nervioso.

Incluso puede suponerse que es la porción más importante del cerebro, si se considera que en el desarrollo del sistema nervioso humano ha tenido lugar un aumento continuo de la complejidad de su extremo más anterior. Por tanto, el lóbulo prefrontal puede ser el área del cerebro más recientemente evolucionada y más significativamente humana.

En la década de 1930, un cirujano portugués, Antonio Egas Moniz, pensó que, cuando un enfermo mental dejaba de responder a los tratamientos conocidos, aún era posible ayudarle realizando la drástica intervención de seccionar los lóbulos prefrontales, separándolos del resto del cerebro. De esta manera podría aislar al paciente de una serie de asociaciones que había elaborado y que, al parecer, la estaban afectando de forma adversa; así se le permitiría reiniciar una nueva y mejor existencia con el cerebro restante. Esta operación, la «lobotomía prefrontal», fue realizada por vez primera en 1935; en una serie de casos parecía realmente aliviar. Moniz compartió (con W. R. Hess) el premio Nobel de Medicina y Fisiología

de 1949, por este trabajo. No obstante, la operación nunca alcanzó popularidad y ahora es más impopular que nunca. Muy a menudo, la cura es literalmente peor que la enfermedad.

El cerebro se halla dividido en dos «hemisferios cerebrales», conectados por un puente de sustancia blanca denso, «el cuerpo calloso».

En efecto, los hemisferios son órganos separados, unidos por fibras nerviosas que cruzan el cuerpo calloso y coordinan ambas partes. A pesar de esto, los hemisferios siguen siendo potencialmente independientes.

La situación es algo similar a la de nuestros ojos. Nuestros ojos actúan como una unidad corrientemente, pero si se pierde un ojo, el otro puede cubrir nuestras necesidades. De forma similar, la supresión de uno de los hemisferios cerebrales no convierten en descerebrado a un animal de experimentación. El hemisferio restante aprende a desenvolverse.

Usualmente, cada hemisferio es en gran parte responsable de un lado particular del organismo; el hemisferio cerebral izquierdo, del lado derecho; el hemisferio cerebral derecho, del lado izquierdo. Si ambos hemisferios se hallan en su lugar y se secciona el cuerpo calloso, se pierde la coordinación y las dos mitades del cuerpo actúan bajo un control más o menos independiente. En realidad, se crea un caso de cerebros gemelos.

Los monos pueden ser tratados de esa forma (con una operación sobre el nervio óptico, para asegurarse de que cada ojo se halla conectado sólo a un hemisferio), y, cuando se realiza esto, cada ojo puede ser entrenado por separado para tareas particulares. Un mono puede ser entrenado a seleccionar una cruz sobre un círculo, que indicará, digamos, la presencia de alimento. Si sólo se mantiene abierto el ojo izquierdo durante el período de entrenamiento, únicamente este ojo será de utilidad al respecto. Si se mantiene abierto el ojo derecho y se cubre el ojo izquierdo, el mono no tendrá la memoria del entrenamiento efectuado mediante el ojo derecho. Tendrá que obtener su alimento por el procedimiento de ensayo y error.

Si se entrena los dos ojos en tareas contradictorias y si ambos se abren, el mono alternará sus actividades, a medida que los hemisferios intervengan.

Naturalmente, en una situación de este tipo, en la que los dos hemisferios ejercen un control, existe siempre el peligro de conflicto y confusión. Para evitar esto, un

hemisferio cerebral (casi siempre el izquierdo en los seres humanos) es el dominante, cuando ambos se hallan normalmente conectados. La circunvolución de Broca, que controla el lenguaje, se halla, por ejemplo, en el hemisferio izquierdo. El «área gnóstica», que es un área de asociación, una especie de tribunal supremo, se halla también en el hemisferio izquierdo. Ya que el hemisferio cerebral izquierdo controla la actividad motora de la mano derecha del cuerpo, no es sorprendente que la mayoría de las personas utilicen perfectamente esta mano (aunque incluso los zurdos tienen un hemisferio cerebral izquierdo dominante). Cuando no existe una dominancia claramente establecida entre el lado derecho y el izquierdo, la persona es ambidextro, es decir, que utiliza tanto, la mano derecha como la izquierda, presenta algunas dificultades de lenguaje y quizás una cierta torpeza manual.

La corteza cerebral no constituye la totalidad del cerebro. Existen áreas de sustancia gris bajo la corteza cerebral. Son los denominados «núcleos de la base»; forma parte de ellos un grupo denominado el «tálamo». El tálamo actúa como centro de recepción de diversas sensaciones. Las más violentas de éstas, como el dolor, el calor intenso o el frío extremado, o un sonido intenso, son filtradas a este nivel. Sensaciones de menor intensidad, procedentes de los músculos -tacto suave, temperaturas moderadas- pasan al área sensitiva de la corteza cerebral. Se supone que las sensaciones suaves pueden alcanzar la corteza cerebral, donde pueden ser sometidas a examen y donde es posible se desencadene la reacción después de un intervalo más o menos prolongado de tiempo. Sin embargo, las sensaciones burdas, que deben ser tratadas con rapidez y para las que no se dispone de tiempo para examinarlas, son elaboradas más o menos automáticamente en el tálamo.

Por debajo del tálamo se encuentra el «hipotálamo», centro de una serie de dispositivos que controlan el organismo. El centro tiófico del cuerpo, mencionado en el capítulo XIV, que controla la nutrición, se halla localizado en el hipotálamo; también se encuentra en él el centro que controla la temperatura del organismo. Además, es a través del hipotálamo como el cerebro ejerce alguna influencia sobre la glándula pituitaria (véase el capítulo XIV); esto es, un ejemplo de la manera como los controles nerviosos del organismo y los controles químicos (las hormonas) pueden estar unificados a un nivel supervisor superior.

En 1954, el fisiólogo James Olds descubrió otra función, más bien aterradora, del hipotálamo. Contiene una región que, cuando se estimula, aparentemente da origen a una sensación sumamente placentera. Un electrodo fijado en el centro del placer de una rata, dispuesto de tal forma que puede ser estimulado por el propio animal, permite estimularlo hasta ocho mil veces en una hora durante varias horas o días, de tal forma que el animal no se hallará interesado en la ingestión de alimento, las relaciones sexuales y el sueño. Evidentemente, todas las cosas deseables en la vida lo son sólo en la medida en que estimulan el centro del placer. Cuando se logra estimularlo directamente, todo lo demás resulta innecesario.

El hipotálamo también contiene un área relacionada con el ciclo de vigilia-sueño, ya que la lesión de algunas de sus partes induce un estado similar al sueño en los animales. El mecanismo exacto por el cual el hipotálamo realiza su función es incierto. Una teoría es que envía señales a la corteza, que a su vez emite señales en respuesta a aquéllas, de forma que ambas estructuras se estimulan mutuamente. Al proseguir el estado de vigilia, la coordinación entre ellas comienza a fallar, las oscilaciones se hacen irregulares y el individuo se vuelve somnoliento. Un violento estímulo (como un ruido intenso, una sacudida persistente de los hombros o, por ejemplo, también la interrupción brusca de un ruido continuo) despertará a la persona dormida. En ausencia de tales estímulos, se restituirá eventualmente la coordinación entre el hipotálamo y la corteza, y el sueño cesará espontáneamente; o quizás el sueño se hará tan superficial que un estímulo ordinario, del que hay abundancia en el medio ambiente, bastará para despertarlo.

Durante el sueño tendrá lugar una actividad onírica -datos sensoriales más o menos apartados de la realidad-. El sueño es un fenómeno aparentemente universal; las personas que dicen dormir sin soñar, simplemente es que no logran recordar los sueños. El fisiólogo americano W. Dement, mientras estudiaba a personas durmiendo, apreció períodos de movimientos rápidos de los ojos, que algunas veces persistían durante varios minutos (REM). Si el individuo que dormía era despertado durante esos períodos, por lo general decía recordar un sueño. Además, si era constantemente importunado durante esos períodos, empezaba a sufrir trastornos psíquicos; estos trastornos se multiplicaban durante las noches sucesivas, como si el individuo intentara volver a tener el sueño perdido.

Por tanto, parece que la actividad onírica desempeña una importante función en la actividad del cerebro. Se ha sugerido que, gracias a los sueños, el cerebro revisa los sucesos del día, para eliminar lo trivial y reiterativo que, de otro modo, podría confundirle y reducir su eficacia. El sueño es el período natural en el que se desarrolla esa actividad, pues entonces el cerebro no debe realizar muchas de las funciones de vigilancia. La imposibilidad de realizar esta tarea (debido a la interrupción) debe afectar tanto a la actividad cerebral, que este órgano debe intentar realizar la inacabada tarea durante los períodos de vigilia, produciendo alucinaciones (es decir sueños cuando el individuo está despierto) y otros síntomas desagradables. Naturalmente, sería sorprendente que ésta no fuera una de las funciones principales del sueño, ya que es muy escaso el reposo físico durante el sueño que no pueda conseguirse en el curso de una vigilia tranquila.

El sueño REM también se da en niños, que pasan así la mitad del tiempo en que duermen y de los cuales resulta difícil suponer que posean motivaciones para soñar. Puede ser que el sueño REM mantenga el desarrollo del sistema nervioso. (Ha sido observado en otros mamíferos, aparte el hombre.) Por debajo y detrás del cerebro se encuentra el cerebelo, más pequeño (dividido también en dos «hemisferios cerebelosos»), y el «tallo cerebral», que se hace cada vez más estrecho y se continúa, sin modificaciones aparentes del diámetro, con la «médula espinal», que se extiende cerca de cuarenta y cinco centímetros hacia abajo, por el centro hueco de la columna vertebral.

La médula espinal consiste de sustancia gris (en el centro) y sustancia blanca (en la periferia); a ellas se unen una serie de nervios, que se dirigen en su mayor parte a los órganos internos -corazón, pulmones, aparato digestivo, etc.- órganos que se hallan más o menos sometidos a control involuntario.

En general, cuando resulta seccionada la médula espinal, por una enfermedad o un traumatismo, la parte del cuerpo situada por debajo del segmento lesionado se halla, digamos, desconectada. Pierde la sensibilidad y está paralizada. Si la médula es seccionada en la región de la nuca, la muerte tiene lugar debido a que se paraliza el tórax y, con ello, la actividad pulmonar. Por este motivo resulta fatal el «desnucamiento», y ahorrar es una forma fácil de ejecución. Es la sección de la médula, más que la rotura de un hueso, la que tiene consecuencias fatales.

La estructura completa del «sistema nervioso central», que consiste de cerebro, cerebelo, tallo cerebral y médula espinal, se halla cuidadosamente coordinada. La sustancia blanca en la médula espinal está constituida de haces de fibras nerviosas que corren en sentido ascendente y descendente, dando unidad a todo el sistema. Las fibras que conducen los impulsos en sentido descendente, desde el cerebro, son las «vías descendentes» y aquellas que conducen a los impulsos hacia arriba, o sea hacia el cerebro, constituyen la «vías ascendentes».

En 1964, los investigadores especializados del «Cleveland's Metropolitan General Hospital» informaron haber conseguido aislar los cerebros de varios Rhesus y mantenerlos vivos independientemente durante dieciocho horas. Ahí se ofrece la posibilidad de estudiar con detalle el metabolismo del cerebro mediante una comparación entre el medio nutriente cuando entra en los vasos sanguíneos del cerebro aislado y ese mismo medio a la salida.

Al año siguiente se trasplantaron cabezas de perro a los cuellos de otros perros enlazándolas con el sistema circulatorio del cuerpo receptor; se consiguió mantener vivos los cerebros de las cabezas transplantadas, así como hacerles funcionar durante dos días. En 1966 se conservaron varios cerebros de perro a temperaturas próximas al punto de congelación durante seis horas, y luego fueron reanimados hasta que aparecieron claros indicios de actividad normal tanto química como eléctrica. Evidentemente, el cerebro es mucho más resistente de lo que parece.

### **Acción Nerviosa**

No son sólo las diversas porciones del sistema nervioso central las que se hallan unidas entre sí por nervios, sino todo el organismo, que de esta manera se halla sometido al control de ese sistema. Los nervios relacionan entre sí los músculos, las glándulas y la piel; incluso invaden la pulpa de los dientes (como sabemos por propia experiencia con ocasión de un dolor de muelas).

Los nervios fueron observados ya en tiempos antiguos, pero no se comprendió ni su estructura ni su función.

Hasta los tiempos modernos, se consideró que eran huecos y servían para el transporte de un fluido sutil. Teorías un tanto complicadas, desarrolladas por

Galen, implicaban la existencia de tres fluidos distintos, transportados por las venas, las arterias y los nervios, respectivamente. El fluido de los nervios, por lo general llamado «fluído animal», es el más sorprendente de los tres. Cuando Galvani descubrió que los, músculos y los nervios podían ser estimulados por una descarga eléctrica, esto permitió el desarrollo de una serie de estudios que eventualmente mostraron que la acción nerviosa estaba asociada con la electricidad, también un sutil fluido, más sutil de lo que Galeno habría podido imaginar.

Los trabajos específicos sobre la acción nerviosa fueron iniciados, a principios del siglo XIX, por el fisiólogo alemán Johannes Peter Müller, quien, entre otras cosas, demostró que los nervios sensitivos siempre producían el mismo tipo de sensaciones, independientemente de la naturaleza del estímulo. Así, el nervio óptico registraba un destello de luz, tanto si era estimulado por la propia luz como si lo era por la presión mecánica de un puñetazo en el ojo (en este último caso, la persona afectada vería «estrellas»). Este hecho pone de relieve que nuestro contacto con el mundo no es un contacto con la realidad en términos absolutos, sino un contacto con estímulos especializados que el cerebro interpreta, por lo general, de una manera útil, pero que puede interpretar también de una forma inútil.

El estudio del sistema nervioso experimentó un avance considerable en 1873, cuando un fisiólogo italiano, Camillo Golgi, desarrolló una tinción celular que implicaba el empleo de sales de plata y que era adecuada para reaccionar con las células nerviosas, poniendo de manifiesto sus más finos detalles. Fue capaz de demostrar, de esta manera, que los nervios estaban constituidos por células separadas e independientes, y que los procesos de una célula podían aproximarse mucho a los de otra, pero sin unirse con ellos. El tenue espacio entre ellas constituía la denominada sinapsis. De esta manera, Golgi apoyó sobre una base sólida las afirmaciones de un anatómista alemán, Wilhelm von Waldeyer, de que el sistema nervioso se componía en su totalidad de células nerviosas individuales o neuronas (denominándose a esta hipótesis la «teoría de la neurona»).

Sin embargo, el propio Golgi no fue partidario de la teoría de la neurona. Fue el neurólogo español Santiago Ramón y Cajal, quien, hacia 1889, utilizando un método de tinción que representaba un perfeccionamiento del de Golgi, entre las células en la sustancia gris del cerebro y de la médula espinal estableció de forma definitiva la

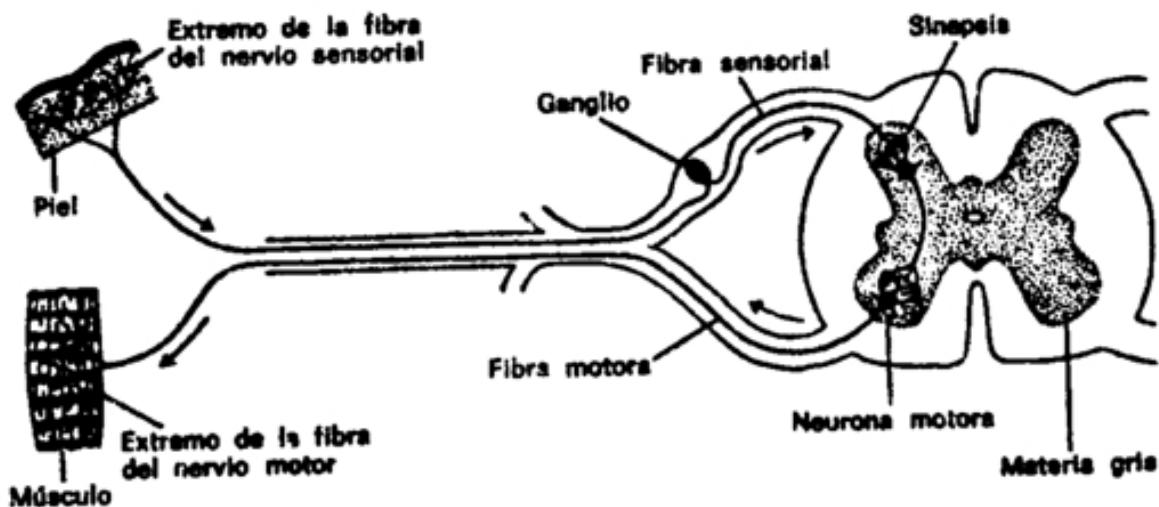
teoría de las neuronas. Golgi y Ramón y Cajal, aunque divergían acerca de diversos detalles de sus hallazgos, compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1906.

Estos nervios forman dos sistemas: el «simpático y el parasimpático». (Los términos tienen su origen en los conceptos semimísticos de Galeno.) Ambos sistemas actúan casi siempre sobre cualquier organismo interno, ejerciendo un control a través de sus efectos opuestos. Por ejemplo, los nervios simpáticos aceleran los latidos cardíacos, los nervios parasimpáticos los hacen, más lentos; los nervios simpáticos disminuyen la secreción de jugos gástricos; los parasimpáticos estimulan tales secreciones, y así sucesivamente. Por tanto, la médula espinal, junto con otras porciones subcerebrales del encéfalo, regula la actividad de los órganos de una manera automática. Esta serie de controles involuntarios fueron investigados con detalle por el fisiólogo británico John Newport Langley, en la década de 1890, y los denominó «sistema nervioso autónomo o vegetativo».

Hacía 1830, el fisiólogo inglés Marshall Hall estudió otro tipo de comportamiento que parecía ser en cierto modo voluntario, pero que resultó ser totalmente involuntario. Cuando accidentalmente se toca con la mano un objeto caliente, ésta se retira de forma instantánea. Si la sensación de calor tuviera que llegar hasta el cerebro, ser considerada e interpretada allí y provocar en este nivel el apropiado mensaje hacia la mano, ésta ya se habría chamuscado cuando dicho mensaje hubiera sido recibido. La médula espinal, no pensante, realiza toda esta tarea de forma automática y mucho más de prisa. Hall dio el nombre de «reflejo» a este proceso.

El reflejo tiene lugar a través de dos o más nervios, que actúan de forma coordinada constituyendo un «arco reflejo». El arco reflejo más simple posible es el que consta de dos neuronas, una sensitiva (que aporta sensaciones al «centro reflejo» en el sistema nervioso central, por lo general en algún punto de la médula espinal) y otra motora (que transmite instrucciones para el movimiento desde el sistema nervioso central). Las dos neuronas pueden hallarse conectadas por una o más «neuronas intercalares». Un estudio particular de tales arcos reflejos y de su función en el organismo fue realizado por el neurólogo inglés Charles Scott

Sherrington, que compartió (con Adrian) el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1932, como consecuencia de ello. Sherrington, en 1897, ideó el término «sinapsis».



### **Arco reflejo.**

Los reflejos dan lugar a una respuesta tan rápida y exacta a un estímulo particular, que ofrecen un método sencillo para comprobar la integridad general del sistema nervioso. Un ejemplo familiar lo constituye el «reflejo patelar» o, como usualmente se conoce, reflejo rotuliano. Cuando se cruzan las piernas, un golpe repentino por debajo, de la rodilla, en la parte superior de la pierna, determina una sacudida de la misma, un movimiento de puntapié; hecho puesto de manifiesto, por vez primera, en 1875, por el neurólogo alemán Carl Friedrich Otto Westphal, que llamó la atención sobre su importancia médica. El reflejo rotuliano no tiene importancia en sí mismo, pero su ausencia puede suponer la existencia de algún trastorno grave que afecte a la porción del sistema nervioso en la que se encuentra el arco reflejo.

Algunas veces, la lesión de una parte del sistema nervioso central determina la aparición de un reflejo anormal. Si se rasca la planta del pie, el reflejo normal determina que los dedos del pie se aproximen unos a otros y se dirijan hacia abajo. Ciertos tipos de lesión del sistema nervioso central motivarán que el dedo gordo del pie se dirija hacia arriba en respuesta a este estímulo, y que los dedos se separen y se dirijan hacia abajo. Éste es el «reflejo de Babinski», llamado así en honor al neurólogo francés Joseph-F.-F. Babinski, que lo describió en 1896.

En el ser humano, los reflejos están decididamente subordinados a la voluntad consciente. Podemos obligar a nuestra mano a que permanezca en el fuego;

deliberadamente puede acelerarse la respiración cuando la acción refleja ordinaria la mantendría lenta, etc. Por otra parte, los animales inferiores no sólo se hallan mucho más estrictamente controlados por sus reflejos, sino que también los han desarrollado mucho más.

Uno de los mejores ejemplos lo constituye una araña tejiendo su red. Aquí, los reflejos producen un tipo tan elaborado de comportamiento, que es difícil pensar que simplemente se trata de una actividad refleja; por este motivo se lo ha denominado en general «comportamiento instintivo». (Debido a que la palabra «instintivo» se utiliza a menudo erróneamente, los biólogos prefieren el término «comportamiento innato».) La araña nace con un sistema nervioso en el que las conexiones han sido, por así decirlo, preestablecidas. Un estímulo particular desencadena el que la araña teja la tela, y cada acto en el proceso actúa a su vez como estímulo que determina la respuesta siguiente. Cuando se mira la intrincada tela de una araña, tejida con una maravillosa precisión y eficacia para la función que debe realizar, es casi imposible creer que dicha tela no haya sido realizada por una inteligencia con un propósito bien definido. Pero el mismo hecho de que esta compleja tarea sea realizada tan perfectamente y de una forma tan exacta en todo momento, demuestra que la inteligencia no tiene nada que ver con ella. La inteligencia consciente, con las vacilaciones y el enjuiciamiento de las alternativas que son inherentes al pensamiento deliberado, inevitablemente dará origen a imperfecciones y variaciones de una construcción a otra.

Al aumentar la inteligencia, los animales tienden, cada vez más a despojarse de los instintos y las aptitudes congénitas. Sin lugar a dudas, de alguna manera pierden parte de su valor. Una araña puede tejer a la perfección su tela sorprendentemente compleja desde el primer momento, aún cuando nunca haya visto tejer una tela de araña o incluso una tela cualquiera. Por el contrario, el ser humano nace casi totalmente desprovisto de aptitudes y completamente indefenso. Un niño recién nacido puede chupar automáticamente un pezón, llorar si está hambriento y agarrarse si se va a caer, pero apenas si puede hacer algo más. Todo padre sabe cuán dolorosamente y con cuánto trabajo aprende un niño las formas más simples del comportamiento adecuado, y, no obstante, una araña o un insecto, aunque perfectamente dotado para realizar una determinada tarea, no puede introducir

ninguna modificación. La araña construye una tela maravillosa, pero si esta tela no cumpliera su función, no podría aprender a construir otro tipo de tela. En cambio, un muchacho obtiene grandes beneficios de no haber sido dotado con una perfección congénita. Debe aprender lentamente y obtener sólo resultados imperfectos en el mejor de los casos; pero puede realizar una tarea imperfecta con el método por él elegido. Lo que el hombre ha perdido en aptitud y seguridad, lo ha ganado en una casi ilimitada flexibilidad.

Sin embargo, trabajos recientes subrayan el hecho de que no siempre existe una clara diferenciación entre el instinto y el comportamiento aprendido. Por ejemplo, por simple observación parece como si los polluelos o los patitos, recién salidos del huevo, siguieran a sus madres por instinto. Una observación más atenta muestra que no es así.

El instinto no es seguir a la madre, sino simplemente seguir a algo de una forma o color o movimiento característicos. Cualquier objeto que proporcione esta sensación en un cierto período de la temprana vida, es seguido por la criatura y seguidamente aceptado como la madre. Puede ser realmente la madre; y casi invariablemente lo es en realidad. Pero no precisa serlo. En otras palabras, el seguir a la madre es casi instintivo, pero se aprende que es la «madre» seguida. (Gran parte de la base experimental de estas concepciones fue aportada por el naturalista austriaco Konrad Z. Lorenz, que en el curso de los estudios realizados hace unos treinta años fue seguido, aquí y allá, por una manada de gansos.) El establecimiento de un determinado tipo de comportamiento, en respuesta a un estímulo particular que ha incidido en un cierto momento de la vida, se denomina «período crítico». En los polluelos, el período crítico de «impresión de la madre» se encuentra entre las 13 y 16 horas de haber salido del huevo. Para un perrito, el período crítico se halla entre las 3 y 7 semanas, durante las cuales los estímulos que es probable que incidan sobre él impriman varios aspectos de lo que nosotros llamamos el comportamiento normal del perro.

La impresión es la forma más primitiva del comportamiento aprendido; es un comportamiento tan automático, que tiene lugar en un tiempo tan limitado y sometido a una serie tan general de condiciones, que es fácil confundirlo con un instinto.

Una razón lógica que explica el fenómeno de la impresión es que permite una cierta flexibilidad deseable. Si un polluelo naciera con la capacidad instintiva de distinguir a su verdadera madre y sólo siguiera a ella, y si por cualquier motivo la verdadera madre estuviera ausente el primer día de vida del polluelo, esta criatura se encontraría indefensa. Por tanto, la maternidad se halla sujeta al azar durante unas pocas horas, y el polluelo puede resultar impresionado por cualquier gallina de la vecindad y así seguir a una madre adoptiva.

Como se ha indicado anteriormente, fueron las experiencias de Galvani, poco antes del comienzo del siglo XIX, las que indicaron por primera vez alguna relación entre la electricidad y la actividad del músculo y el nervio.

Las propiedades eléctricas del músculo condujeron a una aplicación médica sorprendente, gracias a la labor del fisiólogo holandés Willem Einthoven. En 1903 desarrolló un galvanómetro extraordinariamente sensible, tanto que respondía a las pequeñas fluctuaciones del potencial eléctrico del corazón que late. Hacia 1906, Einthoven registró las deflexiones de este potencial (denominándose el registro «electrocardiograma») y las correlacionó con diversos tipos de trastornos cardíacos. Se supuso que las propiedades eléctricas más sutiles de los impulsos nerviosos eran iniciadas y propagadas por modificaciones químicas en el nervio. Esto pasó de ser una simple hipótesis a ser un hecho perfectamente establecido gracias a la labor experimental del fisiólogo alemán Emil Du Bois-Reymond, en el siglo XIX; mediante un delicado galvanómetro fue capaz de detectar pequeñas corrientes eléctricas en los nervios estimulados.

Con los instrumentos electrónicos modernos se ha conseguido alcanzar un increíble grado de sensibilidad y exactitud en las investigaciones de las propiedades eléctricas del nervio. Mediante la colocación de delgados electrodos en diferentes puntos de una fibra nerviosa y detectando las modificaciones eléctricas mediante un osciloscopio, es posible medir la intensidad de un impulso nervioso, su duración, velocidad de propagación, etc. Gracias a la labor realizada en este campo, los fisiólogos americanos, Joseph Erlanger y Herbert Spencer Gasser, compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1944.

Si se aplican pequeños impulsos eléctricos de intensidad creciente a una particular célula nerviosa, hasta una cierta intensidad ésta no responderá. Luego,

bruscamente, la célula emitirá un impulso, que correrá a lo largo de la fibra. Por tanto, la célula tiene un umbral; o no reacciona a un estímulo subliminal o bien reacciona a un estímulo líminal, emitiendo un impulso de una cierta intensidad fija. La respuesta, en otras palabras, es del tipo del «todo o nada». Y la naturaleza del impulso desencadenado por el estímulo parece ser la misma en todos los nervios. ¿Cómo puede un proceso tan simple como es del todo o nada, de sí o no, idéntico en cualquier lugar, dar origen a sensaciones ópticas complejas, por ejemplo, o a las complejas respuestas digitales cuando se toca un violín? Parece que un nervio, tal como el óptico, contiene un gran número de fibras individuales, algunas de las cuales pueden emitir impulsos y otras no, y en ellas la emisión de impulsos puede tener lugar en rápida sucesión o lentamente, dando lugar a un tipo de respuesta, posiblemente complejo, que se ajusta continuamente a los cambios en el estímulo. (Por su labor en este campo, el fisiólogo inglés Edgar Douglas Adrian compartió, con Sherrington, el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1932.) Ese tipo de respuesta variable puede ser continuamente «rastreado» por el cerebro y ser interpretado de forma apropiada, pero no se conoce nada acerca de cómo se realiza la interpretación o cómo el tipo de respuesta es traducido en una actividad tal como la contracción de un músculo o la secreción de una glándula.

La emisión de impulsos por la fibra nerviosa aparentemente depende del movimiento de iones a través de la membrana de la célula. Corrientemente, el interior de la célula tiene un exceso relativo de iones potasio, mientras que en el exterior de la célula hay un exceso de iones sodio. De algún modo la célula conserva los iones potasio en su interior y, en cambio, elimina los iones sodio hacia el exterior, de tal manera que las concentraciones a ambos lados de la membrana celular no son iguales. Actualmente se considera que existe una «bomba de sodio» de algún tipo en el interior de la célula, la cual expulsa los iones sodio hacia el exterior tan rápidamente como penetran. En cualquier caso, existe una diferencia de potencial eléctrico de cerca de una décima de voltio a través de la membrana celular, estando el interior negativamente cargado con respecto al exterior. Cuando se estimula la célula nerviosa, la diferencia de potencial a través de la membrana desaparece, y esto representa la emisión de un impulso por la célula. Se requieren algunas milésimas de segundo para que vuelva a restituirse la diferencia de

potencial, y durante este intervalo el nervio no reaccionará a otro estímulo: este intervalo de tiempo se denomina «período refractario».

Una vez la célula ha emitido un impulso, éste corre a lo largo de la fibra por una serie de emisiones de impulsos, excitando cada sucesivo segmento de la fibra al siguiente. El impulso sólo puede correr a lo largo del axón, debido a que el segmento que acaba de emitir un impulso no puede volver a emitir otro hasta haber transcurrido un período de reposo.

Las investigaciones que relacionaron en la forma descrita la acción nerviosa con la permeabilidad iónica determinaron que se concediera el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1963 a dos fisiólogos británicos, Aland Lloyd Hodkin y Andrew Fielding Huxley, y a un fisiólogo australiano, John Carew Eccles.

¿Qué ocurre cuando, por ejemplo, el impulso que corre a lo largo de la fibra nerviosa llega a una sinapsis? -la hendidura existente entre una célula nerviosa y la siguiente-. Aparentemente, el impulso nervioso determina la producción de una sustancia química que puede atravesar la hendidura sináptica e iniciar un impulso nervioso en la siguiente célula nerviosa. De esta manera, el impulso puede ser transmitido de una célula a otra.

Una de las sustancias químicas que indudablemente influye sobre los nervios es la hormona adrenalina. Actúa sobre los nervios del sistema simpático que reduce la actividad del sistema digestivo y acelera la frecuencia respiratoria y la cardíaca. Cuando la angustia o el peligro estimulan las glándulas suprarrenales, que así segregan más hormona, la estimulación de los nervios simpáticos determina que se movilice más sangre en el organismo, llevando más oxígeno a los tejidos y reduciendo, en cambio, la digestión en ese periodo, a consecuencia de cuyo fenómeno se ahorra energía durante el estado de emergencia.

Los fisiólogos americanos John A. Larsen y Leonard Keeler utilizaron este hallazgo para idear una máquina que registrara las modificaciones de la presión sanguínea, la frecuencia del pulso, la frecuencia respiratoria y la perspiración ocasionadas por la emoción. Este aparato, el «polígrafo», registra el esfuerzo emocional realizado al decir una mentira: la cual siempre implica el peligro de su descubrimiento en cualquier individuo normal o razonablemente normal y, por tanto, provoca la liberación de adrenalina. Si bien no es infalible, el polígrafo ha conseguido gran

fama como «detector de mentiras». En el proceso normal, las terminaciones nerviosas del sistema nervioso simpático segregan un compuesto similar a la adrenalina, llamado «noradrenalina». Esta sustancia química sirve para transmitir impulsos nerviosos a través de la sinapsis, propagando el mensaje por estimulación de las terminaciones nerviosas en el otro lado de la hendidura sináptica.

A principios de la década de 1920, el fisiólogo inglés Henry Daley el fisiólogo alemán Otto Loewi (que compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1936) estudiaron una sustancia química que realizaba esta función en la mayor parte de los nervios que no pertenecían al sistema simpático. Esta sustancia se denomina acetilcolina. Ahora se cree que se halla implicada no sólo en la conducción del impulso en la sinapsis, sino también en su transmisión por la propia fibra nerviosa. Quizá la acetilcolina actúe sobre la «bomba de sodio». De cualquier forma, la sustancia parece que se forma momentáneamente en la fibra nerviosa y es destruida con rapidez por una enzima llamada «colinesterasa». Cualquier agente que inhiba la acción de la colinesterasa interferirá este ciclo químico e interrumpirá la transmisión de los impulsos nerviosos. Sustancias letales como los «gases nerviosos» inhiben la colinesterasa. Al bloquear la conducción de los impulsos nerviosos, pueden interrumpir los latidos cardíacos y producir la muerte en pocos minutos. La aplicación de estas sustancias a la larga es evidente. Pueden usarse, de forma menos inmoral, como insecticidas.

Una interferencia menos drástica de la colinesterasa es la producida por los anestésicos locales, que de esta manera pueden suspender (temporalmente) los impulsos nerviosos asociados con el dolor.

Gracias a las corrientes eléctricas implicadas en la conducción de los impulsos nerviosos, es posible «leer» la actividad del cerebro de una manera que, sin embargo, no ha permitido aún traducir por completo lo que nos dicen las ondas cerebrales. En 1929, un psiquiatra alemán, Hans Berger, comunicó sus primeros trabajos, en los que aplicaba electrodos sobre diversas partes de la cabeza y era capaz de descubrir ondas rítmicas de actividad eléctrica.

Berger dio al ritmo más pronunciado el nombre de «onda alfa». En la onda alfa, el potencial varía alrededor de 20 microvoltios en un ciclo de aproximadamente diez veces por segundo. La onda alfa es la más evidente y se pone más claramente de

manifiesto cuando la persona se halla en reposo con los ojos cerrados. Cuando los ojos están abiertos, pero sin ver un objeto iluminado con una forma determinada, persiste la onda alfa. Sin embargo, cuando el individuo ve el medio ambiente con su multiplicidad de formas, desaparece la onda alfa o bien es enmascarada por otros ritmos más prominentes. Después de un cierto intervalo, si no aparece nada nuevo en el campo visual, vuelve a aparecer la onda alfa. Los nombres característicos de los otros tipos de ondas son «ondas beta», «ondas delta» y «ondas theta».

Los electroencefalogramas («registros eléctricos de la actividad cerebral», más conocidos con las siglas «EEG») han sido ampliamente estudiados y revelan que cada individuo posee su propio tipo de comportamiento electroencefalográfico, que varía con la excitación y el sueño. Aunque el electroencefalograma aún está lejos de ser un método adecuado para «leer los pensamientos» o reflejar la actividad intelectual de forma precisa, ayuda a diagnosticar importantes trastornos de la función cerebral, particularmente la epilepsia. También puede utilizarse para localizar zonas de lesión cerebral o tumores cerebrales.

En la década de 1960, para la interpretación de los EEG se utilizaron computadoras especialmente ideadas. Si se provoca un cambio ambiental particularmente pequeño en un individuo, es de suponer que se producirá alguna respuesta en el cerebro, la cual se reflejará por una pequeña alteración del tipo de electroencefalograma en el momento en que sea introducida la modificación. Sin embargo, el cerebro se halla ocupado en otras muchas actividades y la pequeña alteración en el EEG no se pondrá de manifiesto. No obstante, si se repite el proceso una y otra vez, la computadora puede ser programada de tal modo que halle el valor medio del tipo de EEG y registre la diferencia que aparece de forma reiterada.

Hacia 1964, el fisiólogo americano Manfred Clynes comunicó análisis lo suficientemente minuciosos como para indicar, mediante el estudio de sólo los electroencefalogramas, el color que había estado mirando el individuo estudiado. El neurofisiólogo inglés W. Grey Walter comunicó de forma similar un tipo de señales cerebrales que parecían características del proceso de aprendizaje. Aparecen cuando la persona estudiada tiene razones para suponer que se halla ante un estímulo que le incita a pensar o actuar. Walter las denominó «ondas de expectación». El fenómeno inverso, es decir, el de provocar actividades específicas

mediante la estimulación eléctrica directa del cerebro, también fue comunicada en 1965. José M. Rodríguez Delgado, de Yale, transmitiendo una estimulación eléctrica mediante señales de radio, hizo que los animales caminaran, treparan, bostezaran, durmieran, se aparearan, interrumpió el desarrollo de emociones, etc., y todo ello por control a distancia. Resultó muy espectacular el que lograra que un toro, en plena embestida, se detuviera y se alejara pacíficamente al trote.

### **Comportamiento Humano**

A diferencia de los fenómenos físicos, tales como los movimientos de los planetas o el comportamiento de la luz, la respuesta a los estímulos de los seres vivos nunca ha sido reducida a leyes naturales rigurosas y quizá nunca lo sea. Hay muchos autores que insisten en que el estudio de la conducta del ser humano no puede llegar a ser una verdadera ciencia, en el sentido de ser capaz de explicar o predecir el comportamiento en una situación dada, basándose en leyes naturales universales. No obstante, la vida no es una excepción de la ley natural, y puede argüirse que el comportamiento de los seres vivos se explicaría totalmente si se conocieran todos los factores operantes. La cuestión crucial radica en esta última frase. Es improbable que algún día se conozcan todos los factores; hay demasiados y son excesivamente complejos. Sin embargo, el hombre no precisa renunciar a la comprensión de sí mismo. Existe un amplio espacio para un mejor conocimiento de sus propias complejidades mentales, y aún cuando nunca podamos llegar al final de la senda, tenemos la esperanza de correr un largo trecho por ella.

No sólo es este tema particularmente complejo, sino que su estudio no ha experimentado grandes progresos durante mucho tiempo. La Física alcanzó la madurez en 1600, y la Química, en 1775, pero el estudio mucho más complejo de la «Psicología experimental» data sólo de 1879, cuando el fisiólogo alemán Wilhelm Wundt creó el primer laboratorio dedicado al estudio científico del comportamiento humano. El propio Wundt se interesó, sobre todo, por las sensaciones y la forma como el ser humano percibía los detalles del universo a su alrededor.

Casi al mismo tiempo se inició el estudio del comportamiento humano en una aplicación particular: la del ser humano como ente trabajador. En 1881, el ingeniero americano Frederick Winslow Taylor comenzó a medir el tiempo requerido para

realizar ciertas tareas y elaboró métodos para organizar de tal forma el trabajo que se redujera al mínimo el tiempo necesario para efectuarlo.

Fue el primer «experto en eficiencia» y, al igual que todos los expertos en eficiencia, que tienden a perder la noción de los valores ocultándose tras el cronómetro, resultó poco popular entre los trabajadores.

Pero cuando estudiamos el comportamiento humano, paso a paso, bien en las condiciones de control del laboratorio o de forma empírica en una fábrica, parece que estamos hurgando en una delicada máquina con toscas herramientas.

En los organismos sencillos podemos ver directamente respuestas automáticas de la clase llamada «tropismos» (derivado de una palabra griega que significa «dirigirse a»). Las plantas muestran «fototropismo» (se dirigen hacia la luz), «hidrotropismo» (se dirigen hacia el agua: en este caso, las raíces), y «quimiotropismo» (se dirigen hacia sustancias químicas particulares). El quimiotropismo también es característico de muchos animales, desde los protozoos a las hormigas. Como se sabe, ciertas mariposas se dirigen volando hacia un olor distante incluso tres kilómetros. Que los tropismos son completamente automáticos se demuestra por el hecho que una mariposa con fototropismo volará incluso hacia la llama de una vela.

Los reflejos mencionados anteriormente no parecen progresar mucho más allá de los tropismos, y la impresión, también citada, representa el aprendizaje, pero de una forma tan mecánica que apenas si merece ese nombre. Así pues, ni los reflejos ni la impresión pueden ser considerados característicos sólo de los animales inferiores: el hombre también los manifiesta.

El niño, desde que nace, flexionará un dedo con fuerza si se le toca la palma de la mano, y succionará un pezón si se le coloca entre sus labios. Resulta evidente la importancia de tales instintos, para garantizar que el niño no se caiga ni se desnutra.

También parece inevitable que el niño esté sujeto a la impresión. No es un sujeto adecuado para la experimentación, por supuesto, pero pueden obtenerse conocimientos mediante observaciones accidentales. Los niños que a la edad de empezar a articular sonidos no se hallen expuestos a los del lenguaje real, no pueden desarrollar más tarde la capacidad de hablar, o si lo hacen es en un grado anormalmente limitado. Los niños que viven en instituciones impersonales, donde

son bien alimentados y donde tienen ampliamente cubiertas sus necesidades físicas, pero donde no gozan del cariño y cuidados maternos, se convierten en pequeños seres entristecidos. Su desarrollo mental y físico se halla considerablemente retrasado y muchos mueren al parecer sólo por la falta del «calor maternal», por lo que puede suponerse que les faltan estímulos adecuados para determinar la impresión de modos de comportamiento necesarios. De forma similar, los niños que son desprovistos indebidamente de los estímulos que implica la compañía de otros niños durante ciertos períodos críticos de la niñez, desarrollan personalidades que pueden estar seriamente distorsionadas de una forma u otra.

Por supuesto, puede objetarse que los reflejos y la impresión desempeñan sólo en la infancia un papel importante. Cuando un ser humano alcanza la edad adulta, es entonces un ser racional que responde de una forma algo más que mecánica. Pero, ¿lo es? Dicho de otra manera, ¿posee el hombre libre albedrío? es decir, ¿piensa lo que quiere?, o bien su comportamiento, en algunos aspectos, se halla determinado de forma absoluta por el estímulo, como lo estaba el toro de la experiencia de Delgado descrita en la página 170.

Puede afirmarse, tomando como base la teología o la fisiología, la existencia de libre albedrío, pero no conozco a nadie que haya encontrado una forma de demostrarlo experimentalmente. Demostrar el «determinismo», es decir, lo contrario del libre albedrío, tampoco es fácil. Sin embargo, se han hecho intentos en esa dirección. Los más notables fueron los del fisiólogo ruso Iván Petrovich Pávlov.

Pávlov comenzó con un interés específico en el mecanismo de la digestión. Mostró hacia la década de 1880 que el jugo gástrico era segregado en el estómago tan pronto como se colocaba alimento en la lengua del perro; el estómago segregaba este jugo, aunque el alimento no llegara hasta él. Pero si se seccionaba el nervio vago (que corre desde el bulbo raquídeo hasta diversas partes del tubo digestivo) cerca del estómago, cesaba la secreción. Por su labor en fisiología de la digestión, Pávlov recibió el premio Nobel de Fisiología y Medicina de 1904.

Pero, al igual que otros Premios Nobel (principalmente, Ehrlich y Einstein), Pávlov realizó otros descubrimientos tan notorios como aquellos por los que había realmente recibido el premio.

Decidió investigar la naturaleza automática o refleja de las secreciones y eligió la secreción de la saliva como un ejemplo conveniente y fácil de observar. La visión o el color de la comida determinaba que un perro (y un ser humano, que para el caso es lo mismo) comenzara a segregar saliva. Lo que Pávlov hizo fue tocar una campana, que sonaba cada vez que colocaba alimentos delante de un perro. Eventualmente, después de veinte a cuarenta asociaciones de este tipo, el perro comenzaba a segregar saliva en cuanto oía las campanadas, aún cuando no estuviera presente alimento alguno. Por tanto, se había creado una asociación. El impulso nervioso que transmitía el sonido de la campana hasta el cerebro se había hecho equivalente al que representaba la vista o el color del alimento.

En 1903, Pávlov inventó el término «reflejo condicionado» para este fenómeno: la salivación era una «respuesta condicionada». Involuntariamente, el perro segregaba saliva al oír la campana, del mismo modo como la habría segregado al ver el alimento. Por supuesto, la respuesta condicionada podía ser suprimida, por ejemplo, negando al perro repetidamente la comida cuando sonaba la campana y sometiéndolo, en cambio, a un moderado shock eléctrico. Eventualmente, el perro no segregaría saliva, pero en cambio se estremecería al sonar la campana, aunque no recibiera el shock eléctrico.

Además, Pávlov fue capaz, de obligar a los perros a tomar sutiles decisiones, asociando el alimento a un círculo luminoso y un shock eléctrico a una elipse luminosa.

El perro podría hacer la distinción, pero cuando la elipse se hacía cada vez más circular, la distinción resultaba difícil. A veces, el perro, en una agonía de indecisión, desarrollaba lo que sólo podía llamarse una «crisis nerviosa».

Las experiencias de condicionamiento se han convertido en un poderoso instrumento en psicología. A través de ellas, los animales algunas veces llegan casi a «hablar» con el experimentador. La técnica ha hecho posible investigar las capacidades de aprendizaje de diversos animales, sus instintos, su capacidad visual, su capacidad para diferenciar los colores, etc. De todas las investigaciones, no fueron menos llamativas las del naturalista austriaco Karl von Frisch. Von Frisch entrenó abejas para dirigirse a platos situados en un cierto lugar para tomar su alimento, y observó que estos buscadores de alimentos pronto señalaban a otras

abejas en su colmena donde se hallaba localizado el alimento. A partir de sus experiencias, Von Frisch dedujo que las abejas podían distinguir ciertos colores, incluso el ultravioleta, pero no el rojo, y que se comunicaban con otras mediante una danza sobre las colmenas, que la naturaleza y el vigor de la danza indicaban la dirección y distancia del plato con el alimento a la colmena, e incluso lo abundante o escasa que era la cantidad del alimento, y que las abejas eran, capaces de conocer la dirección por la polarización de la luz en el cielo. Los fascinantes descubrimientos de Von Frisch acerca del lenguaje de las abejas abrió todo un nuevo campo al estudio del comportamiento animal.

En teoría, puede considerarse que todo aprendizaje consiste de respuestas condicionadas. Al aprender a escribir a máquina, por ejemplo, se empieza por observar las teclas y gradualmente a sustituir por ciertos movimientos automáticos de los dedos la selección visual de la tecla apropiada. Así, el pensamiento «K» se acompaña de un movimiento específico del dedo medio de la mano derecha; el pensamiento «el» causa que el segundo dedo de la mano izquierda y el primer dedo de la mano derecha golpeen las teclas en ese orden.<sup>9</sup> Estas respuestas no implican la realización de un pensamiento consciente. A veces, un mecanógrafo con práctica debe detenerse y pensar dónde se encuentran las letras. Personalmente soy un mecanógrafo rápido y completamente mecánico, y si se me pregunta, por ejemplo, dónde se halla situada la letra «f» sobre el teclado, lo único que puedo contestar (después de mirar brevemente el teclado) es moviendo mis dedos en el aire, como si picara en la máquina e intentar captar uno de estos movimientos en el momento de marcar la «f». Sólo mis dedos conocen el teclado; mi mente consciente no.

El mismo principio puede aplicarse a un aprendizaje más complejo, tal como leer o tocar el violín. ¿Por qué, después de todo, el diseño **CARBÓN**, en negritas sobre este papel, evoca automáticamente la imagen de una barra de acero teñida y un cierto sonido que representa una palabra? Usted no precisa decir las letras o buscar en su memoria o razonar acerca del posible mensaje contenido en el diseño; por un condicionamiento repetido, asocia automáticamente el símbolo con la misma cosa.

---

<sup>9</sup> O hay un error de traducción o hay un error de Asimov, muy poco probable teniendo en cuenta cómo escribía, pero la afirmación de cómo escribir "el" no es correcta, ni siquiera en inglés (N. de Xixoxux)

En las primeras décadas de este siglo, el psicólogo americano John Broadus Watson construyó toda una teoría del comportamiento humano, llamada «behaviorismo», basada en el condicionamiento. Watson incluso llegó a sugerir que la gente no tenía un control deliberado sobre la forma como se comportaba; ésta se hallaba determinada por condicionamientos. Aunque esta teoría fue popular en aquella época, nunca tuvo gran aceptación entre los psicólogos. En primer lugar, aún cuando la teoría fuera básicamente correcta -si el comportamiento sólo es guiado por el condicionamiento- el «behaviorismo» no vierte mucha luz sobre aquellos aspectos del comportamiento humano que tienen el máximo interés para nosotros, tales como la inteligencia creadora, la capacidad artística y el sentido de lo correcto y lo incorrecto.

Sería imposible identificar todas las influencias condicionantes y relacionarlas a un modelo de pensamientos y creencias de cualquier forma mensurable; y algo que no puede ser medido no puede ser sujeto de un estudio realmente científico.

En segundo lugar, ¿qué es lo que tiene que ver el condicionamiento con un proceso tal como la intuición? La mente, bruscamente, asocia dos pensamientos o sucesos previamente no relacionados, en apariencia por azar, y crea una idea o respuesta enteramente nueva.

Los gatos y los perros, al resolver tareas (por ejemplo, hallar cómo deben accionar una palanca con objeto de abrir una puerta), pueden hacerlo por un proceso de ensayo y error. Pueden moverse casi al azar y frenéticamente hasta que alguno de sus movimientos acciona la palanca. Si se les permite repetir la tarea, una vaga memoria del movimiento adecuado puede inducirles a hacerlo con mayor rapidez, y luego aún más tempranamente en el siguiente intento, hasta que por último mueven en el primer intento la palanca. El animal más inteligente es el que realiza menos intentos para, a partir de los movimientos según el proceso de ensayo-error, llegar a una acción útil con un cierto propósito.

Cuando llegamos al ser humano, la memoria ya no es escasa. La tendencia suele ser buscar una moneda de diez céntimos, que se ha caído, dirigiendo ojeadas al azar hacia el suelo, pero por experiencias pasadas puede mirar en lugares en los que ha hallado la moneda en ocasiones precedentes, o bien mirar en la dirección del sonido que ha producido al caer, o bien efectuar, una búsqueda sistemática por el

suelo. De forma similar, si se hallara en un lugar cerrado, podría intentar escaparse golpeando o dando puntapiés en las paredes, al azar, pero también podría saber el aspecto que tendría una puerta y concentrar sus esfuerzos sobre lo que se pareciera a ella. En resumen, un hombre puede simplificar el proceso de ensayo y error al recordar la experiencia acumulada en años precedentes, y transferirla del pensamiento a la acción. Al buscar una solución, puede no hacer nada más que simplemente pensar. Este ensayo y error espiritual es lo que nosotros llamamos razón, y que no se halla simplemente restringida a la especie humana.

Los monos, cuyos tipos de comportamiento son más simples y más mecánicos que los del ser humano, muestran algunos indicios espontáneos de lo que puede llamarse razón. El psicólogo alemán Wolfgang Köhler, encontrándose en una de las colonias de África, al iniciarse la Primera Guerra Mundial, descubrió algunos sorprendentes ejemplos de esto en sus famosos experimentos con chimpancés. En un caso, un chimpancé, después de intentar en vano alcanzar plátanos con un palo que era demasiado corto, tomó bruscamente otra caña de bambú que el experimentador había dejado allí, unió los dos palos entre sí y de este modo logró llegar hasta los frutos. En otro caso, un chimpancé amontonó una caja sobre otra hasta alcanzar los plátanos que pendían sobre él. Estos actos no habían sido precedidos de un entrenamiento o experiencia que pudiera haber creado la asociación en el animal; aparentemente, eran fugaces destellos de inspiración.

Para Köhler, el aprendizaje implicaba la totalidad de un proceso, más que porciones individuales de él. Fue uno de los fundadores de la escuela psicológica de la *Gestalt* (que es la palabra alemana «modelo»).

A decir verdad, el poder del condicionamiento ha resultado ser bastante más amplio de lo que se había supuesto. Durante largo tiempo se creyó que ciertas funciones corporales, tales como las pulsaciones cardíacas, la presión sanguínea, las contracciones intestinales, se hallaban fundamentalmente bajo la supervisión del sistema nervioso autónomo y, por tanto, eran ajenas al control consciente. Desde luego, hay ciertos ardides. Por ejemplo, un adepto del yoga puede producir ciertos efectos en sus latidos cardíacos mediante el control de los músculos pectorales, pero eso es tan significativo como detener la hemorragia de una arteria en la muñeca ejerciendo presión con el pulgar. Por otra parte, podemos acelerar los

latidos del corazón simulando un estado de ansiedad, pero eso es una manipulación consciente del sistema nervioso autónomo. ¿Es posible acelerar la marcha del corazón o elevar la presión sanguínea sin recurrir a las manipulaciones extremas de los músculos o el cerebro? El psicólogo americano Neal Elgar Miller y sus colaboradores han llevado a cabo experimentos de condicionamiento con ratas: recompensaban a los animales cuando éstos lograban elevar su presión sanguínea por una razón u otra, o acelerar y retardar los latidos de su corazón. Con el tiempo, y estimuladas por el codiciado premio, las pequeñas bestias aprendieron a ejecutar espontáneamente los cambios efectuados por el sistema nervioso autónomo -tal como hubieran aprendido a apretar una palanca con idéntica finalidad-.

Por lo menos uno de los diversos programas experimentales en los que se empleaban voluntarios humanos (varones) a quienes se recompensaba con rápidas proyecciones luminosas de fotografías de muchachas desnudas, demostraron la capacidad de los voluntarios para suscitar una elevación o un descenso de la presión sanguínea como respuesta, los voluntarios no sabían lo que se esperaba de ellos para provocar las proyecciones -y las imágenes desnudas-, pero tras unas cuantas pruebas percibieron que con esa actitud podían contemplar más a menudo el grato espectáculo.

Asimismo los controles corporales autónomos tienen más sutileza de lo que se había supuesto en un principio. Puesto que los organismos naturales están sujetos a los ritmos naturales -el flujo y reflujo de las mareas, la alternancia algo más lenta del día y la noche, la oscilación todavía más pausada de las estaciones-, no es sorprendente que ellos mismos reaccionen también rítmicamente. Los árboles se desprenden de sus hojas en otoño y echan brotes en primavera; los seres humanos tienen sueño por la noche y se despabilan al amanecer.

Lo que no se percibió claramente hasta fechas muy recientes fue la complejidad y multiplicidad de las respuestas rítmicas, así como su naturaleza automática, que persiste incluso en ausencia del ritmo ambiental.

Así, por ejemplo, las hojas de los vegetales se yerguen y abaten en un ritmo diurno coincidiendo con la salida y la puesta del sol. Esto lo reveló la fotografía a altas velocidades. Los arbustos creciendo en la oscuridad no mostraron ese ciclo, pero la potencialidad estaba allí, y una exposición a la luz -una tan sólo- fue suficiente para

transformar la potencialidad en realidad. Entonces se inició el ritmo, e incluso prosiguió cuando se suprimió otra vez la luz. El período exacto del ritmo varió de una planta a otra -desde las 24 a las 26 horas con ausencia de luz-, pero siempre rondando las 24 horas bajo los efectos reguladores del sol. Se verificó un ciclo de 20 horas utilizando la luz artificial alternativamente -10 horas encendida, 10 apagada-, pero tan pronto como se dejó encendida la luz se restableció el ritmo aproximado de 24 horas.

Ese ritmo diario, especie de «reloj biológico» que funciona incluso sin los estímulos externos, afecta a la vida entera. Franz Halberg, de la Universidad de Minnesota, lo denominó «ritmo circasiano» del latín «circa dies» que significa «alrededor de un día».

Los seres humanos no son inmunes a esos ritmos. Diversos hombres y mujeres se ofrecieron voluntariamente para vivir durante meses en cavernas, sin mecanismos de relojería e ignorando cuándo era de día o de noche. Pronto perdieron toda idea del tiempo, comieron y durmieron de forma errática. Ahora bien, tomaron buena nota de su temperatura, pulso, presión sanguínea, ondas cerebrales y enviaron esos datos junto con otras medidas a la superficie, donde los observadores los analizaron en función del tiempo. Resultó que, si bien los cavernícolas mostraron desorientación con respecto al tiempo, su ritmo corporal no lo mostró. El ritmo mantuvo obstinadamente un período aproximado de veinticuatro horas, con todas las medidas elevándose y descendiendo regularmente pese a la larga estancia en la cueva.

Esto no es tan sólo, ni mucho menos, una cuestión abstracta. En la Naturaleza, la rotación terrestre se mantiene inmutable, la alternancia entre día y noche permanece constante, está al abrigo de cualquier interferencia humana, pero únicamente si uno permanece en el mismo lugar de la Tierra o se traslada de Norte a Sur. Ahora bien, si recorremos rápidamente grandes distancias de Este a Oeste, cambiamos la hora del día. Podemos aterrizar en Japón para el almuerzo (horario japonés), cuando nuestro reloj biológico está anunciando que es hora de irse a la cama. En la Era del reactor, el viajero encuentra creciente dificultades para compaginar su actividad con la de gentes que le rodean y hacen su vida normal. Si lo hace cuando su esquema de secreción hormonal, por ejemplo, no coincide con el

esquema de su actividad , se sentirá cansado y debilitado, padecerá «fatiga de reactor».

En tonos menos dramáticos, la capacidad de un organismo para soportar una dosis de rayos X o diversos medicamentos depende, a menudo, de la disposición del reloj biológico. Puede ocurrir que el tratamiento médico deba variar con las horas del día, o bien circunscribirse a una hora determinada para alcanzar un efecto óptimo y reducir a un mínimo los efectos secundarios. ¿A qué se deberá esa admirable regularidad del reloj biológico? Se sospecha que su regulador sea la glándula pineal. En algunos reptiles, la glándula pineal está particularmente desarrollada y parece similar, por su estructura, al ojo. La tuátara, un reptil parecido al lagarto, una especie superviviente de su orden y existente tan sólo en algunas islas pequeñas de Nueva Zelanda, tiene un singular «ojo pineal»: es un abultamiento en el centro del cráneo, cubierto de piel, particularmente prominente seis meses después del nacimiento y sensible a la luz sin duda alguna.

La glándula pineal no tiene «visión» en el sentido usual de la palabra, pero produce una sustancia química que asciende y desciende respondiendo rítmicamente a la aparición y desaparición de la luz. Es posible, pues, que regule el reloj biológico e incluso lo haga cuando se interrumpe la periodicidad de la luz (habiendo aprendido su lección química mediante una especie de condicionamiento ).

Pero preguntémonos ahora cómo trabaja la glándula pineal en los mamíferos, pues aquí no se halla bajo la piel en el centro del cráneo, sino enterrada profundamente debajo del cerebro y ocupando su centro. ¿Existirá algo más penetrante que la luz, algo cuyo ritmo tenga el mismo sentido? Hay quienes especulan sobre los rayos cósmicos pensando encontrar ahí la respuesta. Estos rayos tienen un ritmo circadiano propio, gracias al campo magnético terrestre y al viento solar, y quizás esa fuerza sea un regulador externo. Pero, aunque se encontrara el regulador externo, ¿acaso es identificable el reloj biológico interno? ¿No habrá alguna reacción química en el cuerpo que se eleve y descienda a un ritmo circadiano y controle todos los ritmos restantes? ¿No hay ninguna reacción rectora a la que podamos etiquetar como *e/ reloj biológico?* De ser así, no se ha logrado encontrarla todavía.

Por simple razonamiento, a partir del reflejo condicionado resulta difícil comprender las sutilezas de la intuición y de la razón. Se ha iniciado el estudio del

comportamiento humano con métodos que son sumamente intuitivos. Estos métodos se remontan casi dos siglos atrás, hasta un médico austriaco, Franz Anton Mesmer, que se convirtió en la sensación de Europa debido a sus experiencias con un poderoso instrumento para estudiar el comportamiento humano. Utilizó primero imanes y luego sólo sus manos, obteniendo sus efectos mediante lo que él llamó «magnetismo animal» (luego rebautizado con el nombre de «mesmerismo»); colocaba un paciente en trance y señalaba que el paciente estaba curado de su enfermedad. Pudo muy bien haber curado a algunos de sus pacientes (ya que es posible tratar algunos trastornos por sugestión), y como consecuencia de esto fueron muy numerosos sus ardientes seguidores, inclusive el marqués de Lafayette, poco después de su triunfo en Norteamérica. Sin embargo, Mesmer, un ardiente astrólogo y místico, fue investigado con escepticismo, pero con imparcialidad, por un comité, formado, entre otros, por Lavoisier y Benjamin Franklin, y denunciado como farsante, cayendo pronto en desgracia.

No obstante, había iniciado algo nuevo. En 1850, un cirujano británico llamado James Braid dio nuevo auge al hipnotismo (fue el primero en usar este término) como procedimiento útil en medicina, y otros médicos también lo adoptaron. Entre ellos se encontraba un doctor vienes llamado Josef Breuer, quien, hacia 1880, empezó a usar la hipnosis específicamente para tratar los trastornos nerviosos y emocionales.

Por supuesto, el hipnotismo (del griego *hypnos* = sueño) se conocía desde los tiempos antiguos, y había sido usado a menudo por los místicos. Pero Breuer y otros empezaron ahora a interpretar sus efectos como prueba de la existencia de un nivel «inconsciente» de la mente.

Motivaciones de las que el individuo era inconsciente, se hallaban enterradas ahí, y podrían ser puestas al descubierto mediante la hipnosis. Era tentador suponer que estas motivaciones eran suprimidas por la mente consciente, debido a que se hallaban asociadas a los sentimientos de vergüenza o de culpabilidad, y que podían explicar un comportamiento sin finalidad alguna, irracional o incluso vicioso.

Breuer empleó el hipnotismo para demostrar las causas ocultas de la histeria y otros trastornos del comportamiento. Trabajaba con él un discípulo llamado Sigmund Freud. Durante varios años trataron a pacientes, sometiéndolos a una ligera

hipnosis y alentándoles a hablar. Hallaron que los pacientes exponían experiencias o impulsos ocultos en el inconsciente, lo cual a menudo actuaba como un catártico, haciendo desaparecer sus síntomas después de despertarse de la hipnosis.

Freud llegó a la conclusión de que prácticamente la totalidad de los recuerdos y motivaciones reprimidas eran de origen sexual. Los impulsos sexuales, convertidos en tabú por la sociedad y los padres del niño, eran profundamente sumergidos en el inconsciente, pero aún así intentaban hallar expresión y generaban intensos conflictos que eran sumamente perjudiciales por no ser reconocidos y admitidos.

En 1894, después de romper con Breuer debido a que éste no estaba de acuerdo con su interpretación de que el factor sexual era la casi exclusiva causa desencadenante, Freud siguió solo su tarea, exponiendo sus ideas acerca de las causas y tratamiento de los trastornos mentales. Abandonó el hipnotismo y solicitaba de sus pacientes que hablaran de una forma casi al azar, es decir, diciendo aquello que surgiera en sus mentes. Cuando el paciente apreciaba que el médico prestaba una atención positiva a todo lo que decía, sin ninguna censura de tipo moral, lentamente -algunas veces muy lentamente-, el individuo empezaba a descubrir, a recordar cosas reprimidas desde hacía tiempo y olvidadas. Freud denominó «psicoanálisis» a este lento análisis de la «psique» (alma o mente en griego).

La dedicación de Freud al simbolismo sexual de los sueños y su descripción de los deseos infantiles para sustituir al progenitor del mismo sexo en el lecho marital («complejo de Edipo», en el caso de los muchachos, y «complejo de Electra», en las muchachas -denominados así en recuerdo a personajes de la mitología griega-) horrorizó a algunos y fascinó a otros. En la década de 1920, después de los estragos de la Primera Guerra Mundial y entre los ulteriores estragos de la prohibición en América y los cambios en las costumbres en muchas partes del mundo, los puntos de vista de Freud fueron bien acogidos y el psicoanálisis alcanzó la categoría de casi una moda popular. Sin embargo, más de medio siglo después de su descubrimiento, el psicoanálisis sigue siendo más un arte que una ciencia. Experiencias rigurosamente controladas, tales como las realizadas en Física y en otras ciencias «rigurosas», son, por supuesto, extraordinariamente difíciles de efectuar en Psiquiatría. Los médicos prácticos deben basar sus conclusiones, sobre

todo, en la intuición y el juicio subjetivo. La Psiquiatría (de la que el psicoanálisis sólo es una de las técnicas) ha ayudado indudablemente a muchos pacientes, pero no ha obtenido curas espectaculares ni ha reducido notablemente la incidencia de la enfermedad mental. Tampoco se ha desarrollado una teoría que abarque todos los distintos aspectos de ésta y sea aceptada de forma general, comparable a la teoría de los microorganismos en las enfermedades infecciosas. En realidad, existen casi tantas escuelas de Psiquiatría como psiquiatras.

La enfermedad mental grave adopta varias formas, que se extienden desde la depresión crónica a una total separación de la realidad, en un mundo en el que algunos, al menos, de los detalles no corresponden a la forma como la mayoría de las personas ven las cosas. Esta forma de psicosis se denomina en general «esquizofrenia», término introducido por el psiquiatra suizo Eugen Bleuler. Esta palabra abarca tal multitud de trastornos, que no puede ser descrita como una enfermedad específica. Cerca del 60 % de todos los pacientes crónicos en nuestros frenocomios son diagnosticados como esquizofrénicos.

Hasta hace poco, únicamente podían ofrecerse tratamientos drásticos, como la lobotomía prefrontal o la terapéutica por shock eléctrico o insulínico (la última técnica fue introducida en 1933 por el psiquiatra austriaco Manfred Sakel). La Psiquiatría y el Psicoanálisis han representado una escasa aportación, salvo ocasionalmente estos primeros estadios, cuando el médico todavía es capaz de comunicarse con el paciente. Pero algunos recientes descubrimientos farmacológicos y de la química del cerebro («Neuroquímica») han proporcionado nuevas y alentadoras esperanzas.

Incluso antiguamente se sabía que ciertos jugos vegetales podían producir alucinaciones (ilusiones visuales, auditivas, etc.), y otros podían sumir a la persona en estados de felicidad. Las sacerdotisas de Delfos, en la antigua Grecia, masticaban alguna planta antes de pronunciar sus oráculos. Las tribus indias del sudoeste de Estados Unidos crearon el ritual religioso de masticar peyote o mescal (que produce alucinaciones en color). Quizás el caso más dramático fue el de una secta musulmana en una plaza fuerte de las montañas del Irán, que utilizó el hachís, el jugo de las hojas de cáñamo, más familiarmente conocido por «marihuana». El fármaco, tomado en las ceremonias religiosas, daba a los

consumidores la ilusión de conocer parte del paraíso al que sus almas irían después de morir, y obedecían cualquier mandato de su jefe, llamado el «Viejo de las Montañas», al objeto de recibir la llave del cielo. Sus órdenes eran matar a los enemigos de las reglas por él dictadas y a los oficiales hostiles del Gobierno musulmán: esto dio origen a la palabra «asesino», del árabe haxxaxin (el que usa haxix). Esta secta aterrorizó a la región hasta el siglo XII, en el que los invasores mongólicos, en 1226, se extendieron por las montañas y mataron hasta el último asesino.

El equivalente moderno de las hierbas euforizantes de los primeros tiempos (aparte del alcohol) es el grupo de fármacos conocidos como «tranquilizantes». Uno de los tranquilizantes se conoce en la India desde 1000 años a. de J.C., en forma de una planta llamada *Rauwolfia serpentina*. A partir de las raíces secas de esta planta, unos químicos americanos trajeron, en 1952, la «reserpina», el primero de los tranquilizantes de uso popular. Varias sustancias con efectos similares poseen una estructura química más sencilla y han sido sintetizadas desde entonces.

Los tranquilizantes son sedantes, pero con una cierta diferencia. Reducen la ansiedad, sin deprimir apreciablemente otras actividades mentales. No obstante, tienden a crear somnolencia en las personas, y pueden ejercer otros efectos indeseables. Pero se halló que constituían una ayuda inapreciable para sedar y mejorar de su dolencia a los dementes, incluso a algunos esquizofrénicos. Los tranquilizantes no curan la demencia, pero suprimen ciertos síntomas que se oponen al tratamiento adecuado.

Al suprimir la hostilidad y la ira de los pacientes, y al calmar sus temores y ansiedades, reducen la necesidad de medidas drásticas encaminadas a restringir su libertad, facilitan que los psiquiatras establezcan contacto con los pacientes y aumentan las posibilidades de que el paciente abandone el hospital.

Pero los tranquilizantes alcanzaron una aceptación tan enorme entre el público, que aparentemente llegaron a considerarlos una panacea para olvidarse de todos sus problemas.

La reserpina resultó tener una gran semejanza con una importante sustancia del cerebro. Una porción de su compleja molécula es bastante similar a la sustancia

llamada «serotonina». La serotonina fue descubierta en 1948, y desde entonces ha intrigado sumamente a los fisiólogos.

Se demostró su presencia en la región hipotalámica del cerebro humano y también diseminada en el cerebro y el tejido nervioso de otros animales, inclusive los invertebrados. Lo que es más importante, otras sustancias que afectan al sistema nervioso central presentan gran parecido con la serotina<sup>10</sup>. Una de ellas es un compuesto del veneno de los sapos llamado «bufotonina». Otra es la mescalina, la sustancia activa de los botones de mescal. La más dramática de todas es una sustancia llamada «dietilamina del ácido lisérgico» (conocida popularmente como LSD). En 1943, un químico suizo llamado Albert Hofmann llegó a absorber parte de este compuesto en el laboratorio y experimentó extrañas sensaciones. Desde luego, lo que él creyó percibir mediante sus órganos sensoriales no coincidió desde ningún concepto con lo que nosotros tenemos por la realidad objetiva del medio ambiente. Él sufrió lo que llamamos alucinaciones, y el LSD es un ejemplo de lo que se denomina hoy día un «alucinógeno».

Quienes encuentran gratas las sensaciones experimentadas por influjo de un alucinógeno, lo describen como una «expansión mental», significando aparentemente que sienten -o creen sentir- el Universo más y mejor que en condiciones ordinarias. Pero eso mismo les ocurre también a los alcohólicos cuando consiguen alcanzar la fase del «delirium tremens». La comparación no es tan desmesurada como pudiera parecer, pues ciertas investigaciones han demostrado que una pequeña dosis de LSD puede provocar en algunos casos imuchos síntomas de la esquizofrenia!

¿Qué puede significar todo esto? Bien, la serotonina (que es estructuralmente similar al aminoácido triptófano) puede ser escindida por una enzima llamada «amino-oxidasa», que existe en las células cerebrales. Supongamos que esta enzima es bloqueada por la acción de una sustancia competidora con una estructura similar a la serotonina -por ejemplo, el ácido lisérgico-. Cuando se elimine de este modo la enzima degradante, la serotonina se acumulará en las células cerebrales, y su concentración aumentará sumamente. Esto trastornará el equilibrio de

---

<sup>10</sup> La diferencia de nombres "serotonina" y "serotina" figura en el original en castellano. (N. de Xixoxux)

serotonina en el cerebro y podrá determinar la aparición de un estado esquizofrénico.

¿Es posible que la esquizofrenia tenga su origen en un fenómeno de este tipo inducido de forma natural? La forma en que lo hereda la esquizofrenia ciertamente apunta a la existencia de algún trastorno metabólico (uno que, además, es controlado por genes). En 1962 se comprobó que, con cierto tratamiento, la orina de los esquizofrénicos contenía a menudo una sustancia ausente en la orina de los no esquizofrénicos. Tal sustancia resultó ser un compuesto químico denominado «dimetoxifeniletilamina», cuya estructura lo sitúa entre la adrenalina y la mescalina. Dicho de otra forma, ciertos esquizofrénicos parecen fabricar mediante algún error metabólico sus propios alucinógenos y entonces se hallan, en efecto, sometidos a intoxicación permanente.

Una dosis determinada de cualquier droga no hace reaccionar de idéntica forma a todo el mundo. Ahora bien, evidentemente es peligroso jugar con el mecanismo químico del cerebro. El convertirse en demente es un precio demasiado alto para la mayor o menor diversión que pueda proporcionar la «expansión mental». Pese a todo, la reacción de la sociedad contra el empleo de drogas -particularmente la marihuana, de la cual no se ha podido demostrar hasta ahora que sea tan dañina como otros alucinógenos- tiende a desorbitarse. Muchos de quienes condenan el uso de drogas son empedernidos consumidores de alcohol o tabaco, dos productos responsables de muchos males padecidos por el individuo y la sociedad. Este tipo de hipocresía tiende a minar la credibilidad del movimiento «antidroga».

La Neuroquímica nos da esperanzas de poder comprender algún día esa propiedad mental tan evasiva conocida por «memoria». Al parecer, hay dos variedades de memoria: de corto plazo y de largo plazo. Si buscamos un número telefónico, no nos será difícil recordarlo hasta la hora de marcar; luego lo olvidaremos automáticamente y, con toda probabilidad, no lo recordaremos jamás. Sin embargo, el número de teléfono que usamos frecuentemente no se desvanece, pertenece a la memoria de largo plazo. Incluso tras un lapso de varios meses, resurge con facilidad.

Sin embargo, se pierde mucho de lo que conceptuamos como elementos pertenecientes a la memoria de largo plazo. Nosotros olvidamos innumerables cosas

e incluso algunas de importancia vital (todo estudiante, en vísperas de exámenes, lo atestigua así, completamente abatido). Pero. ¿las olvidamos realmente? ¿Se han desvanecido de verdad, o están tan bien almacenadas que no sabemos dónde buscarlas, escondidas, por así decirlo, bajo muchos artículos triviales? La reproducción de estos recuerdos ocultos se ha convertido en una reproducción casi literal. El cirujano estadounidense Wilder G. Penfield, en la Universidad McGill, de Montreal, mientras operaba el cerebro de un paciente, tocó accidentalmente una zona particular, que motivó que el paciente oyera música. Esto ocurrió una y otra vez.

El paciente podía revivir la experiencia completamente, mientras permanecía del todo consciente acerca de los sucesos del presente. Al parecer, la estimulación apropiada puede hacer recordar con gran exactitud hechos pasados. El área implicada es la denominada «corteza interpretativa». Puede ser que la estimulación accidental de esta porción de la corteza dé lugar al fenómeno de *déjà vu* (la sensación de que ya ha ocurrido algo con anterioridad) y otras manifestaciones de «percepción extrasensorial».

Pero si la memoria es tan detallada. ¿cómo puede el cerebro hallar espacio para todo ello? Se estima que, durante la vida, el cerebro puede almacenar 1.000.000.000.000 (mil billones) de unidades de información. Para almacenar tan ingente cantidad, las unidades de almacenamiento deben ser de tamaño molecular. No habría espacio para nada mayor. .

Las sospechas se centran, en la actualidad, en el ácido ribonucleico (ARN) del que la célula nerviosa, sorprendentemente, es más rica que casi cualquier otro tipo de célula del organismo. Esto es sorprendente debido a que el ARN se halla implicado en la síntesis de las proteínas (véase capítulo XII) y, por ello, suele encontrarse en cantidades particularmente elevadas en aquellos tejidos que producen grandes cantidades de proteínas, bien porque están creciendo activamente o porque producen copiosas cantidades de secreciones ricas en proteínas. La célula nerviosa no puede inclinarse en ninguno de estos casos.

Un neurólogo sueco, Holger Hyden, concibió técnicas mediante las cuales se podían separar células individuales del cerebro y analizarlas para verificar su contenido de ARN. Este científico colocó a las ratas de laboratorio en unas condiciones especiales

que les obligaban a aprender nuevas habilidades, tales como mantener el equilibrio sobre un alambre durante largos periodos de tiempo.

En 1959, descubrió que las células cerebrales de las ratas obligadas a este aprendizaje aumentaban su contenido de ARN en un 12 % mas que las células de otras ratas cuya vida se desarrollaba normalmente.

La molécula de ARN es tan grande y compleja que, si cada unidad de memoria almacenada estuviera constituida por una molécula de ARN de distinto tipo, no necesitaríamos preocuparnos acerca de la capacidad. Existen tantos patrones diferentes de ARN que incluso el número de mil billones es insignificante en comparación.

Pero, ¿deberíamos considerar el ARN como elemento aislado? Las moléculas de ARN se forman en los cromosomas con arreglo al esquema de las moléculas de ADN. ¿No será que cada persona lleva consigo una gran reserva de memorias potenciales - «un banco de memoria», por así decirlo- en sus moléculas de ADN, solicitadas y activadas *por* los acontecimientos corrientes con las adecuadas modificaciones? y ¿acaso el ARN representa el fin? La función primaria del ARN es la de formar moléculas proteínicas específicas. ¿Será la proteína y no el ARN lo que esté relacionado verdaderamente con la función «memoria»? Una forma de verificarlo es el empleo de cierta droga llamada «puromicina», que intercepta la formación de proteínas por el ARN. El matrimonio americano Louis Barkhouse Flexner y Josepha Barbar Flexner, trabajando en equipo, condicionaron unos cuantos ratones para resolver un laberinto e inmediatamente después les inyectaron puromicina. Los animales olvidaron todo lo aprendido. La molécula de ARN estaba todavía allí, pero no podía formar la molécula proteínica básica. Mediante el empleo de la puromicina, los Flexner demostraron que, por ese conducto, se podía borrar la memoria de corto plazo. Presumiblemente, en este último caso se habían formado ya las proteínas. No obstante, también era posible que la memoria fuera más sutil y no hubiera forma de explicarla en el simple plano molecular. Según ciertos indicios, también pueden mediar ahí los esquemas de la actividad neural. Evidentemente, queda todavía mucho por hacer.

## Retroacción O Retrorregulación

El ser humano no es una máquina, y la máquina no es un hombre, pero a medida que avanza la ciencia y la tecnología, el hombre y la máquina parecen diferenciarse cada vez menos.

Si se analiza lo que hace el hombre, uno de los primeros pensamientos que se nos ocurren es que cualquier otro organismo vivo es un sistema que se autorregula.

Es capaz de controlarse no sólo a sí mismo, sino, además, de modificar su ambiente. Resuelve los problemas que las modificaciones en el medio ambiente pueden plantearle, no doblegándose a ellas, sino reaccionando de acuerdo con sus propios deseos y esquemas. Permítasenos considerar más detenidamente cómo una máquina puede llegar a hacer lo mismo.

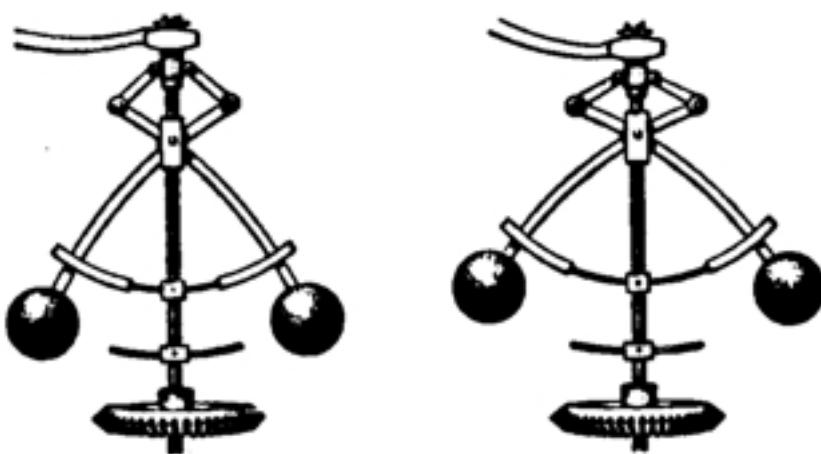
La forma más sencilla de dispositivo mecánico que se autorregula es la válvula de seguridad. Una versión muy elemental de ésta se halla en las ollas de presión, inventadas por Denis Papin, en 1679. Para mantener cerrada la válvula y contrarrestar la presión del vapor, colocó un peso sobre ella, pero empleó un peso lo suficientemente ligero para que la válvula pudiera abrirse antes de que la presión alcanzara tal grado que la olla explotara. La olla de presión actual, utilizada en el hogar, tiene dispositivos más sofisticados para este fin (tales como un cierre que se funde cuando la temperatura se eleva excesivamente), pero el principio en que se basa es el mismo.

Por supuesto, éste es un tipo de regulación que funciona sólo una vez. Pero es fácil pensar en ejemplos de regulación continua. Un tipo primitivo fue un dispositivo patentado, en 1745, por un inglés, Edmund Lee, para que las aspas de un molino de viento siempre se hallaran situadas perpendicularmente a la dirección en que soplaban el viento. Ideó una especie de cola con pequeñas aletas que recibían el impulso del aire, cualquiera que fuese la dirección en que soplaban el aire; el giro de estas aletas ponía en movimiento una serie de engranajes que hacían girar las aspas, de tal modo que sus brazos principales eran movidos por el aire en la nueva dirección.

En esta posición, la cola permanecía inmóvil; sólo giraba cuando las aspas no se hallaban encaradas con el aire.

Pero el arquetipo de todo autorregulador mecánico es la válvula inventada por James Watt, para su máquina de vapor. Para mantener constante la salida del vapor

de su máquina. Watt concibió un dispositivo que consistía de un eje vertical con dos pesos unidos a él lateralmente mediante varillas deslizantes, que permitían a los pesos ascender y descender. La presión del vapor hacía girar el eje. Cuando aumentaba la presión del vapor, el eje giraba más de prisa y la fuerza centrífuga hacía que los pesos se elevaran. Al moverse, cerraban parcialmente la válvula, impidiendo la salida del vapor. Cuando la presión del vapor descendía, el eje giraba con menos rapidez, la gravedad empujaba los pesos hacia abajo y la válvula se abría.



*Regulador de Watt.*

Así, la válvula de Watt controlaba la velocidad del eje y, por tanto, la fuerza liberada, manteniéndola a un nivel uniforme. Cualquier desviación de ese nivel ponía en marcha una serie de fenómenos que corregían la desviación. Esto se denomina retrorregulación o retroacción: la propia desviación genera continuamente información en sentido retrógrado y sirve para medir la corrección requerida. Un ejemplo moderno muy familiar de un dispositivo de retrorregulación es el «termostato», usado en su forma más primitiva por el inventor holandés Comelis Drebble, a principios del siglo XVII. Una versión más sofisticada, aún empleada, fue inventada, en principio, por un químico escocés llamado Andrew Ure, en 1830. Su componente esencial consiste en dos tiras de metales distintos puestas en contacto y soldadas. Dado que estos metales se dilatan y contraen a diferentes velocidades con los cambios de temperatura, la tira se dobla. Cuando el termostato se encuentra, por ejemplo, a 21º C y la temperatura de la habitación desciende por

debajo de ésta, el par termoeléctrico se dobla de tal manera que establece un contacto que cierra un circuito eléctrico, el cual, a su vez, pone en marcha el sistema de calefacción. Cuando la temperatura asciende por encima de los 21º C, el par termoeléctrico vuelve a flexionarse, en sentido contrario, lo suficiente como para abrir el circuito. Así, el calentador regula su propia operación mediante un mecanismo de retroacción. Es la retroacción la que de forma similar controla las actividades del cuerpo humano. Consideremos, por ejemplo, uno de los muchos que existen, tal como el nivel de glucosa en sangre, que es controlado por el páncreas, glándula productora de insulina, del mismo modo que la temperatura de una casa es regulada por el sistema de calefacción, y del mismo modo que la actividad de éste es regulada por la desviación de la temperatura de su valor normal, así la secreción de insulina es regulada por la desviación de la concentración de glucosa con respecto a la normal. Un nivel demasiado elevado de glucosa determina la liberación de insulina, del mismo modo que una temperatura demasiado baja pone en marcha el calentador. De forma similar, al igual que un termostato puede ser ajustado a una temperatura más alta, así también una modificación interna en el organismo, tal como la determinada por la secreción de adrenalina, puede incrementar la actividad del cuerpo humano hasta un nuevo valor normal, por así decirlo.

La autorregulación en los organismos vivos, para mantener un valor normal constante, denominada «homeostasis» por el fisiólogo americano Walter Bradford Cannon, fue un claro exponente de la investigación del fenómeno en la primera década del siglo XX.

La mayor parte de los sistemas, vivos e inanimados, muestran un cierto retraso en su respuesta a la retroacción. Por ejemplo, después de que un calentador ha sido apagado, continúa durante un cierto tiempo emitiendo calor residual; inversamente, cuando se enciende, tarda un rato en calentarse. Por tanto, la temperatura en la habitación no llega a alcanzar los 21º C, sino que oscila alrededor de este valor; siempre excede de este nivel en un sentido u otro. Este fenómeno, llamado de fluctuación, se estudió por vez primera, en 1830, por George Airy, el Astrónomo Real de Inglaterra, en relación con dispositivos que había ideado para mover automáticamente los telescopios, sincrónicamente con el movimiento de la Tierra.

El fenómeno de la fluctuación es característico de la mayor parte de los procesos en el ser vivo, desde el control del nivel de glucosa en sangre hasta el comportamiento consciente. Cuando se desea coger un objeto, el movimiento de la mano no es un movimiento simple, sino una serie de movimientos ajustados continuamente, tanto en su velocidad como en su dirección, corrigiendo los músculos las desviaciones de la línea de movimiento apropiada, en el que son corregidas aquellas desviaciones por el ojo. Las correcciones son tan automáticas que no se tiene noción de ellas. Pero al contemplar a un niño, que aún no tiene práctica en la retroacción visual, e intenta coger alguna cosa, se aprecia que realiza movimientos en exceso o en defecto, porque las correcciones musculares no son suficientemente precisas. Y las víctimas de una lesión nerviosa que interfiere la capacidad para utilizar la retroacción visual presentan patéticas oscilaciones, o una acusada fluctuación, cuando intentan realizar un movimiento muscular coordinado.

La mano normal, con práctica, se mueve suavemente hacia su objetivo, y se detiene en el momento oportuno, debido a que en el centro de control prevé lo que ocurriría y realiza las correcciones con antelación. Así, cuando un coche gira en una esquina, se empieza a dejar el volante antes de haber dado la vuelta, de tal modo que las ruedas se hallen derechas en el momento que se ha rodeado la esquina. En otras palabras, la corrección se aplica en el momento adecuado, para evitar que se rebase el límite en un grado significativo.

Evidentemente, el principal papel del cerebro es controlar este ajuste del movimiento por retroacción. Prevé y predice la posición del brazo algunos momentos antes, organizando el movimiento de acuerdo con ello. Mantiene los potentes músculos de la espalda en tensiones que varían constantemente, al objeto de conservar el equilibrio y la posición erecta. Es una pesada tarea hallarse de pie y no hacer nada; todos sabemos lo cansado que puede ser el permanecer de pie.

Ahora bien, este principio puede aplicarse a la máquina. Las cosas pueden disponerse de tal modo que, cuando el sistema se aproxima a la condición deseada, el margen cada vez menor entre su estado actual y el estado deseado ponga en marcha automáticamente la fuerza correctora, antes de que se exceda el límite deseado. En 1868, un ingeniero francés, Léon Farcot, aplicó este principio para inventar un control automático para un timón de barco accionado a vapor. Cuando

el timón alcanzaba la posición deseada, su dispositivo cerraba automáticamente la válvula de vapor; cuando el timón alcanzaba la posición específica, ya se había reducido la presión del vapor. Si el timón se separaba de esta posición, su movimiento abría la válvula apropiada, de tal modo que recobraba su posición original. Este dispositivo fue denominado «servomecanismo», y, en un cierto sentido, inició la era de la «automatización» (un término creado, en 1946, por el ingeniero americano D. S. Harder).

En realidad, los servomecanismos no adquirieron personalidad propia hasta el advenimiento de la electrónica. La aplicación de la electrónica permitió conferir a los mecanismos una sensibilidad y celeridad de respuesta superiores a las de un organismo vivo. Además, la radio extendió su esfera de acción a una considerable distancia. La bomba volante alemana de la Segunda Guerra Mundial era esencialmente un servomecanismo volante, e introdujo la posibilidad no sólo de los proyectiles dirigidos, sino también de los vehículos automáticos u operados a distancia de cualquier tipo, desde los trenes subterráneos a las aeronaves. Debido a que los militares han mostrado un gran interés por estos dispositivos, y las ingentes inversiones que por tal motivo se han realizado en este campo, los servomecanismos han alcanzado, quizá, su mayor desarrollo en los mecanismos de puntería y disparo de las armas y cohetes. Estos sistemas pueden detectar un objetivo que se mueve rápidamente a cientos de kilómetros de distancia, calcular instantáneamente su curso (teniendo en cuenta la velocidad de movimiento del objetivo, la velocidad del viento, las temperaturas de las diversas capas de aire, y otras muchas circunstancias), y dar en el blanco con gran exactitud, todo ello sin el control humano del proceso.

La automatización halló un ardiente teórico y abogado en el matemático Norbert Wiener. Hacia la década de 1940, él y su grupo, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, elaboraron algunas de las leyes matemáticas básicas que gobiernan la retroacción. Este científico denominó a este campo de estudio «cibernética», de la palabra griega «timonel», que parece apropiado, ya que los servomecanismos se usaron por vez primera en relación -con un timonel. (La cibernética también guarda relación con la válvula centrífuga de Watt, pues la palabra «regulador», término con el que también se conoce a esta válvula, procede de la palabra latina timonel.)

Desde la Segunda Guerra Mundial, la automatización ha progresado considerablemente, en particular en los Estados Unidos y en la Unión Soviética. Las refinerías de petróleo y las fábricas de objetos, tales como radios y pistones de aluminio, funcionan con procesos casi completamente automáticos, entrando las materias primas por un extremo y saliendo por el otro los productos acabados, siendo manipulados los procesos por máquinas autorreguladas. La automatización incluso ha invadido el agro: ingenieros en la Universidad de Wisconsin anunciaron, en 1960, un sistema de almacenamiento-alimentación automatizado, en el que las máquinas podrían alimentar cada almacén con la cantidad correcta del tipo adecuado de alimentos en el momento adecuado. .

En cierto sentido, la automatización señala el principio de una nueva Revolución Industrial. Al igual que la primera revolución, puede crear problemas de ajuste, no sólo para los trabajadores, sino también para la economía en general. Existe la anécdota de un ejecutivo de automóviles que acompañaba a un miembro sindical en su recorrido por una nueva factoría automática e hizo la observación: «Creo que podría obtener las cuotas que debemos abonar al sindicato a partir de estas máquinas.» El representante sindical respondió: «¿No sería usted capaz de venderles automóviles también?» La automatización no hará innecesario al trabajador humano, lo mismo que tampoco lo hizo la máquina de vapor o la electricidad. Pero, realmente, supondrá una gran desviación de las normas vigentes. La primera Revolución Industrial hizo que ya no fuera necesario que el hombre fuera un «animal de carga». La segunda hará innecesario que se convierta en un dispositivo automático sin inteligencia.

De forma natural, la retroacción y los servomecanismos han atraído tanto la atención de los biólogos como de los ingenieros. Las máquinas que se autorregulan pueden servir como modelos simplificados para el estudio de la actividad del sistema nervioso.

Hace una generación, la imaginación de los seres humanos fue excitada -y trastornada- por la obra de Karel Čapek, *R.U.R.* («Robots Universales de Rossem»; la palabra robot procede de la checa que significa «trabajar»). En los últimos años, los científicos han empezado a experimentar con diferentes formas de robots (ahora llamados usualmente «autómatas»), no como simples sustitutos mecánicos para el

ser humano, sino como herramientas para explorar la naturaleza de los organismos vivos. Por ejemplo, L. D. Harmon de la «Bell Telephone Laboratories», ideó un circuito transistorizado que, al igual que una neurona, emitía impulsos eléctricos cuando era estimulado. Tales circuitos podían ser acoplados a dispositivos que reproducían algunas de las funciones del ojo y del oído. En Inglaterra, el biólogo W. Ross Ashby creó un sistema de circuitos que exhibía respuestas reflejas simples. Llamó a su criatura un «homeostato», debido a que tenía la tendencia a mantener por sí mismo un estado estable.

El neurólogo británico W. Grey Walter ideó un sistema más elaborado, que exploraba y reaccionaba a su medio ambiente. Su sistema, similar a una tortuga, que llamó «testudo» (de la palabra latina tortuga), tiene una célula fotoeléctrica, que hace las veces de ojo, un dispositivo sensible para descubrir los objetos, y dos motores, uno para moverse hacia delante y hacia atrás y otro para girar. En la oscuridad, da vueltas en amplios círculos. Cuando toca un obstáculo, retrocede un poco, se vuelve ligeramente y de nuevo vuelve a avanzar; hace esto hasta que salva el obstáculo. Cuando su ojo fotoeléctrico ve una luz, el motor para el giro empieza a funcionar, y el «testudo» avanza en dirección rectilínea hacia la luz, ésta aumenta su brillantez, lo cual determina que el dispositivo retroceda, de tal modo que así evita el error cometido por la polilla. Cuando sus baterías están a punto de agotarse, el testudo, ahora «hambriento», puede aproximarse lo bastante a la luz como para establecer contacto con un elemento eléctrico próximo a la bombilla que emite luz. Una vez recargadas, es de nuevo lo suficientemente sensible como para retirarse del área de brillo intenso en torno a la luz.

El tema de los autómatas nos hace recordar las máquinas que en general imitan los sistemas vivientes. En cierto modo, los seres humanos, como fabricantes de herramientas, han imitado siempre todo cuanto veían a su alrededor en la Naturaleza. El cuchillo es un colmillo artificial; la palanca, un brazo artificial; la rueda tuvo como modelo el rodillo, que a su vez se inspiró en el tronco rodante de árbol, y así sucesivamente.

Sin embargo, hasta fechas muy recientes no se han aplicado todos los recursos de la ciencia para analizar el funcionamiento de los tejidos y órganos vivientes al objeto de poder imitar su actuación -perfeccionada a fuerza de tesón y errores

durante miles de millones de años de evolución- en las máquinas de factura humana. Este estudio se denomina «biónica», un término acuñado por el ingeniero americano Jack Steele, en 1960, y sugerido por el concepto biología electrónica, de mucho más alcance.

Para dar un ejemplo de lo que podría hacer la «biónica» consideremos la estructura de la piel del delfín, Los delfines nadan a una velocidad que requeriría 2,6 HP si el agua en torno suyo fuera tan turbulenta como lo sería alrededor de una embarcación del mismo tamaño aproximadamente. Por razones desconocidas, el agua roza los flancos del delfín sin turbulencias, y por tanto, se requiere escasa energía para vencer su resistencia. Aparentemente, esto obedece a la naturaleza de la piel del delfín. Si pudiéramos reproducir ese efecto en los costados de un buque, sería posible aumentar la velocidad de un trasatlántico y reducir su consumo de combustible al mismo tiempo.

Más tarde, el biofísico americano Jerome Lettvin estudió también minuciosamente la retina de la rana, insertando diminutos electrodos de platino en su nervio óptico.

Resultó que la retina no transmitía únicamente una mezcla de luz y puntos negros al cerebro dejando que éste hiciera toda la interpretación. En realidad, hay cinco tipos diferentes de células en la retina, designado cada uno para realizar un trabajo específico. Uno reacciona ante los perfiles, es decir ante los súbitos cambios producidos por la iluminación tal como el perfil de un árbol destacándose en el fondo del cielo. Otro reacciona ante los objetos curvados oscuros (los insectos que devora la rana). Un tercero lo hace ante cualquier cosa de rápidos movimientos (una criatura peligrosa a la que conviene evitar). El cuarto reacciona ante la luz crepuscular, y el quinto, ante el azul acuoso de un estanque. En otras palabras, el mensaje de la retina va al cerebro cuando ya se le ha analizado hasta cierto grado. Si los órganos sensoriales fabricados por el hombre actuasen como la retina de la rana, serían mucho más sensitivos y diversificados.

Ahora bien, si queremos construir una máquina que imite cualquier mecanismo viviente, la posibilidad más atractiva será la imitación de ese artificio único que despierta nuestro más profundo interés: el cerebro humano.

## Máquinas Pensantes

¿Podemos construir una máquina que piensa? Para intentar responder a esta pregunta, primero debemos definir lo que es «pensar».

Evidentemente, podemos elegir las matemáticas como representación de una forma de pensar. Es un ejemplo particularmente adecuado para nuestros fines. Por un motivo, es claramente un atributo humano. Algunos organismos superiores son capaces, de distinguir entre tres objetos y cuatro, digamos, pero ninguna especie, salvo el *Homo sapiens*, puede realizar la simple operación de dividir tres cuartos por siete octavos. En segundo lugar las matemáticas suponen un tipo de razonamiento que opera con reglas fijas e incluye (idealmente) términos o procedimientos no indefinidos. Puede ser analizado de una forma más concreta y más precisa que puede serlo el tipo de pensamiento que se aplica, dijimos, a la composición literaria o a las altas finanzas o a la dirección industrial o a la estrategia militar. Ya en 1936, el matemático inglés Alan Mathison Turing demostró que todos los problemas podían resolverse mecánicamente si podía expresarse en forma de un número finito de manipulaciones que pudiesen ser admitidas por la máquina. Así, pues, consideremos las máquinas en relación con las matemáticas.

Las herramientas que ayudan al razonamiento matemático son indudablemente tan viejas como las propias matemáticas. Las primeras herramientas para dicho objeto tienen que haber sido los propios dedos del ser humano. El ser humano utilizó sus dedos para representar los números y combinaciones de números. No es un accidente que la palabra «dígito» se utilice tanto para designar el dedo de la mano o el pie y para un número entero. A partir de ahí, otra fase ulterior condujo al uso de otros objetos distintos de los dedos -pequeñas piedras, quizá. Hay más piedrecillas que dedos, y los resultados intermedios pueden conservarse como referencia futura en el curso de la resolución del problema. De nuevo, no es accidental que la palabra «calcular» proceda de la palabra latina para designar una piedrecita.-

Piedrecitas o cuentas alineadas en ranuras o cordones fijados a un armazón forman el ábaco; la primera herramienta matemática realmente versátil. Con ese aparato es fácil representar las unidades, decenas, centenas, millares, etc. Al mover las bolas, o cuentas de un ábaco, puede realizarse fácilmente una suma, como  $576 + 289$ . Además, cualquier instrumento que puede sumar también puede multiplicar, pues la multiplicación sólo es una adición repetida. Y la multiplicación hace posible

la potenciación, pues ésta representa sólo una multiplicación repetida (por ejemplo,  $4^5$  es igual a  $4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4$ ). Por último, invirtiendo la dirección de los movimientos, por represarlo así, son posibles las operaciones de sustracción, división y extracción de una raíz.

El ábaco puede ser considerado el segundo «computador digital». (El primero, por supuesto, lo constituyeron los dedos.)

Durante miles de años, el ábaco fue la herramienta más avanzada de cálculo. Su uso decayó en Occidente tras la desaparición del Imperio romano y fue reintroducido por el Papa Silvestre II, aproximadamente 1000 años d. de J.C., probablemente a partir de la España árabe, donde su uso había persistido. Al retornar, fue acogido como una novedad oriental, olvidándose su origen occidental.

El ábaco no fue remplazado hasta que se introdujo una anotación numérica que imitaba la labor del ábaco. (Esta numeración, los para nosotros familiares «números arábigos», tuvo su origen en la India, aproximadamente unos 800 años d. de J.C., fue aceptada por los árabes, y finalmente introducida en Occidente, hacia el año 1200 d. de J.C., por el matemático italiano Leonardo de Pisa.)

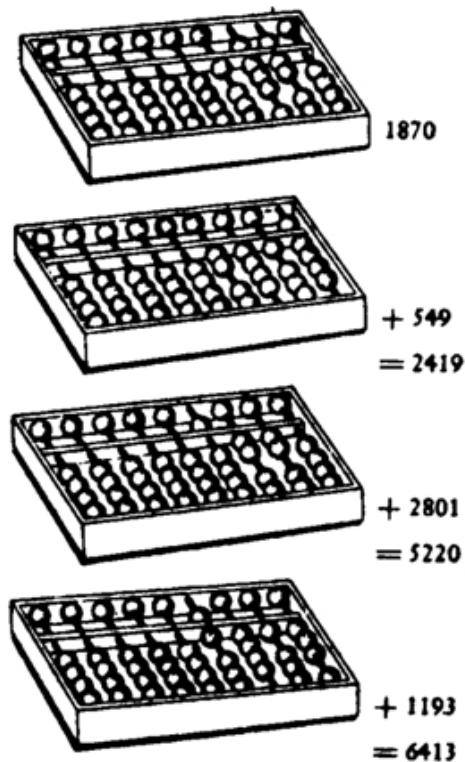
En la nueva numeración, las nueve piedrecitas diferentes en la fila de las unidades del ábaco fueron representadas por nueve símbolos diferentes, y estos mismos nueve símbolos se utilizaron para la fila de las decenas, para la de las centenas y para la de los millares. Las cuentas o piedrecitas, que diferían sólo en la posición, fueron remplazadas por símbolos que se diferenciaban únicamente en la posición, de tal modo que el número escrito 222, por ejemplo, el primer 2 representaba doscientos, el segundo veinte y el tercero representaba el propio dos: es decir  $200 + 20 + 2 = 222$ .

Esta «numeración posicional» fue posible al reconocer un hecho importantísimo, que los antiguos utilizadores del ábaco no habían apreciado. Aún cuando sólo existen nueve cuentas en cada fila del ábaco, en realidad son posibles diez disposiciones. Además de usar cualquier número de cuentas, desde el 1 al 9, en una fila, también es posible no usar ninguna cuenta, es decir, dejar vacía la disposición. Esto no fue imaginado por los grandes matemáticos griegos y sólo en el siglo IX, cuando un desconocido hindú pensó en representar la décima alternativa mediante un símbolo especial, que los árabes denominaron *sifr* (vacío) y que ha llegado hasta nosotros,

en consecuencia, como «cifras» o, en una forma más corrupta, «cero». La importancia del cero aparece reflejada en el hecho que la manipulación de números se denomina algunas veces «cifrar», y que para resolver cualquier problema difícil, se precisa «descifrarlo».

Se desarrolló otra poderosa herramienta con el uso de los exponentes para expresar las potencias de los números. Expresar 100 como  $10^2$ , 1.000 como  $10^3$ , 100.000 como  $10^5$ , y así sucesivamente, tiene grandes ventajas en varios aspectos; no sólo simplifica la escritura de números de muchas cifras, sino que además reduce la multiplicación y la división a la simple adición o sustracción de exponentes (por ejemplo,  $10^2 \times 10^3 = 10^5$ ) y la potenciación o extracción de una raíz a la simple realización de una multiplicación o división de exponentes (por ejemplo, la raíz cúbica de 1.000.000 es igual a  $10^{6/3} = 10^2$ ). Ahora bien, muy pocos números pueden escribirse en una forma exponencial sencilla. ¿Qué podría hacerse con números tales como 111? La respuesta a esta pregunta dio lugar a la tabla de logaritmos.

El primero en considerar este problema fue el matemático escocés del siglo XVII John Napier. Evidentemente, expresar un número como 111 con una potencia de 10 implica asignar un exponente fraccionario a 10 (el exponente se encuentra entre dos y tres). En términos más generales, el exponente siempre será fraccionado si el número en cuestión no es un múltiplo del número base. Napier desarrolló un método para calcular los exponentes fraccionarios de los números, y denominó a estos exponentes «logaritmos». Poco después, el matemático inglés Henry Briggs simplificó la técnica y elaboró logaritmos con diez como base.



*Sumando con un ábaco. Cada bola bajo la barra vale por 1; cada bola sobre la barra vale por 5. Una bola marca una cantidad al ser movida hacia la barra. En el cuadro que aparece en la parte superior, la columna de la derecha señala 0; la que está a la izquierda de ésta señala 7 o (5 + 2), la que está a su lado marca 8 o (5 + 3); el contiguo 1: la cifra resultante es, pues, 1870. Si a esta cantidad se añade 549, la columna de la derecha se convierte en 9 o (9 + 0); la siguiente suma (4 + 7) se convierte en 1, llevándose 1, lo que significa que en la columna contigua se sube una bola; la tercera suma es 9 + 5, o 4 llevándose 1; la cuarta suma es 1 + 1, o 2; la suma arroja 2.419, según muestra el ábaco. La simple maniobra de llevarse 1 moviendo hacia arriba una bola en la columna adjunta posibilita calcular con gran rapidez; un operador experto puede sumar con más rapidez que una máquina sumadora, según quedó demostrado en una prueba efectuada en 1946.*

Los logaritmos de Briggs son menos adecuados para el cálculo, pero gozan de más popularidad para los cálculos ordinarios. Todos los exponentes no enteros son irracionales, es decir, no pueden ser expresados en forma de una fracción ordinaria. Sólo pueden serlo como una expresión decimal infinitamente larga, que carece de un modelo repetitivo determinado. Sin embargo, tal decimal puede ser calculado con tantos números como sea necesario para la deseada precisión.

Por ejemplo, supongamos que deseamos multiplicar 111 por 254. El logaritmo de Briggs de 111, hasta cinco cifras decimales, es 2,04532, y para 254 es de 2,40483. Sumando estos logaritmos obtenemos  $10^{2,04532} \times 10^{2,40483} = 10^{4,45015}$ . Este número sería aproximadamente de 28.194, el producto real de 111 x 254. Si deseamos obtener una mayor exactitud, podemos utilizar los logaritmos con seis o más cifras decimales.

Las tablas de logaritmos simplificaron el cálculo enormemente. En 1622, un matemático inglés llamado William Oughtred hizo las cosas aún más fáciles al idear la «regla de cálculo». Se marcan dos reglas con una escala logarítmica, en la que las distancias entre los números se hacen cada vez más cortas a medida que los números aumentan; por ejemplo, la primera división tiene los números del 1 al 10; la segunda división, de la misma longitud, tiene los números del 10 al 100; la tercera, del 100 al 1.000, y así sucesivamente. Deslizando una regla a lo largo de la otra hasta una posición apropiada, puede leerse el resultado de una operación que implique la multiplicación o la división. La regla de cálculo convierte los cálculos en algo tan fácil como la adición y sustracción en el ábaco, aunque en ambos casos, para estar más seguros, hay que especializarse en el uso del instrumento.

El primer paso hacia la máquina de calcular realmente automática se dio en 1642 por el matemático francés Blaise Pascal. Inventó una máquina de sumar que eliminó la necesidad de mover las bolas separadamente en cada fila del ábaco. Su máquina consistía de una serie de ruedas conectadas por engranajes. Cuando la primera rueda -la de las unidades- giraba diez dientes hasta su marca cero, la segunda rueda giraba un diente hasta el número uno, de tal modo que las dos ruedas juntas mostraban el número diez. Cuando la rueda de las decenas alcanzaba el cero, la tercera de las ruedas giraba un diente del engranaje, mostrando el ciento, y así sucesivamente. (El principio es el mismo que el del cuentakilómetros de un automóvil.) Se supone que Pascal construyó más de 50 de esas máquinas; al menos cinco existen todavía.

El aparato de Pascal podía sumar y restar. En 1674, el matemático alemán Gottfried Wilhelm von Leibniz avanzó un paso más y dispuso las ruedas y engranajes de tal modo que la multiplicación y la división fueron tan automáticas y fáciles como la adición y la sustracción. En 1850, un inventor norteamericano llamado D. D.

Parmalee realizó un importante avance, que convertía la máquina de calcular en un dispositivo muy conveniente. En lugar de mover las ruedas a mano, introdujo una serie de llaves -pulsando una llave marcada con el dedo giraban las ruedas hasta el número correcto. Éste es el mecanismo de la ahora familiar y ya anticuada caja registradora.

Sólo restaba electrificar la máquina (de tal modo que los motores hicieran el trabajo dictado por la presión aplicada a las llaves), y el dispositivo de Pascal-Leibniz se convirtió en el moderno computador de mesa.

Sin embargo, el computador de mesa representa una vía muerta, no un camino hacia el futuro. El computador que tenemos en la mente cuando consideramos a las, máquinas pensantes es algo totalmente distinto. Su antecesor es una idea concebida ya en el siglo XIX por un matemático inglés llamado Charles Babbage.

Babbage, un verdadero genio, que se adelantó mucho a su época, ideó una máquina analítica que era capaz de realizar cualquier operación matemática, ser instruida mediante tarjetas perforadas, almacenar números en un dispositivo de memoria, comparar los resultados de operaciones, etc. Trabajó en sus ideas durante 37 años, gastando una fortuna, la suya y la del Gobierno, colocando elaboradas estructuras de ruedas, engranajes, palancas y alambres, en una época en que cada parte tenía que ser construida a mano. Al final fracasó y murió como un ser incomprendido y desalentado, debido a que intentaba conseguir lo que no podía conseguirse con simples dispositivos mecánicos.

La máquina tuvo que esperar un siglo, hasta el desarrollo de la electrónica. Y la electrónica, a su vez, sugirió el uso de un lenguaje matemático mucho más fácil de manipular para la máquina que el sistema decimal de números. Se denomina «sistema binario» y fue inventado por Leibniz. Para comprender el computador moderno, debemos familiarizarnos con este sistema.

La numeración binaria sólo usa dos números: el 0 y el 1. Expresa todos los números en términos de potencias de dos. Así, el número 1 es  $2^0$  el número 2 es  $2^1$ , el 3 es  $2^1 + 2^0$ , el 4 es  $2^2$ , y así sucesivamente. Como en el sistema decimal, la potencia viene indicada por la posición del símbolo. Por ejemplo, el número 4 es representado por 100, leyéndose así:  $(1 \times 2^2) + (0 \times 2^1) + (0 \times 2^0)$ , o  $4 + 0 + 0 = 4$  en el sistema decimal.

Como ejemplo, permítasenos considerar el número 6.413. En el sistema decimal puede escribirse  $(6 \times 10^3) + (4 \times 10^2) + (1 \times 10^1) + (3 \times 10^0)$ ; recordemos que cualquier número elevado a cero es igual a uno. Ahora bien, en el sistema binario sumamos números en forma de potencias de 2 en vez de potencias de 10 para componer un número. La potencia más alta de 2, que nos conduce más rápidamente al número 6.413 es 12:  $2^{12}$  es 4.096. Si ahora añadimos  $2^{11}$ , o 2.048, tenemos 6.144 que se diferencia en 269 del 6.413. Seguidamente,  $2^8$  añade 256 más, dejando como diferencia 13; luego, podemos añadir  $2^3$  u 8, dejando como diferencia 5; luego,  $2^2$  o 4, dejando como diferencia 1 y, por último,  $2^0$  que es 1. Así, podemos escribir el numero 6.413, como  $(1 \times 2^{12}) + (1 \times 2^{11}) + (1 \times 2^8) + (1 \times 2^3) + (1 \times 2^2) + (1 \times 1^0)$ . Pero como en el sistema decimal cada cifra de un número, leído desde la izquierda, debe representar la siguiente potencia más pequeña. Como en el sistema decimal, representamos las sumas de las potencias tercera, segunda, primera y cero de diez al expresar el número 6.413, de tal modo que en el sistema binario debemos representar las adiciones de las potencias de 2 desde 12 a 0. En forma de tabla, esto podría leerse así:

$$\begin{array}{rcl}
 1 \times 2^{12} & = & 4.096 \\
 1 \times 2^{11} & = & 2048 \\
 0 \times 2^{10} & = & 0 \\
 0 \times 2^9 & = & 0 \\
 1 \times 2^8 & = & 256 \\
 0 \times 2^7 & = & 0 \\
 0 \times 2^6 & = & 0 \\
 0 \times 2^5 & = & 0 \\
 0 \times 2^4 & = & 0 \\
 1 \times 2^3 & = & 8 \\
 1 \times 2^2 & = & 4 \\
 0 \times 2^1 & = & 0 \\
 1 \times 2^0 & = & 1 \\
 \\ 
 & & \hline
 & & 6.413
 \end{array}$$

Tomando los sucesivos multiplicadores en la columna de la izquierda. (del mismo modo que tomamos 6, 4, 1 y 3 como los multiplicadores sucesivos en el sistema decimal), escribimos el número en el sistema binario como 1100100001101.

Esto parece bastante innecesario. Se requieren trece cifras para escribir el número 6.413, mientras que el sistema decimal sólo precisa cuatro. Pero, para una computadora, este sistema es el más simple imaginable. Puesto que sólo existen dos cifras diferentes, cualquier operación puede realizarse en términos de sólo dos estados en un circuito eléctrico -conectado y desconectado. El circuito conectado (es decir circuito cerrado) puede representar el 1; el circuito desconectado (es decir el circuito abierto) puede representar el 0-.

Con los circuitos apropiados y el uso de diodos, la máquina puede efectuar todo tipo de operaciones matemáticas. Por ejemplo, con dos interruptores en paralelo puede realizar una adición:  $0 + 0 = 0$  (desconectado más desconectado = desconectado), y  $0 + 1 = 1$  (desconectado + conectado = conectado). De forma similar, dos interruptores en serie pueden efectuar una multiplicación:  $0 \times 0 = 0$ ;  $0 \times 1 = 0$ ;  $1 \times 1 = 1$ .

Hasta aquí, lo que ha aportado el sistema binario. Por lo que a la electrónica se refiere, su contribución a la computadora ha sido dotarla de una velocidad increíble. Puede realizar una operación aritmética casi instantáneamente: algunos computadores electrónicos pueden realizar miles de millones de operaciones por segundo. Cálculos que ocuparían a un hombre con un lápiz durante toda su vida, los realiza la computadora en unos pocos días. Citemos un caso típico, ocurrido antes de la era de las computadoras; un matemático inglés, llamado William Shanks, dedicó 15 años a calcular el valor de pi, que representa la relación de circunferencia de un círculo con su diámetro, y lo realizó hasta las 707 cifras decimales (calculando las últimas cien cifras erróneamente); recientemente, una computadora electrónica ha realizado el cálculo hasta las diez mil cifras decimales, precisando sólo unos pocos días para llevar a cabo la tarea.

En 1925, el ingeniero electricista norteamericano Vannevar Bush y su equipo construyeron una máquina capaz de resolver ecuaciones diferenciales. Ésta fue la primera computadora moderna, aunque todavía usaba interruptores mecánicos, y

representó una versión satisfactoria del tipo de aparato que Babbage había inventado un siglo antes.

Sin embargo, para que la utilidad del aparato sea máxima, los interruptores han de ser electrónicos. Esto aumenta extraordinariamente la velocidad de la computadora, pues un flujo de electrones puede ser iniciado, desviado o interrumpido en millonésimas de segundo -mucho más rápidamente de lo que los interruptores mecánicos, aunque delicados, podrían ser manipulados.

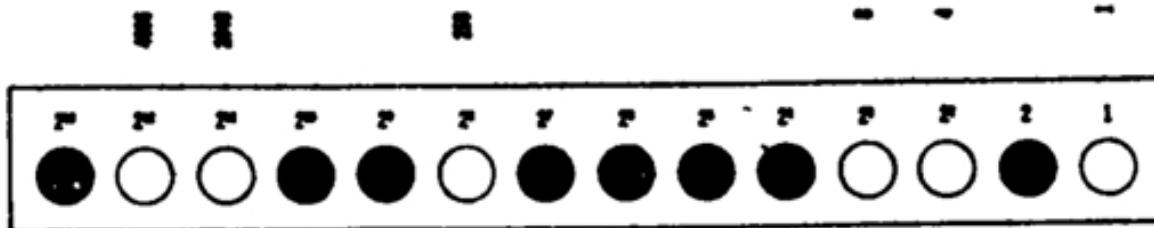
La primera computadora electrónica grande, que contenía 19.000 tubos de vacío, se construyó en la Universidad de Pennsylvania por John Presper Eckert y John William Mauchly durante la Segunda Guerra Mundial, fue llamada ENIAC, de «*Electronic Numerical Integrator and Computer*». ENIAC dejó de funcionar en 1955 y desmontada en 1957, por considerarla totalmente pasada de moda, con sólo doce años de vida; pero tras ella había quedado una descendencia sorprendentemente numerosa y sofisticada.

Mientras que ENIAC pesaba 30 t y necesitaba 400 m<sup>2</sup> de espacio, la computadora equivalente actual -utilizando componentes más pequeños, prácticos y seguros que los viejos tubos de vacío- no excede del tamaño de un refrigerador. Las computadoras modernas contienen medio trillón de componentes y 10 millones de elementos de memoria ultrarrápidos.

Fue tan rápido el progreso que, en 1948, comenzaron a construirse en cantidad pequeñas computadoras electrónicas; en el curso de cinco años, se estaban utilizando dos mil; en 1961, el número era de diez mil.

Las computadoras que operan directamente con números se llaman «computadoras digitales». Pueden actuar con cualquier exactitud deseada, pero sólo pueden responder el problema específico preguntado. Un ábaco, como he dicho antes, es un ejemplo primitivo. Una computadora debe operar no con números, sino con intensidades de corriente elaboradas para cambiar de forma análoga a las variables consideradas. Ésta es una «computadora electrónica digital»; un ejemplo famoso es el de «Universal Automatic Computer» (UNIVAC), construida por vez primera en 1951 y utilizada en Televisión, en 1952, para analizar los resultados de la elección presidencial a medida que iban conociéndose. El UNIVAC fue la primera computadora electrónica digital empleada con fines comerciales. La regla de cálculo

es una computadora analógica muy simple. Las computadoras analógicas tienen una exactitud limitada, pero pueden proporcionar respuestas, de una vez, a toda una serie de cuestiones relacionadas.



*El número 6.413 representado por luces en un panel de computador. Los círculos claros son lámparas encendidas.*

¿Es la ENIAC, o cualquiera de sus sofisticados descendientes, una verdadera «máquina pensante»? Es difícil, en esencia, no es más que un ábaco muy rápido. Simplemente, como un esclavo, sigue las instrucciones que se le han dado.

La herramienta básica para instruir a la maravilla a las computadoras es la tarjeta perforada, aún hoy día, similar a la que Babbage ideó para su uso. Un orificio perforado en una posición determinada sobre una tarjeta de este tipo puede significar un número; una combinación de dos o más de estos orificios, en posiciones específicas, puede significar una letra del alfabeto, una operación matemática, una cualidad -cualquier cosa que uno quiera representar-. Así pues, la tarjeta puede registrar un nombre de persona, el color de sus ojos y cabello, su posición social e ingresos, su estado civil, sus especiales capacidades o títulos profesionales. Cuando la tarjeta pasa entre polos eléctricos, los contactos efectuados a través de los orificios establecen un esquema eléctrico específico. Mediante el rastreo de las tarjetas de esta forma y selección de sólo aquellas que dan lugar a un tipo particular de esquema, la máquina puede seleccionar, a partir de una gran población, sólo aquellas personas que, supongamos, tienen una altura superior a 1,80 m, ojos azules y hablan ruso.

De forma semejante, una tarjeta perforada con un «programa» para una computadora establece circuitos eléctricos que determinan que la máquina introduzca ciertos números en determinadas operaciones. En todos los casos,

excepto en los programas más sencillos, la computadora tiene que almacenar tales números o datos, hasta que puede utilizarlos en el curso de una serie de operaciones. Esto significa que debe poseer un dispositivo de memoria. La memoria, en una computadora moderna, por lo general es de tipo magnético: los números se almacenan en forma de manchas magnetizadas sobre un tambor o alguna otra disposición. Una mancha particular puede representar el número 1 cuando está magnetizada y el 0 cuando no lo está. Cada tipo de información es un «bit» (de *binary digit* = dígito binario). Las manchas son magnetizadas por una corriente eléctrica al registrar la información y también son leídas por una corriente eléctrica. Sin embargo, ahora se pone claramente de manifiesto que la utilidad de la tarjeta perforada ha tenido su momento. Se están utilizando ya sistemas en que las instrucciones pueden ser proporcionadas a las computadoras (tal como la UNIVAC III, construida en 1960) mediante palabras inglesas mecanografiadas. La computadora es ideada para reaccionar de modo apropiado a ciertas palabras y combinaciones de palabras, que pueden ser usadas muy flexiblemente, pero según una serie de reglas definidas.

Tales «lenguajes de computadoras» han proliferado rápidamente. Uno de los mejor conocidos es el FORTRAN (abreviaturas para traducción de fórmulas = *formula translation* ).

Por supuesto, la computadora es el instrumento que permite la automatización completa. Los servomecanismos sólo pueden realizar los aspectos de esclavo en una tarea.

En cualquier proceso complejo, tal como el de apuntar y disparar con una arma o el funcionamiento de una factoría automática, las computadoras son necesarias para calcular, interpretar, coordinar y supervisar -en otras palabras, actuar como mentes mecánicas para dirigir los músculos mecánicos-. Y la computadora no se halla limitada en modo alguno en este tipo de función. Realiza sus deseos eléctricos; calcula las reservas de plazas en las líneas aéreas; mantiene al día los registros de cheques y cuentas bancarias; confecciona las nóminas de una compañía, mantiene un registro diario de los inventarios, en resumen, realiza una gran parte de las tareas de las grandes compañías en la actualidad.

La velocidad de una computadora, y su inmunidad al cansancio, le permiten realizar tareas demasiado pesadas (aunque no necesariamente demasiado difíciles en principio) para el cerebro humano. La computadora puede analizar procesos puramente al azar, similares a las colisiones mutuas de miles de partículas al realizar «juegos» matemáticos que simulan tales procesos y seguir cientos de casos en períodos muy breves, con objeto de calcular las posibilidades de diversos fenómenos posibles. A esto se le denomina el «método de Montecarlo», ya que es el mismo principio usado por los jugadores humanos, que intentan usar algún sistema en el juego de la ruleta.

Los matemáticos, físicos e ingenieros que investigan los posibles usos de las computadoras están seguros de que sólo se está en los comienzos. Han programado computadoras para jugar al ajedrez, como un ejercicio para almacenar y aplicar información. (Por supuesto, la máquina sólo juega un partido mediocre, pero es muy probable que virtualmente sea posible programar una computadora para aprender de acuerdo con los movimientos de su contrario.) En experiencias de laboratorio, las computadoras han sido programadas para asimilar artículos de revistas científicas, formar índices de tales artículos y traducirlos de un idioma a otro. Por ejemplo, con un vocabulario de palabras rusas y sus equivalentes inglesas almacenadas en su memoria, una computadora puede rastrear la letra rusa impresa, reconocer palabras claves y dar una traducción aproximada. Se está realizando una profunda investigación sobre este problema de la traducción mediante máquinas, debido que es tal el alud de bibliografía técnica que inunda al mundo, que los traductores humanos probablemente no podrán hacer frente a él.

Una computadora no sólo puede «leer», sino que también puede escuchar. Investigadores de los «Bell Telephone Laboratories» han construido una máquina llamada «Audrey», que puede distinguir las palabras del lenguaje ordinario. Seguramente, esto crea la posibilidad de que las computadoras puedan ser capaces algún día de «comprender» las instrucciones habladas. Es posible que pueda programarse con máquinas el lenguaje e incluso las canciones.

En 1965 se crearon sistemas para permitir a personas o máquinas comunicarse con la computadora desde largas distancias, por medio de una máquina de escribir, por ejemplo. Este sistema recibe el nombre de *time-sharing* (tiempo repartido) porque

muchas personas pueden utilizar la computadora al mismo tiempo, aunque la respuesta es tan rápida que cada usuario no advierte la presencia de los demás.

Hasta el momento, estos progresos se sugieren únicamente como posibilidades futuras. Las computadoras son rápidas y mucho más eficaces que el hombre para la realización de operaciones matemáticas ordinarias, pero no han alcanzado en modo alguno la flexibilidad de la mente humana. Mientras que incluso un niño que aprende a leer no tiene dificultad en reconocer que una b mayúscula, y una b minúscula, y una b en cursiva, en diversos cuerpos y tipos todas ellas proceden de una misma letra, por el momento esto no puede discernirlo una máquina como las que existen actualmente. Para obtener tal flexibilidad en una máquina, ésta debería tener unas dimensiones y complejidades prohibitivas.

El cerebro humano pesa algo más de 1.200 g y actúa con una cantidad de energía prácticamente despreciable. Por el contrario, ENIAC, que probablemente fue un millón de veces menos compleja que el cerebro, pesaba 30 toneladas, y requería 150 kilovatios de energía. Por supuesto, aparatos tales como el transistor y el «criotrón», una clase de interruptor que emplea alambres superconductores a bajas temperaturas, han miniaturizado las computadoras y reducido las necesidades de energía. El uso de componentes de ferrita para almacenar «bits» de información ha aumentado la capacidad de la memoria de la computadora, porque los componentes pueden fabricarse de menores dimensiones. En la actualidad existen componentes de ferrita tan pequeños como un punto en esta página.

Minúsculos emparedados en forma de túnel y operando en condiciones superconductoras, llamados «neuristores», hacen suponer que sea posible ensamblarlos con la misma solidez y complejidad que las células en el cerebro humano. Así pues, quizá se profile ya a lo lejos la posibilidad de reproducir las asombrosas cualidades de ese órgano que, con sus 1.200 g de peso, contiene unos diez mil millones de neuronas junto con noventa millones de células auxiliares.

A medida que, a una tremenda velocidad, las computadoras se hacen cada vez más intrincadas, sutiles y complejas, surge naturalmente la cuestión: aunque en la actualidad las computadoras no puedan realmente pensar. ¿Llegará el día en que puedan hacerlo? Realmente, ya pueden calcular, recordar, asociar, comparar y reconocer.

¿Llegarán algún día a razonar? A este respecto, el matemático americano Marvin L. Minsky contesta que sí.

En 1938, un joven matemático e ingeniero norteamericano. Claude Elwood Shannon, expuso en su tesis doctoral que la lógica deductiva, en la forma conocida como álgebra de Boole, podía ser tratada mediante el sistema binario. El álgebra de Boole se refiere a un sistema de «lógica simbólica», sugerida en 1854 por el matemático inglés George Boole, en un libro titulado *An Investigation of the Laws of Thought* (Una investigación de las leyes del pensamiento). Boole observó que los tipos de afirmación empleados en la lógica deductiva podían ser representados mediante símbolos matemáticos, y se dedicó a demostrar cómo podían ser manipulados tres símbolos según reglas fijas para dar lugar a conclusiones apropiadas.

Para dar un ejemplo muy sencillo, consideremos la siguiente hipótesis: «ambos, A y B, son verdaderos». Hemos de determinar el carácter de veracidad o falsedad de esta teoría, simplemente mediante un ejercicio estrictamente lógico, suponiendo que sabemos que A y B, respectivamente, son ciertos o falsos. Para tratar el problema en términos binarios, como sugirió Shannon, permítasenos representar «falso» por 0 y «verdadero» por 1. Si los dos, A y B son falsos, entonces la hipótesis «ambos, A y B son ciertos» es falsa, en otras palabras, 0 y 0 dan 0. Si A es verdadera, pero B es falsa (o viceversa), entonces la hipótesis vuelve a ser falsa. Es decir 1 y 0 (o 0 y 1) dan 0.

Si A es verdadera y B es verdadera, la hipótesis «ambos, A y B, son verdaderos» es verdadera. Simbólicamente 1 y 1 dan 1.

Ahora bien, estas tres alternativas corresponden a las tres posibilidades de multiplicación en el sistema binario, a saber:  $0 \times 0 = 0$ ,  $1 \times 0 = 0$ , y  $1 \times 1 = 1$ . Así, el problema lógico que aparece en la hipótesis «ambos, A y B, son ciertos» puede ser matemáticamente desarrollada por multiplicación. Una computadora (programada apropiadamente) puede, por tanto, resolver este problema lógico tan fácilmente y del mismo modo como realiza los cálculos ordinarios.

En el caso de que la afirmación «A o B son ciertos», el problema se soluciona por adición, en vez de por multiplicación. Si ni A ni B son ciertos, entonces esta hipótesis es falsa. En otras palabras  $0 + 0 = 0$ . Si A es cierta y B es falsa, la

afirmación es verdadera; en estos casos  $1 + 0 = 1$  y  $0 + 1 = 1$ . Si ambos, A y B, son ciertos, la afirmación es realmente cierta, y  $1 + 1 = 10$ . (El número significativo en el 10 es el 1; el hecho de que sea desplazado una posición no tiene importancia; en el sistema binario, 10 representa  $(1 \times 2^1) + (0 \times 1^0)$ , equivalente a 2 en el sistema decimal.)

El Álgebra de Boole; ha adquirido importancia en ingeniería de telecomunicaciones y constituye parte de lo que ahora conocemos como la «teoría de la información».

¿Qué es lo que queda del pensamiento que no puede ser adquirido por la máquina? Nos enfrentamos finalmente con la creatividad y la capacidad de la mente humana para tratar con lo desconocido: su intuición, capacidad de juicio y para sorprenderse ante una situación y sus posibles consecuencias -llámese como se quiera-. Esto también ha sido expresado en forma matemática, hasta cierto punto, por el matemático John von Neumann, quien, con el economista Oskar Morgenstern, escribieron *The Theory of Games and Economic Behavior* (La teoría de los juegos y el comportamiento económico), a principios de la década de 1940.

Von Neumann tomó ciertos juegos sencillos, tales como tirar la moneda y el póquer, como modelos para el análisis de la situación típica en la que uno intenta hallar una estrategia para ganar a un oponente que está seleccionando asimismo la mejor forma posible de acción para sus propios fines. Las campañas militares, la competencia en los negocios, muchas cuestiones de gran importancia en la actualidad, implican decisiones de este tipo. Incluso la investigación científica puede ser considerada como un juego del hombre contra la Naturaleza, y la teoría de los juegos puede ser de utilidad para seleccionar la estrategia óptima de la investigación, suponiendo que la Naturaleza está barajando las cartas de un modo que enredará más al ser humano (lo que en realidad a menudo parece que hace).

Y cuando las máquinas amenazan con hacerse perceptiblemente humanas, los seres humanos se hacen más mecánicos. Los órganos mecánicos pueden remplazar a los corazones y los riñones orgánicos. Los dispositivos electrónicos pueden remediar los fallos orgánicos, de forma que es posible implantar en el cuerpo marcapasos artificiales para hacer funcionar los corazones que se pararían de otra forma. Se han concebido manos artificiales cuyos movimientos se pueden controlar mediante impulsos nerviosos amplificados en los brazos donde se han injertado. La palabra

«ciborg» (cibernetic organism = organismo cibernético) se acuñó en 1960 para hacer referencia a los hombres amplificados mecánicamente.

## BIBLIOGRAFÍA II

Una introducción a la Ciencia resultaría incompleta sin una guía para ampliar las lecturas acerca del tema. Seguidamente presento una breve selección de libros. Esta relación constituye una miscelánea y no pretende ser una colección completa de los mejores libros modernos sobre temas científicos. Sin embargo, he leído la mayor parte de ellos y puedo recomendarlos todos, incluso los míos.

<b>CAPÍTULO 10. - LA MOLECULA</b>	
FIESER, L. F., y M.	<i>Organic Chemistry</i> . D. C. Heath & Company, Boston, 1956.
GIBBS, F. W.	<i>Organic Chemistry Today</i> . Penguin Books, Baltimore, 1961.
HUTTON; KENNETH	<i>Chemistry</i> . Penguin Books, Nueva York, 1957.
PAULING, LINUS	<i>The Nature of the Chemical Bond (3.ra Ed.)</i> . Cornell University Press, Ithaca, Nueva York. 1960.
PALING, LINUS, y HAYWARD, R.	<i>The Architecture of Molecules</i> . W. H. Freeman & Co. San Francisco, 1964.
<b>CAPÍTULO 11. -LAS PROTEÍNAS</b>	
ASIMOV, ISAAC	<i>Photosynthesis</i> . Basic Books. Nueva York, 1969.
BALDWIN, ERNEST	<i>Dyrazmis Aspects of Biochemistry</i> . (5ta. Ed.) Cambridge University Press, Nueva York, 1967.
BALDWIN, ERNEST	<i>The Nature of Biochemistry</i> . Cambridge University Press. Nueva York, 1962.
HARPER, HAROLD A.	<i>Review of Physiological Chemistry (8.va. Ed.)</i> . Lange Medical Publications, Los Altos, Calif., 1961.
KAMEN, ARTIN D.	<i>Isotopic Tracers in Biology</i> . Academic Press, Nueva York, 1957.
KARLSON, P.	<i>Introduction to Modern Biochemistry</i> . Academic Press, Nueva York, 1963.
LEHNINGER, A. L.	<i>Bioenergetics</i> . Benjamin Company, Nueva York, 1965.
SCIENTIFIC AMERICAN (editores)	<i>The Physics and Chemistry of Life</i> . Simon & Schuster, Nueva York, 1955.
<b>CAPÍTULO 12. - LA CÉLULA</b>	
ANFINSEN, CHRISTIAN B.	<i>The Molecular Basis of Evolution</i> . John Wiley & Sons, Nueva York, 1959.
ASIMOV, ISAAC	<i>The Genetic Code</i> . Orion Press, Nueva York, 1962.
ASIMOV, ISAAC, <i>A Short History of Biology</i> . Doubleday & Company, Nueva York, 1964.	
BOYD, WILLIAM C., <i>Genetics and the Races of Man</i> . Little, Brown & Company, Boston, 1950.	
BUTLER, J. A. V., <i>Inside the Living Cell</i> . Basic Books, Nueva York, 1959.	

DOLE, STEPHEN H.	<i>Habitable Planets for Man.</i> Blaisdelt Publishing Company, Nueva York, 1964.
HARTMAN, P. E., y SUSKIND, S. R.	<i>Gene Action.</i> Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1965.
HUGHES, ARTHUR	<i>A History of Cytology.</i> Abelard-Schuman, Nueva York, 1959.
NELL, J. V., y SCHULL, W. J.	<i>Human Heredity.</i> University of Chicago Press, Chicago, 1954.
OPARIN, A. I.	<i>The Origin of Life on the Earth.</i> Academic Press. Nueva York, 1957
SINGER, CHARLES	<i>A Short History of Anatomy and Physiology from the Greeks to Harvey.</i> Dover Publications, Nueva York, 1957.
SULLIVAN, WALTER	<i>We Are Not Alone.</i> McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1964.
TAYLOR, GORDON R.	<i>The Science of Life.</i> McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1963.
WALKER, KENNETH	<i>Human Physiology.</i> Penguin Books, Nueva York,
<b>CAPÍTULO 13. - LOS MICROORGANISMOS</b>	
BURNET, F. M.	<i>Viruses and Man</i> (2da. Ed.). Penguin Books, Baltimore, 1955.
DE KRUIF, PAUL	<i>Microbe Hunters.</i> Harcourt, Brace & Company, Nueva York, 1932.
DUBOS, RENÉ	<i>Louis Pasteur.</i> Little, Brown & Company, Boston, 1950.
LUDOVICI, L. J.	<i>The World of the Microscope.</i> G. P. Putnam's Sons, Nueva York, 1959.
McGRADY, PAT	<i>The Savage Cell.</i> Basic Books, Nueva York, 1964.
RIEDMAN, SARAH R.	<i>Shots without Guns.</i> Rand, McNally & Company, Chicago, 1960.
SMITH, KENNETH M.	<i>Beyond the Microscope.</i> Penguin Books. Baltimore, 1957.
WILLIAMS, GREER	<i>Virus Hunters.</i> Alfred A. Knopf, Nueva York, 1959.
ZINSSER, HANS	<i>Rats, Lice and History.</i> Little, Brown & Company, Boston, 1935.
<b>CAPÍTULO 14. - EL CUERPO</b>	
ASIMOV, ISAAC	<i>The Human Body.</i> Houghton Mifflin Company, Boston, 1963.
CARLSON, ANTON J.	y JOHNSON, VICTOR, <i>The Machinery of the Body.</i> University of Chicago Press, Chicago, 1953.
CHANAY, MARGARET S.	<i>Nutrition.</i> Houghton Mifflin Company, Boston, 1954.
MCCOLLUM, ELMER VERNER	<i>A History of Nutrition.</i> Houghton Mifflin Company, Boston, 1957.
WILLIAMS, ROGER J.	<i>Nutrition in a Nutshell.</i> Doubleday & Company, Nueva York, 1962.
<b>CAPÍTULO 15. - LAS ESPECIES</b>	
ASIMOV, ISAAC	<i>Wellsprings of Life.</i> Abelard-Schuman, Nueva York, 1960.
BOULE, M., y VALLOIS, H. V.	<i>Fossil Men.</i> Dryden Press, Nueva York, 1957.
CARRINGTON, RICHARD	<i>A Biography of the Sea.</i> Basic Books, Nueva
DARWIN, FRANCIS (editor)	<i>The Life and Letters of Charles Darwin</i> (2 vols.). Basic Books, Nueva York, 1959.
DE BELL, G.	<i>The Environmental Handbook.</i> Ballantine Books, Nueva York, 1970.
HANRAHAN, JAMES S., y BUSHNELL	DAVID, <i>Space Biology.</i> Basic Books, Nueva York, 1960.
HARRISON, R. J.	<i>Man, the Peculiar Animal.</i> Penguin Books, Nueva York, 1958.
HOWELLS, WILLIAM	<i>Mankind in the Making.</i> Doubleday & Company, Nueva York, 1959.
HUXLEY, T. H.	<i>Man's Place in Nature.</i> University of Michigan Press, Ann Arbor, 1959.
MEDAWAR, P. B.	<i>The Future of Man.</i> Basic Books, Nueva York, 1960.
MILNE, L. J., y M. J.	<i>The Biotic World and Man.</i> Prentice-Hall,
MONTAGU, ASHLEY	<i>The Science of Man.</i> Odyssey Press, Nueva York, 1964.
MOORE, RUTH	<i>Man, Time, and Fossils</i> (2da. Ed.). Alfred A. Knopf, Nueva York, 1963.

ROMER, A. S.	<i>Man and the Vertebrates</i> (2 vols.), Penguin Books, Nueva York, 1954.
ROSTAND, JEAN	<i>Can Man Be Modified?</i> Basic Books, Nueva York, 1959.
SAX, KARL	<i>Standing Room Only.</i> Beacon Press, Boston, 1955.
SIMPSON, GEORGE G., PITTENDRIGH, C. S., y TIFFANY, L. H.	<i>Life: An Introduction to College Biology</i> (2da. Ed.). Harcourt, Brace & Company, Nueva York, 1965.
TINBERGEN, NIKO	<i>Curious Naturalists.</i> Basic Books, Nueva York, 1960.
UBBELOHDE, A. R.	<i>Man and Energy.</i> Penguin Books, Baltimore, 1963.
<b>CAPÍTULO 16. - LA MENTE</b>	
ANSBACHER, H., y R. (directores)	<i>The Individual Psychology of Alfred Adler.</i> Basic Books, Nueva York, 1956.
ARIETI, SILVANO (director)	<i>American Handbook of Psychiatry</i> (2 vols.). Basic Books, Nueva York, 1959.
ASIMOV, ISAAC	<i>The Human Brain.</i> Houghton Mifflin Company, Boston, 1964.
BERKELEY, EDMUND C.	<i>Symbolic Logic and Intelligent Machines.</i> Reinhold Publishing Corporation, Nueva York, 1959.
FREUD, SIGMUND	<i>Collected Papers</i> (5 vols.). Basic Books, Nueva York,
JONES, ERNEST	<i>The Life and Work of Sigmund Freud</i> (3 vols.). Basic Books, Nueva York, 1957.
LASSEK, A. M.	<i>The Human Brain.</i> Charles C. Thomas, Springfield, Ill, 1957.
MENNINGER, KARL	<i>Theory of Psychoanalytic Technique.</i> Basic Books, Nueva York, 1958.
MURPHY, GARDNER	<i>Human Potentialities.</i> Basic Books, Nueva York,
RAWCLIFFE, D. H.	<i>Illusions and Delusions of the Supernatural and Occult.</i> Dover Publications, Nueva York, 1959.
SCIENTIFIC AMERICAN (editores)	<i>Automatic Control.</i> Simon & Schuster, Nueva York, 1955.
SCOTT, JOHN PAUL	<i>Animal Behavior.</i> University of Chicago Press, Chicago, 1957.
THOMPSON, CLARA y MULLAHY, PATRICK	<i>Psychoanalysis: Evolution and Development.</i> Grove Press. Nueva York, 1950.