



**JOHNJOE McFADDEN**

**JIM AL-KHALILI**

# **BIOLOGÍA ALLÍMITE**

**CÓMO FUNCIONA LA VIDA  
A MUY PEQUEÑA ESCALA**

**RBA**

Título original: *Life on the Edge*

© Johnjoe McFadden y Jim Al-Khalili, 2014.

© de la traducción: Joandomènec Ros, 2015.

© de esta edición digital: RBA Libros, S.A., 2019.

Diagonal, 189 - 08018 Barcelona.

[www.rbalibros.com](http://www.rbalibros.com)

REF.: ODBO509

ISBN: 9788491874294

Composición digital: Newcomlab, S.L.L.

Queda rigurosamente prohibida sin autorización por escrito del editor cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra, que será sometida a las sanciones establecidas por la ley. Todos los derechos reservados.

## Índice

[Agradecimientos](#)

[1. Introducción](#)

[2. ¿Qué es la vida?](#)

[3. Los motores de la vida](#)

[4. La pulsación cuántica](#)

[5. Buscando la casa de Nemo](#)

[6. La mariposa, la mosca del vinagre y el petirrojo cuántico](#)

[7. Genes cuánticos](#)

[8. La mente](#)

[9. Cómo empezó la vida](#)

[10. Biología cuántica: la vida en el límite de una tempestad](#)

[Epílogo: vida cuántica](#)

[Notas](#)

PARA PENNY Y OLLIE, JULIE, DAVID Y KATE

# AGRADECIMIENTOS

Ha costado tres años escribir este libro, aunque los autores han colaborado en la investigación de este campo nuevo y excitante, que une la física cuántica, la bioquímica y la biología, desde hace casi dos décadas. Pero cuando se trata de esta área transdisciplinar de la ciencia que es la biología cuántica es imposible llegar a ser lo bastante experto como para explicar, con la suficiente profundidad y con la suficiente confianza, toda la ciencia que se necesita para pintar todo el cuadro, en particular cuando se trata de escribir el primer libro sobre el tema para un público profano.

Es totalmente cierto que ninguno de los dos autores podríamos haber escrito esta obra por separado, puesto que cada uno de nosotros aporta al conjunto su propia experiencia desde los mundos de la física y de la biología, respectivamente. Es todavía más cierto que no habríamos podido producir un libro del que ambos estamos inmensamente orgullosos sin la ayuda y los consejos de muchas personas, la mayoría de las cuales son líderes mundiales en sus áreas de investigación.

Estamos en deuda con Paul Davies por las muchas conversaciones fructíferas que ha tenido con nosotros a lo largo de los últimos quince años sobre mecánica cuántica y su importancia potencial en el campo de la biología. También lo estamos con muchos físicos, químicos y biólogos que ahora están haciendo grandes progresos en este nuevo campo y de cuya pericia y profundo conocimiento de sus áreas de especialidad carecíamos, y seguimos careciendo. En particular, estamos en deuda con Jennifer Brookes, Gregory Engel, Adam Godbeer, Seth Lloyd, Alexandra Olaya-Castro, Martin Plenio, Sandu Popescu, Thorsten Ritz, Gregory Scholes, Nigel Scrutton, Paul Stevenson, Luca Turin y Vlatko Vedral. También queremos darle las gracias a Mirela Dumic, coordinadora del Instituto de Estudios Avanzados (IAS) de la Universidad de Surrey, que casi en solitario organizó el taller internacional «Biología cuántica: Situación actual y oportunidades» en Surrey en 2012, que tuvo gran éxito y que contó con la financiación conjunta del IAS, el Consejo de Investigación en Biotecnología y Ciencias Biológicas (BBSRC) y el proyecto MILES (Modelos y Matemática en las Ciencias de la Vida y Sociales). Dicho taller reunió a muchas de las principales figuras (se trata todavía de un campo emergente y el número de personas que trabajan en él es relativamente reducido) que en la actualidad se

hallan implicadas en la investigación sobre biología cuántica en todo el mundo, y que contribuyeron a que en verdad nos sintiéramos parte de esta apasionante comunidad de investigación.

Una vez tuvimos el borrador del libro, pedimos a varios de los colegas citados con anterioridad que lo leyeran y nos dieran su opinión. Por ello estamos especialmente agradecidos a Martin Plenio, Jennifer Brookes, Alexandra OlayaCastro, Gregory Scholes, Nigel Scrutton y Luca Turin. También queremos agradecer a Philip Ball, Pete Downes y Greg Knowles el haber leído parte del borrador final, o el texto en su integridad, y por haber proporcionado muchos comentarios perspicaces y útiles, que han mejorado muchísimo el libro. Le debemos un «¡gracias!» muy grande a nuestro agente, Patrick Walsh, sin el cual el libro no habría despegado, y a Sally Gaminara, de Random House, por su fe en nosotros y por entusiasmarse tanto con el proyecto. Y debemos un «¡gracias!» todavía mayor a Patrick y Carrie Plitt, de Conville & Walsh, por sus consejos y sugerencias sobre la estructura y formato del libro, y por ayudarnos a modelarlo en una versión final que se halla a años luz de su chapucero estado inicial. También estamos agradecidos a Gillian Somerscales por su brillantez editorial.

Y por último, pero no por ello menos importante, queremos dar las gracias a nuestras familias por su apoyo sin límites, en particular durante aquellos períodos en los que nos enfrentábamos a finales de plazo, tanto los que nos imponíamos nosotros como los fijados por los editores, lo que significaba dejar todos los demás compromisos a un lado y encerrarnos con nuestros ordenadores portátiles. Hemos perdido la cuenta de las tardes, fines de semana y vacaciones familiares en los que la biología cuántica tenía que ser lo primero. Esperamos que el libro haya valido la pena.

Por nosotros dos y por el nuevo campo de la biología cuántica, confiamos en que el viaje no haya hecho más que empezar.

JOHNJOE M CFADDEN Y JIM AL-KHALILI

*Agosto de 2014*

## INTRODUCCIÓN

El frío invernal ha llegado pronto a Europa este año y hay un helor penetrante en el aire vespertino. Enterrado en lo más recóndito de la mente de una joven hembra de petirrojo, un sentido de propósito y determinación, que hasta ahora había sido vago, se hace más intenso.

El pájaro ha pasado las últimas semanas devorando muchos más insectos, arañas, gusanos y bayas de lo que solía ser su ingesta normal, y ahora su peso es casi el doble del que tenía cuando su pollada salió del nido, en agosto. Este peso adicional es, en su mayor parte, reservas de grasa, que necesitará como combustible para el arduo viaje en el que está a punto de embarcarse.

Esta será su primera migración lejos del bosque de abetos del centro de Suecia en el que ha vivido a lo largo de su corta vida y donde crio a sus polluelos hace solo unos meses. Por suerte para ella, el invierno anterior no fue muy severo, porque hace un año no había llegado todavía a la edad adulta y, por lo tanto, no era lo bastante fuerte para emprender un viaje tan largo. Pero ahora, liberada de sus responsabilidades maternas hasta la próxima primavera, solo tiene que pensar en sí misma, y está lista para huir del invierno que se acerca, dirigiéndose hacia el sur para buscar un clima más cálido.

Han pasado dos horas desde la puesta de sol. En lugar de instalarse para pasar la noche, salta en la penumbra creciente hasta la punta de una rama cercana a la base del enorme árbol que ha considerado su hogar desde la primavera. Se sacude rápidamente, como si fuera un corredor de maratón que relaja los músculos antes de una carrera. Su pecho anaranjado brilla a la luz de la luna. El esmerado esfuerzo y cuidado que puso en la construcción de su nido (que está apenas a unos pocos metros de distancia, parcialmente escondido sobre la corteza cubierta de musgo del tronco del árbol) es ahora un tenue recuerdo.

No es el único pájaro que se prepara para la marcha, pues otros petirrojos, tanto machos como hembras, han decidido también que esta es la noche adecuada para iniciar su larga migración hacia el sur. En los árboles que la rodean, la hembra de petirrojo oye cantos fuertes y penetrantes que ahogan los sonidos usuales de otros animales forestales nocturnos. Es como si las aves se sintieran obligadas a anunciar su partida al enviar a los demás habitantes del

bosque el mensaje de que deberían pensárselo dos veces antes de plantearse invadir el territorio de los pájaros y los nidos vacíos mientras estén fuera. Porque estos petirrojos, con toda seguridad, planean volver en la primavera.

Con una rápida inclinación de la cabeza a uno y otro lado, para asegurarse de que no hay moros en la costa, la hembra de petirrojo echa a volar hacia el cielo vespertino. Las noches se han ido haciendo más largas a medida que avanzaba el invierno, y tiene por delante unas diez horas bien buenas de vuelo antes de que pueda volver a descansar.

Emprende un rumbo de  $195^{\circ}$  ( $15^{\circ}$  al oeste en dirección sur). A lo largo de los días siguientes, seguirá volando, más o menos, en la misma dirección, y en un día bueno recorrerá trescientos kilómetros. No tiene ni idea de lo que le espera a lo largo del viaje, ni sensación alguna del tiempo que le tomará. El terreno que rodea su bosque de abetos le es familiar, pero pasados unos cuantos kilómetros está volando sobre un paisaje iluminado por la luna y extraño, de lagos, valles y pueblos.

En algún punto cercano al mar Mediterráneo, la hembra de petirrojo alcanzará su destino; aunque no se dirige a ninguna ubicación específica, cuando llegue a un punto favorable se detendrá y memorizará los hitos locales para poder retornar allí en los años siguientes. Si tiene la fuerza suficiente, puede incluso llegar a volar directamente hasta la costa septentrional de África. Pero esta es su primera migración, y ahora su única prioridad es escapar del frío penetrante del invierno nórdico que se avecina.

La hembra no parece reparar en los petirrojos que la rodean y que vuelan todos, aproximadamente, en la misma dirección; algunos de ellos ya deben de haber hecho este viaje muchas veces. Su visión nocturna es magnífica, pero no busca ningún hito en el terreno (como haríamos nosotros si emprendiéramos un viaje de este cariz), ni resigue el patrón de las estrellas en el claro cielo nocturno al tiempo que consulta su mapa celeste interno, como hacen otras muchas aves que migran por la noche. En lugar de ello, posee una habilidad muy notable y varios millones de años de evolución a los que agradecerles su capacidad de hacer lo que se convertirá en una migración otoñal anual, un trayecto de más de tres mil kilómetros.

Desde luego, la migración es algo común en el reino animal. Por ejemplo, cada invierno, los salmones frezan en los ríos y lagos de Europa septentrional, dejando alevines que, una vez que han hecho eclosión, siguen el curso de su río hasta el mar y hacia el Atlántico Norte, donde crecen y maduran; tres años después, estos salmones jóvenes retornan para reproducirse en los mismos ríos y



lagos en los que salieron del huevo. Las mariposas monarca del Nuevo Mundo migran miles de kilómetros hacia el sur y atraviesan todo Estados Unidos en otoño. Ellas, o sus descendientes (porque se reproducen en ruta), retornan luego al norte, a los mismos árboles en los que se convirtieron en ninfas en primavera. Las tortugas verdes que salen del huevo en la isla de Ascensión, en el Atlántico Sur, nadan a lo largo de miles de kilómetros de océano antes de volver, cada tres años, a reproducirse en exactamente la misma playa de la que surgieron, cubierta de cáscaras de huevos. Y la lista sigue: muchas especies de aves, ballenas, caribúes, langostas de mar, ranas, salamandras e incluso abejas son capaces de emprender viajes que pondrían en un aprieto a los mayores exploradores humanos.

Durante siglos ha sido un misterio la manera en que los animales consiguen encontrar su camino alrededor del globo. Ahora sabemos que utilizan métodos de lo más variado: algunos emplean la navegación solar durante el día y la navegación celeste durante la noche; algunos memorizan hitos en el terreno; otros pueden incluso oler su camino por el planeta. Pero el sentido de navegación más misterioso de todos es el que posee el petirrojo: la capacidad de detectar la dirección e intensidad del campo magnético de la Tierra, lo que se conoce como magnetorrecepción o magnetocepción. Y aunque ahora sabemos de otros muchos animales que poseen esta capacidad, la manera en que el petirrojo (*Erithacus rubecula*) encuentra su camino a través del globo es del mayor interés para nuestro relato.

El mecanismo que permite a nuestra hembra de petirrojo saber lo lejos que ha de volar y en qué dirección está codificado en el ADN que heredó de sus padres. Esta capacidad es refinada e insólita: un «sexto sentido» que utiliza para trazar su rumbo. Porque, como muchas otras aves, y de hecho insectos y animales marinos, la hembra de petirrojo tiene la capacidad de sentir el débil campo magnético de la Tierra y de extraer de él información direccional mediante un sentido de navegación innato, que en su caso necesita un nuevo tipo de brújula química.

La magnetocepción es un enigma. El problema es que el campo magnético de la Tierra resulta muy débil: entre 30 y 70 microteslas en la superficie, suficiente para desviar una aguja de brújula finamente equilibrada y sin apenas fricción, pero solo alrededor de la centésima parte de la fuerza de un típico imán de frigorífico. Esto plantea un enigma: para que un animal detecte el campo magnético de la Tierra, este ha de influir de algún modo en una reacción química en algún lugar del cuerpo del animal; al fin y al cabo, así es como todos los seres

vivos, nosotros incluidos, sienten cualquier señal externa. Pero la cantidad de energía que proporciona la interacción entre el campo magnético de la Tierra y las moléculas del interior de las células vivas es inferior a la milmillonésima parte de la energía necesaria para romper o producir un enlace químico. Así pues, ¿cómo puede percibir este campo magnético el petirrojo?

Los misterios, por pequeños que sean, resultan fascinantes porque siempre existe la posibilidad de que su solución conduzca a un cambio fundamental en nuestra comprensión del mundo. Por ejemplo, las reflexiones de Copérnico en el siglo XVI acerca de un problema relativamente menor con relación a la geometría del modelo geocéntrico del sistema solar de Ptolomeo, le llevó a desplazar el centro de gravedad del universo y apartarlo de la humanidad. La obsesión de Darwin por la distribución geográfica de las especies animales y el misterio de por qué las especies de pinzones y sinsontes de islas aisladas tienden a ser tan especializadas le condujeron a proponer su teoría de la evolución. Y la solución del físico alemán Max Planck al misterio de la radiación de un cuerpo negro, relacionado con la manera en que los objetos calientes emiten calor, le llevó a sugerir que la energía se halla en burujos discretos llamados «cuantos», lo que condujo al nacimiento de la teoría cuántica en el año 1900. Así pues, ¿acaso la solución del misterio de cómo encuentran las aves su camino alrededor del globo podría conducir a una revolución en el campo de la biología? La respuesta, por extraño que parezca, es que sí.

Pero misterios como este son también el lugar predilecto de pseudocientíficos y místicos. Tal como afirmó Peter Atkins, un químico de Oxford, en 1976: «El estudio de los efectos del campo magnético sobre las reacciones químicas ha sido desde hace mucho tiempo un terreno por el que triscan los charlatanes». <sup>1</sup> En efecto, en un momento u otro se ha propuesto toda suerte de exóticas explicaciones de los mecanismos que emplean las aves migratorias para guiarse a lo largo de sus rutas, desde la telepatía hasta antiguos alineamientos (rutas invisibles que conectan varias ubicaciones arqueológicas o geográficas supuestamente dotadas de energía espiritual), por no hablar del concepto de «resonancia mórfica» que se inventó el polémico parapsicólogo Rupert Sheldrake. Por lo tanto, las reservas que planteaba Atkins en la década de 1970 eran comprensibles, y reflejaban un escepticismo generalizado entre la mayoría de los científicos que por aquel entonces trabajaban para encontrar cualquier indicio de que los animales eran capaces de notar el campo magnético de la Tierra. Sencillamente, no parecía que hubiera ningún mecanismo molecular que permitiera que un animal lo hiciera... o, al menos, ninguno dentro del ámbito de

la bioquímica convencional.

Pero el mismo año en que Peter Atkins manifestaba su escepticismo, el equipo de ornitólogos alemanes radicado en Fráncfort compuesto por el matrimonio Wolfgang y Roswitha Wiltschko publicó en *Science*, una de las principales revistas académicas mundiales, un importantísimo artículo que estableció, sin ningún género de dudas, que, en efecto, los petirrojos pueden detectar el campo magnético de la Tierra. <sup>2</sup> Y, todavía más notable, demostraron que el sentido de las aves no parece funcionar de la manera en que lo hace una brújula normal. Porque mientras que las brújulas indican la diferencia entre el polo norte y el polo sur magnéticos, un petirrojo solo puede distinguir entre polo y ecuador.

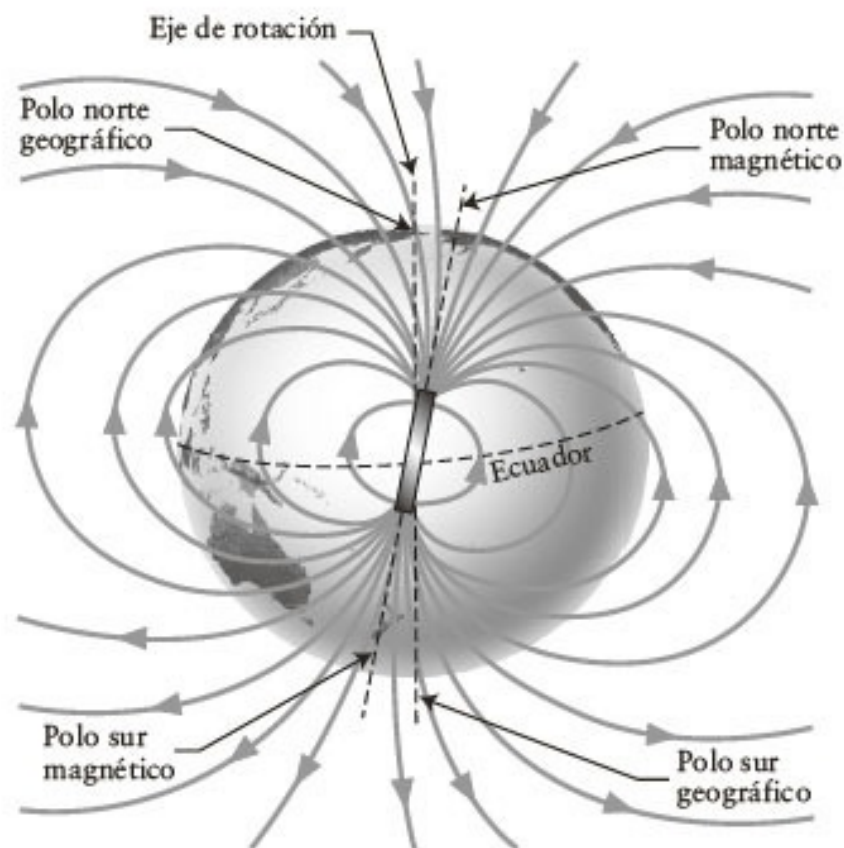


FIGURA 1.1. El campo magnético de la Tierra.

Para comprender cómo podría funcionar una brújula de este tipo, tengamos en cuenta las líneas del campo magnético, las sendas invisibles que definen la dirección de un campo magnético y a lo largo de las cuales se alineará la aguja de una brújula cuando se coloque en cualquier punto de dicho campo. Las conocemos, sobre todo, por ser las líneas que generan las limaduras de hierro

sobre un pedazo de papel situado sobre un imán de barra. Imagine ahora el lector toda la Tierra como un imán de barra gigantesco con las líneas del campo magnético que surgen del polo sur, irradian hacia fuera y se curvan en bucles para entrar en su polo norte (véase figura 1.1). La dirección de estas líneas de campo cerca de cada polo es casi vertical, y salen o entran del suelo, pero se aplanan y corren casi paralelas a la superficie del planeta cuanto más cerca se hallan del ecuador. De modo que una brújula que mida el ángulo de inclinación entre las líneas del campo magnético y la superficie de la Tierra, lo que llamamos una «brújula de inclinación», puede distinguir entre la dirección hacia un polo y la dirección hacia el ecuador, pero no puede distinguir entre los polos norte y sur, porque las líneas de campo tienen el mismo ángulo con el suelo en ambos extremos del globo. El estudio de 1976 de los Wiltschko estableció que el sentido magnético del petirrojo funcionaba exactamente igual que una brújula de inclinación. El problema era que nadie tenía idea de cómo una brújula de inclinación biológica de este tipo podía funcionar, porque, sencillamente, en aquella época no existía mecanismo conocido, ni siquiera concebible, que pudiera explicar de qué manera podía detectarse el ángulo de inclinación del campo magnético de la Tierra en el cuerpo de un animal. La respuesta resultó hallarse dentro de una de las más sorprendentes teorías científicas de la época moderna, y tenía que ver con la extraña ciencia de la mecánica cuántica.

#### UNA REALIDAD OCULTA Y FANTASMAGÓRICA

Si realizamos una encuesta informal entre científicos y les preguntamos cuál creen que es la teoría científica que ha tenido más éxito, que es más general y que ha sido más importante, es probable que la respuesta dependa de si le hacemos la pregunta a alguien especializado en ciencias físicas o en ciencias biológicas. La mayoría de los biólogos considera que la teoría de Darwin de la evolución mediante selección natural es la idea más profunda que jamás se haya concebido. Sin embargo, es probable que un físico aduzca que la mecánica cuántica debería ocupar el puesto de honor; al fin y al cabo, es el fundamento sobre el que se asienta gran parte de la física y de la química, y nos proporciona un panorama notablemente completo de las piezas fundamentales de todo el universo. De hecho, sin su poder explicativo, desaparecería gran parte de lo que ahora sabemos acerca de cómo funciona el mundo.

Casi todo el mundo habrá oído hablar de «mecánica cuántica», y la idea de que esta es un área de la ciencia desconcertante y difícil que solo comprende una

minoría muy reducida e inteligente de humanos pertenece a la cultura popular. Pero lo cierto es que la mecánica cuántica ha sido parte de toda nuestra vida desde principios del siglo xx . La ciencia se desarrolló como teoría matemática a mediados de la década de 1920 para explicar el mundo de lo muy pequeño (el micromundo, como se le llama), es decir, el comportamiento de los átomos que conforman todo lo que vemos a nuestro alrededor, y las propiedades de las partículas todavía más pequeñas que constituyen dichos átomos. Por ejemplo, al describir las reglas que los electrones obedecen y cómo estos se disponen dentro de los átomos, la mecánica cuántica socaliza toda la química, la ciencia de los materiales e incluso la electrónica. A pesar de su carácter extraño, sus reglas matemáticas se hallan en el núcleo mismo de la mayoría de los avances tecnológicos del último medio siglo. Sin la explicación que la mecánica cuántica nos proporciona de cómo los electrones se desplazan a través de los materiales, no habríamos comprendido el comportamiento de los semiconductores, que son el fundamento de la electrónica moderna, y sin una comprensión de los semiconductores no habríamos desarrollado ni el transistor de silicio ni, posteriormente, el microchip y el ordenador moderno. La lista sigue: sin el avance en nuestros conocimientos gracias a la mecánica cuántica no habría láseres, y por lo tanto no existirían ni el CD, ni el DVD ni los reproductores de Blu-ray. Sin mecánica cuántica no tendríamos teléfonos inteligentes, navegación por satélite ni escáneres de MRI (imagenología de resonancia magnética). De hecho, se ha calculado que alrededor de un tercio del PIB (producto interior bruto) del mundo civilizado depende de aplicaciones que simplemente no existirían sin nuestro conocimiento de la mecánica del mundo cuántico.

Y esto es solo el principio. Cabe esperar un futuro cuántico (con toda probabilidad, antes de que nos muramos) en el que podamos disponer de energía eléctrica prácticamente ilimitada a partir de fusión nuclear producida por láser; en el que máquinas moleculares artificiales desempeñen una enorme gama de tareas en los campos de la ingeniería, la bioquímica y la medicina; en el que los ordenadores cuánticos proporcionen inteligencia artificial; y en el que, en potencia, incluso la tecnología de la teleportación, que ahora nos parece propia de la ciencia ficción, se utilice de manera habitual para transmitir información. La revolución cuántica del siglo xx está acelerando su ritmo en el siglo xxi y transformará nuestras vidas de maneras inimaginables.

Pero ¿qué es exactamente la mecánica cuántica? Exploraremos esta pregunta a lo largo del libro. Como muestra, empecemos con algunos ejemplos de la realidad cuántica oculta que socaliza nuestras vidas.

Nuestro primer ejemplo ilustra una de las extrañas características del mundo cuántico, que puede decirse que es su rasgo definitorio: la dualidad onda-partícula. Nos hemos familiarizado con el hecho de que nosotros, al igual que todas las cosas que nos rodean, estamos compuestos por gran cantidad de partículas minúsculas y discretas tales como átomos, electrones, protones y neutrones. El lector puede asimismo saber que la energía, como la luz o el sonido, se presenta en forma de ondas, en lugar de hacerlo como partículas. Las ondas se estiran, en lugar de ser particuladas; y fluyen a través del espacio como..., bueno, como ondas u olas, con picos y valles como las olas del mar. La mecánica cuántica nació cuando se descubrió, en los primeros años del siglo XX, que las partículas subatómicas pueden comportarse como ondas; y las ondas luminosas pueden comportarse como partículas.

Aunque la dualidad onda-partícula no es algo que necesitemos tener en cuenta en nuestro día a día, es la base de gran cantidad de máquinas muy importantes, como los microscopios electrónicos, que permiten a médicos y científicos ver, identificar y estudiar objetos minúsculos, demasiado pequeños para poder verse bajo los microscopios ópticos tradicionales, como los virus que causan el sida o el resfriado común. El microscopio electrónico se inspiró en el descubrimiento de que los electrones tienen propiedades ondulatorias. Los científicos alemanes Max Knoll y Ernst Ruska se dieron cuenta de que, puesto que la longitud de onda (la distancia entre picos o valles sucesivos de cualquier onda) asociada con los electrones era mucho más corta que la longitud de onda de la luz visible, un microscopio basado en imaginología electrónica podría captar detalles mucho más finos que un microscopio óptico. Ello se debe a que cualquier objeto o detalle minúsculo que tenga dimensiones inferiores a la onda que incida sobre ellos no influirá ni afectará a la onda. Piense el lector en olas marinas con longitudes de onda de varios metros que alcanzan los guijarros de una playa. No podríamos descubrir nada acerca de la forma o el tamaño de un guijarro concreto al estudiar las olas. Necesitaríamos longitudes de onda mucho más cortas, como las que se producen en un depósito de agua de los que se utilizan en las escuelas para las clases de ciencias, para producir olas, para poder «ver» un guijarro por la manera en que las olas rebotan en él o se difractan a su alrededor. Así, en 1931, Knoll y Ruska construyeron el primer microscopio electrónico del mundo, y lo utilizaron para tomar las primeras fotografías de virus, lo que valió a Ernst Ruska el premio Nobel, aunque con un poco de retraso, en 1986 (dos años antes de morir).

Nuestro segundo ejemplo es todavía más fundamental. ¿Por qué brilla el Sol?

La mayoría de la gente tal vez esté al tanto de que el Sol es fundamentalmente un reactor de fusión nuclear que quema gas hidrógeno para liberar el calor y la luz solar que mantiene la vida sobre la Tierra; pero menos gente sabe que no brillaría en absoluto si no fuera por una notable propiedad cuántica que permite que las partículas «atravesen paredes». El Sol, y de hecho todas las estrellas del universo, es capaz de emitir estas ingentes cantidades de energía porque los núcleos de los átomos de hidrógeno, cada uno de los cuales está compuesto de solo una única partícula con carga positiva llamada protón, pueden fundirse y, como resultado, liberar energía en forma de la radiación electromagnética que llamamos luz solar. Para fusionarse, dos núcleos de hidrógeno han de poder situarse muy cerca uno del otro; pero cuanto más se acercan, más intensa se vuelve la fuerza de repulsión entre ellos, pues cada uno porta una carga eléctrica positiva y las cargas «iguales» se repelen. De hecho, para que se acerquen lo suficiente como para fusionarse, las partículas deben poder atravesar el equivalente subatómico de una pared de mampostería: una barrera de energía aparentemente impenetrable. La física clásica, \* que se basa en las leyes del movimiento, la mecánica y la gravedad de Isaac Newton, que describe bien el mundo cotidiano de las bolas, muelles y máquinas de vapor (e incluso planetas), diría que esto no puede ocurrir; las partículas no podrían atravesar paredes y, por lo tanto, el Sol no brillaría.

Pero las partículas que obedecen las reglas de la mecánica cuántica, como los núcleos atómicos, poseen un as oculto en la manga: pueden pasar con facilidad a través de dichas barreras mediante un proceso llamado «efecto de túnel cuántico». Y es esencialmente su dualidad onda-partícula lo que les permite hacerlo. De la misma manera que las olas pueden fluir alrededor de los objetos, como los guijarros de una playa, también pueden fluir a través de los objetos, como las ondas sonoras que atraviesan las paredes de nuestra casa cuando oímos el televisor del vecino. Desde luego, el aire que transporta las ondas sonoras no atraviesa en realidad las paredes: son las vibraciones en el aire (el sonido) lo que hace que nuestra pared común vibre y empuje el aire en nuestra habitación y transmita las mismas ondas sonoras hasta nuestros oídos. Pero si pudiéramos comportarnos como un núcleo atómico, entonces a veces podríamos atravesar directamente, como un fantasma, una pared sólida. \* Un núcleo de hidrógeno en el interior del Sol consigue hacer precisamente esto: puede extenderse y «filtrarse» a través de la barrera de energía como un fantasma, para acercarse lo bastante a su pareja, que está al otro lado de la pared, y fusionarse. De modo que la próxima vez que el lector esté tomando el sol en la playa y observando cómo

las olas mueren en el litoral, piense un momento en los movimientos ondulatorios fantasmagóricos de las partículas cuánticas que no solo le permiten gozar de los rayos solares, sino que también hacen posible toda la vida en nuestro planeta.

El tercer ejemplo está relacionado, pero ilustra una característica diferente e incluso más extraña del mundo cuántico: un fenómeno llamado «superposición» por el que las partículas pueden hacer dos (o cien, o un millón de) cosas a la vez. Esta propiedad es responsable del hecho de que nuestro universo sea muy complejo e interesante. No mucho después del Gran Estallido (Big Bang) mediante el cual surgió este universo, el espacio estaba atestado de solo un tipo de átomos: el que tiene la estructura más simple, el hidrógeno, que está constituido por un protón, con carga positiva, y un electrón, con carga negativa. Era un lugar bastante aburrido, sin estrellas ni planetas y, desde luego, sin organismos vivos, porque las piezas elementales de todo lo que nos rodea, incluidos nosotros, están constituidas por otras cosas que no son hidrógeno, entre ellas elementos más pesados como el carbono, el oxígeno y el hierro. Por suerte, estos elementos más pesados se cocinaron en el interior de las estrellas llenas de hidrógeno; y su elemento inicial, una forma de hidrógeno conocida como deuterio, le debe su existencia a una pizca de magia cuántica.

El primer paso en la fórmula es el que acabamos de describir, cuando dos núcleos de hidrógeno, protones, se acercan lo suficiente mediante el efecto de túnel cuántico para liberar parte de esta energía, que se transforma en la luz solar que caldea nuestro planeta. A continuación, los dos protones tienen que unirse, y esto no es inmediato, porque las fuerzas que hay entre ellos no proporcionan un pegamento lo bastante fuerte. Todos los núcleos atómicos están compuestos por dos tipos de partículas: protones y sus compañeros eléctricamente neutros, los neutrones. Si un núcleo tiene demasiados de un tipo u otro de dichos componentes, entonces las reglas de la mecánica cuántica dictan que hay que recuperar el equilibrio y que estas partículas que hay en exceso cambiarán a la otra forma: los protones se convertirán en neutrones, o los neutrones en protones, mediante un proceso llamado desintegración beta. Y justo eso es lo que ocurre cuando dos protones se unen: un compuesto de dos protones no puede existir, y uno de ellos se transformará en un neutrón mediante una desintegración beta. El protón que queda y el neutrón recién transformado pueden entonces unirse para formar un objeto denominado deuterón (el núcleo de un átomo del isótopo <sup>2</sup> del hidrógeno pesado llamado deuterio), después de lo cual otras reacciones nucleares permiten la construcción de los núcleos más complejos de los otros



elementos más pesados que el hidrógeno, desde el helio (con dos protones y uno o dos neutrones) hasta el carbono, el nitrógeno, el oxígeno, y así sucesivamente.

El punto clave es que el deuterón debe su existencia a su capacidad de existir de manera simultánea en dos estados, en virtud de la superposición cuántica. Ello se debe a que el protón y el neutrón pueden pegarse de dos maneras diferentes que se distinguen por la manera en que giran sobre sí mismos (es decir, por su «espín»). [\\*\\*](#) Veremos más adelante que este concepto de «espín cuántico» es, en realidad, muy distinto del giro familiar de un objeto grande, como una pelota de tenis; pero por ahora seguiremos con nuestra intuición clásica de una partícula que gira e imaginaremos que el protón y el neutrón giran junto con el deuterón en una combinación cuidadosamente coreografiada de un vals lento e íntimo y un jive [\\*](#) más rápido. A finales de la década de 1930 se descubrió que dentro del deuterón estas dos partículas no bailan juntas en uno u otro de estos dos estados, sino que lo hacen en los dos estados al mismo tiempo (se hallan en una confusión simultánea de vals y jive), y esto es lo que les permite unirse. [\\*\\*](#)

Una respuesta obvia a esta afirmación es: «¿Cómo lo sabemos?». Desde luego, los núcleos atómicos son demasiado pequeños para poder verse, de modo que ¿no sería acaso más razonable suponer que a nuestra comprensión de las fuerzas nucleares le falta algo? La respuesta es que no, porque se ha confirmado en muchos laboratorios una y otra vez que si un protón y un neutrón efectuaran el equivalente de un vals cuántico o un jive cuántico, entonces el «pegamento» nuclear entre ellos no sería lo bastante fuerte para unirlos; solo cuando estos dos estados se superponen uno sobre el otro (es decir, las dos realidades existen al mismo tiempo) la fuerza de unión es lo bastante fuerte. Piénsese en las dos realidades superpuestas como si se tratara de la mezcla de pinturas de dos colores, azul y amarillo, para obtener un color resultante combinado, verde. Aunque sabemos que el verde está constituido por los dos colores constituyentes primarios, no es ni uno ni el otro. Y proporciones diferentes de azul y amarillo producirán tonos diferentes de verde. De manera parecida, el deuterón se une cuando el protón y el neutrón se hallan principalmente enlazados en un vals al que se ha añadido solo una pequeña cantidad de jive.

De modo que si las partículas no pudieran bailar a la vez el jive y el vals, nuestro universo habría seguido siendo una sopa de gas hidrógeno y nada más: no habría estrellas que brillaran, no se habría formado ninguno de los demás elementos, y el lector no estaría contemplando estas palabras. Existimos gracias a la capacidad de protones y neutrones de comportarse de esta manera cuántica

contraria al sentido común.

Nuestro último ejemplo nos lleva de nuevo al mundo de la tecnología. La naturaleza del mundo cuántico puede explotarse no solo para ver objetos minúsculos como los virus, sino también para ver dentro de nuestro cuerpo. La imaginología de resonancia magnética (MRI) es una técnica de rastreo médico que genera imágenes maravillosamente detalladas de tejidos blandos. Los escaneos de MRI se usan de forma habitual para diagnosticar enfermedades y, en particular, para detectar tumores en los órganos internos. La mayoría de las explicaciones no técnicas de la MRI evitan mencionar el hecho de que la técnica depende de la extraña manera en que funciona el mundo cuántico. La MRI utiliza imanes enormes y potentes para alinear los ejes de los núcleos de hidrógeno que giran dentro del cuerpo del paciente. Estos átomos son después atacados con un pulso de ondas de radio, que obliga a los núcleos alineados a existir en este extraño estado de girar en ambas direcciones a la vez. Es inútil intentar siquiera visualizar lo que esto implica, porque queda muy lejos de nuestra experiencia cotidiana. Lo que nos interesa destacar es que cuando los núcleos atómicos se relajan y vuelven a su estado inicial, el estado en el que se encontraban antes de recibir el pulso de energía que los hizo saltar a una superposición cuántica, liberan esta energía, que es lo que captan los aparatos electrónicos del escáner de MRI y se usa para crear estas imágenes hermosamente detalladas de nuestros órganos internos.

De modo que si el lector se halla alguna vez tendido dentro de un escáner de MRI, quizás oyendo música a través de sus auriculares, puede dedicar un momento a reflexionar sobre el comportamiento cuántico, contrario a la lógica, de las partículas subatómicas que hacen posible esta tecnología.

## BIOLOGÍA CUÁNTICA

¿Qué tiene que ver todo este misterio cuántico con el vuelo de la hembra de petirrojo mientras navega a través del globo? Bien, el lector recordará que la investigación de los Wiltschko a principios de la década de 1970 estableció que el sentido magnético del petirrojo funcionaba de la misma manera que una brújula de inclinación. Esto era extraordinariamente sorprendente porque, en aquella época, nadie tenía la menor idea de cómo podía funcionar una brújula de inclinación biológica. Sin embargo, por la misma época, Klaus Schulten, un científico alemán, se interesó por la manera en que los electrones se transferían en las reacciones químicas en las que había radicales libres implicados. Se trata

de moléculas que poseen electrones solitarios en su capa de electrones externa, en contraste con la mayoría de los electrones, que se encuentran en parejas en los orbitales atómicos. Esto es importante a la hora de valorar aquella propiedad cuántica extraña del espín, puesto que los electrones emparejados tienden a girar en direcciones opuestas, de modo que su espín total queda anulado y es cero. Pero, sin una pareja que anule el espín, los electrones solitarios de los radicales libres poseen un espín neto que les confiere una propiedad magnética: su espín puede alinearse con un campo magnético.

Schulten propuso que pares de radicales libres generados por un proceso llamado reacción rápida del triplete podía tener «enmarañados cuánticamente» sus electrones correspondientes. Por razones sutiles que resultarán evidentes más adelante, un estado cuántico tan delicado de los dos electrones separados es muy sensible a la dirección de cualquier campo magnético externo. A continuación, Schulten propuso que la enigmática brújula aviar podría estar utilizando este tipo de mecanismo de enmarañamiento cuántico.

No hemos mencionado todavía el enmarañamiento o entrelazamiento cuántico (*quantic entanglement*, *Quantenverschränkung*) porque tal vez sea la característica más extraña de la mecánica cuántica. Permite que partículas que anteriormente estuvieron juntas permanezcan en comunicación instantánea, casi mágica, entre sí, a pesar de encontrarse separadas por distancias enormes. Por ejemplo, partículas que antes estuvieron juntas pero que en la actualidad se hallan tan separadas que están situadas en lugares opuestos del universo pueden, al menos en principio, hallarse todavía conectadas. En efecto, si estimulamos una de las partículas haremos que su distante pareja salte de manera instantánea.

\* Los pioneros de la física cuántica demostraron que el enmarañamiento se deducía naturalmente de sus ecuaciones, pero sus implicaciones eran tan extraordinarias que incluso Einstein, a quien le debemos los agujeros negros y el espacio-tiempo combado, se negó a aceptarlo, y lo ridiculizó calificándolo de «acción fantasmal a distancia». Y es, en efecto, esta acción fantasmal a distancia la que con tanta frecuencia intriga a los «místicos cuánticos», que hacen afirmaciones extravagantes sobre el enmarañamiento cuántico como, por ejemplo, que es lo que explica «fenómenos» paranormales tales como la telepatía. Einstein se mostraba escéptico porque el enmarañamiento parecía violar su teoría de la relatividad, que afirmaba que no existe influencia o señal que pueda desplazarse por el espacio a una velocidad mayor que la de la luz. Según Einstein, las partículas mutuamente distantes no deberían poseer conexiones fantasmales instantáneas. Einstein se equivocaba al respecto: ahora

sabemos de manera empírica que las partículas cuánticas pueden tener en realidad conexiones instantáneas a larga distancia. Pero, por si acaso el lector se lo está preguntando, no puede invocarse el enmarañamiento cuántico para validar la telepatía.

A principios de la década de 1970, la idea de que la extraña propiedad cuántica del enmarañamiento estaba implicada en las reacciones químicas ordinarias se consideraba ridícula. Por aquel entonces, muchos científicos compartían con Einstein la duda de que existieran realmente partículas enmarañadas, pues nadie las había detectado todavía. Pero en las décadas transcurridas desde entonces, muchos experimentos ingeniosos de laboratorio han confirmado la realidad de estas conexiones fantasmales. El más famoso de dichos experimentos lo realizó en 1982 un equipo de físicos franceses dirigidos por Alain Aspect, en la Universidad de París Sur.

El equipo de Aspect generó pares de fotones (partículas de luz) con estados de polarización enmarañados. La polarización de la luz nos resulta probablemente más familiar si llevamos gafas de sol polarizadas. Cada fotón de luz tiene una especie de direccionalidad, su ángulo de polarización, que es algo así como la propiedad del espín de la que ya hemos hablado. \* Los fotones de la luz solar se encuentran en todos los ángulos de polarización posibles, pero las gafas polarizadas los filtran, y solo dejan pasar aquellos fotones que tienen un ángulo de polarización determinado. Aspect generó pares de fotones con direcciones de polarización que no solo eran diferentes (digamos que una se dirigía hacia arriba y otra hacia abajo), sino que también estaban enmarañadas; y, al igual que nuestra pareja de bailarines, ningún miembro de la pareja enmarañada señalaba realmente en un sentido o en otro, sino que ambos señalaban en ambas direcciones de manera simultánea, hasta que se los midió.

La medición es uno de los aspectos más misteriosos (y, en verdad, el más debatido) de la mecánica cuántica, porque está relacionado con una pregunta que estamos seguros de que ya se le ha ocurrido al lector: ¿por qué todos los objetos que podemos ver no hacen todas estas cosas extrañas y maravillosas que pueden hacer las partículas cuánticas? La respuesta es que, en el mundo microscópico cuántico, las partículas solo pueden comportarse de estas maneras extrañas, como hacer dos cosas a la vez, poder atravesar paredes o poseer conexiones fantasmales, cuando nadie las está observando. Una vez que se las observa, o se las mide de alguna manera, pierden su carácter misterioso y se comportan como los objetos clásicos que vemos a nuestro alrededor. Pero esto, desde luego, no hace más que plantear otra pregunta: ¿qué tiene de especial la medición y por

qué permite que el comportamiento cuántico se convierta en comportamiento clásico? \* La respuesta a esta pregunta es crucial para nuestro relato, porque la medición se encuentra en el límite entre los mundos cuántico y clásico, el límite cuántico, en el que, como el lector ya habrá adivinado a juzgar por el título del libro, los autores afirmamos que también se encuentra la vida.

A lo largo del libro exploraremos la medición cuántica, y esperamos que el lector acabe por familiarizarse con las sutilezas de este proceso misterioso. Por el momento, solo consideraremos la interpretación más sencilla del fenómeno y diremos que cuando una propiedad cuántica, como el estado de polarización, se mide mediante un instrumento científico, entonces se ve obligada al instante a olvidar sus capacidades cuánticas, como señalar en muchas direcciones de manera simultánea, y ha de adoptar una propiedad clásica convencional, como señalar en una única dirección. Así, cuando Aspect midió el estado de polarización de uno de cualquier pareja de fotones enmarañados, observando si podía atravesar una lente polarizada, este perdió instantáneamente su conexión fantasmal con su pareja y adoptó una única dirección de polarización. Y lo mismo hizo su pareja, al instante, sin importar lo alejada que se encontrara; al menos, esto es lo que predecían las ecuaciones de mecánica cuántica, que, desde luego, es exactamente lo que había inquietado a Einstein.

Aspect y su equipo realizaron su famoso experimento con pares de fotones que habían estado separados varios metros en su laboratorio, lo suficientemente alejados como para que ni siquiera una influencia que viajara a la velocidad de la luz (y la relatividad nos dice que nada puede desplazarse más deprisa que la velocidad de la luz) podría haber pasado entre ellos para coordinar sus ángulos de polarización. Aun así, las mediciones sobre pares de partículas estaban correlacionadas: cuando la polarización de un fotón se dirigía hacia arriba, la del otro resultaba estar dirigida hacia abajo. Desde 1982, el experimento se ha repetido incluso para partículas separadas por cientos de kilómetros, y todavía poseen esta conexión enmarañada fantasmal que Einstein no podía aceptar.

Todavía faltaban algunos años para el experimento de Aspect cuando Schulten propuso que en la brújula aviar estaba implicado el enmarañamiento, y este fenómeno todavía era polémico. Asimismo, Schulten no tenía idea de cómo una reacción química tan oscura podía permitirle a un petirrojo ver el campo magnético de la Tierra. Aquí decimos «ver» debido a otra peculiaridad que habían descubierto los Wiltshko. A pesar de que el petirrojo europeo es un migrador nocturno, la activación de su brújula magnética necesitaba una pequeña cantidad de luz (hacia el extremo azul del espectro visible), lo que daba

a entender que los ojos del pájaro desempeñaban un papel importante en la manera en que la brújula funcionaba. Pero, aparte de la visión, ¿cómo colaboraban también sus ojos para proporcionarle un sentido magnético? Con o sin un mecanismo de par radical, esto era un misterio total.

La teoría de que la brújula de las aves tenía un mecanismo cuántico languideció en el fondo de un cajón científico durante más de veinte años. Schulten se trasladó a Estados Unidos, donde estableció un grupo de química física teórica muy productivo en la Universidad de Illinois, en Urbana-Champaign. Pero nunca se olvidó de su extravagante teoría, y escribió y reescribió una y otra vez un artículo en el que proponía biomoléculas (moléculas que son producidas por células vivas) candidatas que podrían generar los pares radicales necesarios para la reacción rápida del triplete. Pero ninguna cumplía realmente los requisitos: o bien no podían generar pares radicales, o bien no estaban presentes en los ojos de las aves. Pero en 1998, Schulten leyó que en los ojos de animales se había descubierto un enigmático fotorreceptor llamado criptocromo. Esto hizo sonar rápidamente su alarma científica, porque se sabía que el criptocromo era una proteína potencialmente capaz de generar pares radicales.

Un talentoso estudiante de doctorado llamado Thorsten Ritz se había unido en fechas recientes al grupo de Schulten. Cuando era alumno de la Universidad de Fráncfort, Ritz había oído a Schulten dar una conferencia sobre la brújula aviar, y quedó pillado. Cuando surgió la oportunidad, aprovechó la ocasión de hacer el doctorado en el laboratorio de Schulten, en el que al principio trabajó en fotosíntesis. Cuando surgió el asunto del criptocromo pasó a trabajar en magnetocepción, y en el año 2000 escribió un artículo con Schulten titulado «A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds», en el que describían que el citocromo podría proporcionar al ojo de las aves una brújula cuántica. (Volveremos con más detenimiento a este tema en el capítulo 6.) Cuatro años después, Ritz se incorporó al equipo de los Wiltschko para efectuar un estudio de los petirrojos, que proporcionó las primeras pruebas experimentales en apoyo de esta teoría de que las aves utilizan el enmarañamiento cuántico para navegar alrededor del globo. Por lo visto, Schulten había estado en lo cierto desde el principio. Su artículo de 2004, aparecido en la prestigiosa revista británica *Nature*, despertó un enorme interés, y la brújula cuántica de las aves se convirtió al instante en el icono de la nueva ciencia de la biología cuántica.

SI LA MECÁNICA CUÁNTICA ES NORMAL, ¿POR QUÉ TENDRÍA QUE EMOCIONARNOS LA

## BIOLOGÍA CUÁNTICA?

Ya hemos descrito el efecto de túnel cuántico y la superposición cuántica tanto en el núcleo del Sol como en dispositivos tecnológicos tales como los microscopios electrónicos y los escáneres de MRI. Así pues, ¿por qué habría de sorprendernos que aparecieran fenómenos cuánticos en la biología? La biología es, al fin y a la postre, una especie de química aplicada, y la química es una especie de física aplicada. ¿Acaso no todas las cosas, incluidos nosotros y otros seres vivos, son simplemente física cuando descendemos realmente a lo fundamental? Este es, de hecho, el argumento de muchos científicos que aceptan que la mecánica cuántica tiene que estar implicada, a un nivel profundo, en la biología; pero insisten en que su papel es trivial. Lo que quieren decir con ello es que, puesto que las reglas de la mecánica cuántica rigen el comportamiento de los átomos, y la biología implica en último término la interacción de átomos, entonces las reglas del mundo cuántico tienen que operar asimismo en las más diminutas de las escalas en biología; pero solo en estas escalas, con el resultado de que tendrán poco efecto o ninguno en los procesos a escalas mayores que son importantes para la vida.

Desde luego, estos científicos tienen razón, al menos en parte. Las biomoléculas como el ADN o las enzimas están compuestas de partículas fundamentales como protones y electrones, cuyas interacciones son regidas por la mecánica cuántica. Pero lo mismo ocurre con la estructura del libro que el lector está leyendo o con la silla en la que está sentado. La manera en que andamos o hablamos, comemos, dormimos o incluso pensamos tiene que depender en último término de fuerzas de la mecánica cuántica que gobiernan a los electrones, protones y otras partículas, de la misma manera que el funcionamiento del automóvil o de la tostadora de pan del lector depende, en definitiva, de la mecánica cuántica. Pero, en líneas generales, el lector no necesita saber todo esto. No se exige a los mecánicos de automóviles que sigan cursos en la universidad sobre mecánica cuántica, y la mayoría de los programas de biología no incluyen mención alguna del efecto de túnel cuántico, el enmarañamiento o la superposición. La mayoría de nosotros podemos apañárnoslas sin saber que, a un nivel fundamental, el mundo funciona con arreglo a un conjunto de normas completamente distintas de aquellas que nos son familiares. Las extrañas cosas cuánticas que suceden al nivel de lo muy pequeño no suelen suponer ninguna diferencia para las cosas grandes, como los automóviles y las tostadoras de pan, que vemos y utilizamos a diario.

¿Por qué no? Los balones de fútbol no atraviesan paredes; la gente no tiene conexiones fantasmales (a pesar de las afirmaciones espurias de telepatía) y, por desgracia, no podemos estar a la vez en el despacho y en casa. Pero las partículas fundamentales del interior de un balón de fútbol (o de una persona) pueden hacer todas estas cosas. ¿Por qué hay una línea de falla, un límite, entre el mundo que vemos y el mundo que los físicos saben que existe realmente bajo su superficie? Este es uno de los problemas más profundos de toda la física, y está relacionado con el fenómeno de la medición cuántica que presentamos hace poco. Cuando un sistema cuántico interactúa con un dispositivo de medición clásico, como la lente polarizada del experimento de Alain Aspect, pierde su rareza cuántica y se comporta como un objeto clásico. Pero las mediciones que efectúan los físicos no pueden ser responsables de la manera en que aparece el mundo que nos rodea. Así pues, ¿qué es lo que lleva a cabo la función equivalente a la destrucción del comportamiento cuántico fuera del laboratorio de física?

La respuesta tiene que ver con la manera en que las partículas se disponen y en cómo se mueven dentro de los objetos grandes (macroscópicos). Átomos y moléculas tienden a hallarse dispersos al azar y a vibrar de manera errática dentro de los objetos sólidos inanimados; en los líquidos y gases se hallan también en un estado constante de movimiento aleatorio debido al calor. Estos factores de aleatorización (dispersión, vibraciones y movimiento) hacen que las propiedades cuánticas ondulatorias de las partículas se disipen con mucha rapidez. De modo que es la acción combinada de todos los constituyentes cuánticos de un cuerpo lo que efectúa la «medición cuántica» en cada uno y en todos ellos, con lo que hacen que el mundo que vemos a nuestro alrededor parezca normal. Para observar el carácter extraño del mundo cuántico tenemos que ir a lugares insólitos (como el interior del Sol), escudriñar en lo más profundo del micromundo (con instrumentos como los microscopios electrónicos) o bien alinear detenidamente las partículas cuánticas para que se desplacen al unísono (como ocurre con los espines de los núcleos de hidrógeno del interior de nuestros cuerpos cuando se hallan dentro de un escáner de MRI... hasta que el imán se desconecta, momento en el que la orientación del espín de los núcleos se aleatoriza de nuevo, lo que elimina de nuevo la coherencia cuántica). El mismo tipo de aleatorización molecular es responsable del hecho de que durante la mayor parte del tiempo podamos arreglárnoslas sin la mecánica cuántica: todo el misterio cuántico se desvanece en el interior de las moléculas orientadas al azar y en constante movimiento de los objetos inanimados visibles que vemos a nuestro alrededor.



La mayor parte del tiempo... pero no siempre. Tal como Schulten descubrió, la reacción química rápida del triplete solo podía explicarse cuando se hallaba implicada esta delicada propiedad cuántica del enmarañamiento. Pero la reacción rápida del triplete es solo esto: rápida. Y solo afecta a un par de moléculas. Para que fuera responsable de la navegación de las aves, habría de tener un efecto duradero en un petirrojo entero. De modo que la afirmación de que la brújula magnética aviar estaba enmarañada cuánticamente era un nivel de proposición completamente diferente de la afirmación de que el enmarañamiento tenía que ver en una reacción química exótica que tan solo afectaba a un par de partículas. Por eso la recibieron con sumo escepticismo. Se pensaba que las células vivas estaban compuestas principalmente de agua y biomoléculas en un estado constante de agitación molecular del que se esperaba que midiera y dispersara de inmediato estos extraños efectos cuánticos. Por «midiera» aquí no queremos decir, desde luego, que las moléculas de agua o las biomoléculas efectúen una medición en el sentido en que nosotros podemos medir el peso o la temperatura de un objeto y después efectuar un registro permanente de este valor sobre papel o en el disco duro de un ordenador, o incluso solo en nuestro cerebro. De lo que hablamos aquí es de lo que ocurre cuando una molécula de agua choca contra una partícula de una pareja de partículas enmarañadas: su movimiento subsiguiente estará afectado por el estado de dicha partícula, de modo que si fuéramos a estudiar el movimiento subsiguiente de la molécula de agua podríamos deducir algunas de las propiedades de la partícula con la que había chocado. Así, en este sentido, la molécula de agua ha realizado una «medición» porque su movimiento proporciona un registro del estado del par enmarañado, haya o no haya alguien allí para examinarlo. Este tipo de medición accidental suele bastar para destruir estados enmarañados. De modo que muchos pensaron que la afirmación de que estados cuánticos enmarañados delicadamente dispuestos pudieran sobrevivir en el interior cálido y complejo de células vivas era una idea estrafalaria, que rayaba en la locura.

Pero en años recientes nuestro conocimiento de estas cosas ha hecho grandes avances, y no solo en lo relativo a las aves. Se han detectado fenómenos cuánticos, como la superposición y el efecto de túnel, en muchos procesos biológicos, desde la manera en que las plantas captan la luz solar hasta el modo en que nuestras células fabrican biomoléculas. Incluso nuestro sentido del olfato, o los genes que heredamos de nuestros progenitores, pueden depender del extraño mundo cuántico. En la actualidad aparecen regularmente, en las páginas de las revistas científicas más prestigiosas del mundo artículos de investigación

sobre biología cuántica; y hay un pequeño pero creciente número de científicos que insisten en que existen aspectos de la mecánica cuántica que desempeñan realmente un papel no trivial, de hecho crucial, en el fenómeno de la vida, y que la vida se halla en una posición única para sostener estas extrañas propiedades cuánticas en el límite entre los mundos cuántico y clásico.



FIGURA 1.2. Asistentes al taller de biología cuántica de Surrey en 2012. *De izquierda a derecha* : los autores, Jim Al-Khalili y Johnjoe McFadden; Vlatko Vedral, Greg Engel, Nigel Scrutton, Thorsten Ritz, Paul Davies, Jennifer Brookes y Greg Scholes.

El que el número de dichos científicos es realmente reducido nos resultó evidente cuando organizamos un taller internacional sobre biología cuántica en la Universidad de Surrey en septiembre de 2012, al que asistieron la mayor parte de los que trabajan en este campo, y todos cupieron en un pequeño auditorio. Pero el campo crece rápidamente, impulsado por la emoción que supone el descubrimiento de papeles para la mecánica cuántica en fenómenos biológicos cotidianos. Y una de las áreas de investigación más apasionantes, la que podría tener enormes implicaciones para el desarrollo de nuevas tecnologías cuánticas,

es el descubrimiento reciente del misterio de cómo el extraño carácter cuántico consigue sobrevivir en el cuerpo cálido, húmedo y desordenado de los seres vivos.

Pero para apreciar por entero la importancia de estos hallazgos primero hemos de plantear una pregunta aparentemente sencilla: ¿qué es la vida?

## ¿QUÉ ES LA VIDA?

Una de las misiones científicas más exitosas de todos los tiempos empezó el 20 de agosto de 1977, cuando la nave espacial *Voyager 2* se elevó en el cielo de Florida, seguida dos semanas después por su nave hermana, la *Voyager 1*. Dos años después, la *Voyager 1* alcanzó su primer destino, Júpiter, donde fotografió las nubes giratorias del gigante gaseoso y la famosa mancha roja, antes de seguir viaje y volar sobre la superficie helada de una de sus lunas, Ganímedes, y presenciar una erupción volcánica en otra, Io. Mientras tanto, la *Voyager 2* había estado siguiendo una trayectoria diferente y, después de alcanzar Saturno en agosto de 1981, empezó a retransmitir fotografías asombrosamente hermosas de los anillos del planeta, que revelaron que son collares finamente trenzados de millones de rocas y pequeñas lunas. Pero pasó casi otra década antes de que, el 14 de febrero de 1990, la *Voyager 1* hiciera una de las fotografías más notables que jamás se hayan hecho: una imagen de un minúsculo punto azul frente a un fondo gris y granuloso.

A lo largo del último medio siglo, las misiones de las *Voyager* y de las demás naves espaciales exploradoras han permitido que la humanidad caminara sobre la Luna, explorara remotamente los valles de Marte, echara un vistazo a los abrasadores desiertos de Venus e incluso que fuera testigo de la entrada de un cometa en la atmósfera gaseosa de Júpiter. Pero, sobre todo, han descubierto rocas. Grandes cantidades de rocas. De hecho, podría decirse que la exploración de nuestros cuerpos planetarios hermanos ha sido en gran parte una investigación de rocas, desde la tonelada aproximadamente de minerales de la Luna que los astronautas del *Apollo* trajeron a la Tierra, o los fragmentos microscópicos de cometa recuperados por la visita de la misión *Stardust* \* de la NASA hasta la cita directa de la sonda *Rosetta* con un cometa en 2014, o el análisis de la superficie de Marte por el *Curiosity Rover*: cantidad y cantidad de rocas.

Las rocas procedentes del espacio son, desde luego, objetos fascinantes, y su estructura y composición proporcionan pistas sobre el origen del sistema solar, la formación de los planetas e incluso los acontecimientos cósmicos que precedieron a la formación de nuestro Sol. Pero para la mayoría de quienes no

sean geólogos, una condrita (un tipo de meteorito pétreo, no metálico) marciana no es muy diferente de una troctolita (un meteorito rico en hierro y magnesio) lunar. Sin embargo, hay un lugar en nuestro sistema solar en el que los ingredientes básicos que constituyen las rocas y piedras se han reunido en tal variedad de formas, funciones y química que un solo gramo del material resultante supera en diversidad a toda la materia que se encuentra en otras partes del universo conocido. Este lugar es, por supuesto, aquel punto azul pálido fotografiado por el *Voyager 1*, el planeta al que llamamos Tierra. Y, lo que es más notable, estos diversos materiales brutos que hacen que la superficie de nuestro planeta sea única se han unido para crear la vida.

La vida es extraordinaria. Ya hemos descubierto el asombroso sentido de magnetorecepción que posee la hembra de petirrojo, pero esta habilidad especial es solo una de sus muchas y variadas habilidades. La hembra de petirrojo puede ver, oler y oír, o capturar moscas; puede saltar sobre el suelo o entre las ramas de un árbol; y puede elevarse en el aire y volar a lo largo de centenares de kilómetros. Y lo que es más increíble, puede, con un poco de ayuda de su pareja, producir toda una pollada de animales semejantes a ella a partir de los mismos materiales que constituyen todas estas rocas. Y nuestro petirrojo es solo uno de los billones de organismos vivos que son capaces de realizar docenas de estas hazañas y otras igualmente desconcertantes.

Otro organismo notable es, desde luego, el lector. Si levanta la vista hacia el cielo nocturno, fotones de luz entran en sus ojos, que el tejido retiniano transforma en minúsculas corrientes eléctricas que se desplazan a lo largo de sus nervios ópticos para alcanzar el tejido nervioso de su cerebro. Allí generan un patrón intermitente de disparos nerviosos que el lector experimenta como la estrella parpadeante en el cielo que hay sobre su cabeza. Al mismo tiempo, el tejido de células pilosas de su oído interno registra minúsculas variaciones de presión de menos de una milmillonésima de la presión atmosférica, lo que genera señales del nervio auditivo que informan al lector de que el viento está soplando entre los árboles. Unos receptores olfativos especializados captan unas cuantas moléculas que entran flotando en la nariz y le transmiten su identidad química al cerebro, lo que informa al lector de que es verano y la madreselva florece. Y la acción coordinada de cientos de músculos genera cada minúsculo movimiento del cuerpo del lector, mientras contempla las estrellas, escucha el viento y olfatea el aire.

Pero, por extraordinarias que sean, las hazañas físicas que realiza el tejido de nuestro propio cuerpo palidecen en comparación con las que ejecutan muchos de

los seres vivos que nos rodean. La hormiga cortadora de hojas puede transportar una carga que pesa treinta veces su propio peso, lo que equivaldría a que una persona transportara un automóvil auestas. Y la hormiga de mandíbulas de resorte puede acelerar sus mandíbulas desde cero hasta doscientos treinta kilómetros por hora en solo 0,13 milisegundos, mientras que un coche de carreras de Fórmula 1 tarda unas cuarenta mil veces más (alrededor de cinco segundos) en alcanzar la misma velocidad. La anguila eléctrica del Amazonas puede generar seiscientos voltios de electricidad potencialmente letal. Las aves pueden volar, los peces pueden nadar, los gusanos pueden excavar y los monos pueden balancearse entre los árboles. Y, como ya hemos descubierto, muchos animales, entre ellos nuestro petirrojo, pueden encontrar su ruta a lo largo de miles de kilómetros utilizando el campo magnético de la Tierra. Mientras tanto, en capacidad biosintética, nada rivaliza con la variedad verde de la vida en la Tierra, que combina moléculas de aire y agua (más unos pocos minerales) para producir hierba, robles, algas, dientes de león, secuoyas y líquenes.

Todos los seres vivos tienen sus habilidades y especialidades particulares, como la magnetocepción del petirrojo o el rápido chasquido de la hormiga de mandíbulas de resorte, pero existe un órgano humano cuyo desempeño no tiene rival. La capacidad de cómputo del material gris y carnoso que se halla encerrado en nuestro cráneo óseo supera la de cualquier ordenador del planeta, y ha creado las pirámides, la teoría de la relatividad general, *El lago de los cisnes*, el *Rigveda*, *Hamlet*, la porcelana Ming y el pato Donald. Y, lo que quizás es lo más notable de todo, el cerebro humano posee la capacidad de saber que existe.

Pero toda esta diversidad de materia viva, con sus numerosísimas formas e infinita variedad de funciones, está constituida prácticamente por los mismos átomos que los que se encuentran en fragmentos de condritas marcianas.

La más importante de las preguntas de la ciencia, y que es fundamental en este libro, es cómo los átomos y moléculas inertes que se encuentran en las rocas se transforman cada día en materia viva que corre, salta, vuela, navega, nada, crece, ama, odia, desea, teme, piensa, ríe y llora. La familiaridad hace que esta transformación extraordinaria no tenga nada de especial, pero vale la pena recordar que, ni tan solo en esta época de ingeniería genética y de biología sintética, los humanos no han creado nada vivo partiendo completamente de materiales no vivos. El que nuestra tecnología haya fracasado hasta ahora a la hora de conseguir una transformación que ejecuta sin esfuerzo incluso el microbio más sencillo de nuestro planeta sugiere que nuestro conocimiento de lo que hace falta para producir la vida es incompleto. ¿Acaso hemos pasado por

alto alguna chispa vital que anima a lo vivo y se halla ausente de lo no vivo?

Esto no quiere decir que vayamos a afirmar que algún tipo de fuerza vital, espíritu o ingrediente mágico anima la vida. Nuestro relato es mucho más interesante que esto. Lo que haremos será explorar investigaciones recientes que demuestran que al menos una de las piezas que faltan en el rompecabezas de la vida se encuentra en el mundo de la mecánica cuántica, en el que los objetos pueden hallarse en dos lugares a la vez, poseen conexiones fantasmales y atraviesan barreras aparentemente impenetrables. La vida parece tener un pie en el mundo clásico de los objetos cotidianos y el otro plantado en las extrañas y peculiares profundidades del mundo cuántico. La vida, según razonaremos, vive en el límite cuántico.

Pero ¿pueden los animales, las plantas y los microbios estar regidos realmente por leyes de la naturaleza que hasta ahora hemos creído que solo describían el comportamiento de las partículas fundamentales? Es evidente que los seres vivos, constituidos por billones de partículas, son objetos macroscópicos que, como los balones de fútbol, los automóviles o los trenes de vapor, pueden describirse de la manera adecuada mediante reglas clásicas, como las leyes mecánicas de Newton o la ciencia de la termodinámica. Para descubrir por qué necesitamos el mundo oculto de la mecánica cuántica para explicar las fenomenales propiedades de la materia viva, primero necesitamos embarcarnos en un breve recorrido por los esfuerzos de la ciencia para comprender qué es lo que hace la vida tan especial.

#### LA «FUERZA VITAL»

El enigma fundamental de la vida es este: ¿por qué la materia se comporta de manera tan diferente cuando constituye un ser vivo, en comparación con cuando es una roca? Los antiguos griegos figuran entre las primeras personas que intentaron sondear esta cuestión. El filósofo Aristóteles, quien tal vez fuera el primer gran científico del mundo, identificó correctamente determinadas propiedades de la materia inanimada que eran fiables y predecibles; por ejemplo, la tendencia de los objetos sólidos a caer, mientras que el fuego y los vapores tienden a elevarse y los objetos celestes tienden a moverse en rutas circulares alrededor de la Tierra. Pero la vida era diferente: aunque muchos animales caían, también corrían; las plantas crecían hacia arriba y las aves incluso volaban alrededor de la Tierra. ¿Qué los hacía tan diferentes del resto del mundo? Uno de los primeros pensadores griegos, Sócrates, sugirió una respuesta, y su discípulo,

Platón, la registró: «¿Qué es lo que, cuando está presente en un cuerpo, hace que viva? Un alma». Aristóteles estaba de acuerdo con Sócrates en que los seres vivos poseían alma, pero afirmaba que esta se presentaba en grados diferentes. Los grados inferiores eran los que habitaban en las plantas, que les permitían crecer y obtener alimento; las almas de los animales, situadas un peldaño más arriba, dotaban a sus poseedores de sensaciones y movimiento; pero solo el alma humana confería razón e intelecto. Los antiguos chinos creían de manera parecida que los seres vivos estaban animados por una fuerza vital incorpórea llamada Qi (pronúnciese *chi* ) que fluía a su través. Más tarde, el concepto de alma se incorporó a todas las principales religiones del mundo; pero su naturaleza y su conexión con el cuerpo seguían siendo misteriosas.

Otro enigma era la mortalidad. Por lo general se creía que las almas eran inmortales; pero entonces, ¿por qué es efímera la vida? La respuesta a la que llegaron la mayoría de las culturas era que la muerte venía acompañada por la salida del alma del cuerpo. En una fecha tan tardía como 1907, el médico estadounidense Duncan MacDougall afirmaba poder medir el alma pesando a sus pacientes agonizantes inmediatamente antes y después de la muerte. Sus experimentos lo convencieron de que el alma pesaba veintiún gramos. Pero seguía siendo un enigma la razón por la que el alma tenía que abandonar el cuerpo después de los setenta años asignados.

El concepto de alma, aunque ya no forma parte de la ciencia moderna, al menos separó el estudio de lo no vivo del estudio de lo vivo, lo que permitió a los científicos investigar las causas del movimiento de los objetos inanimados sin tener que preocuparse por las cuestiones de filosofía y teología que fastidiaban cualquier estudio de animales vivos. La historia del estudio del concepto de movimiento es larga, complicada y fascinante, pero en este capítulo solo guiaremos al lector por el más breve de los recorridos. Ya hemos mencionado la opinión de Aristóteles de que los objetos tienden a moverse hacia la Tierra, lejos de la Tierra o alrededor de la Tierra. Todos esos movimientos los consideraba naturales. También reconoció que los objetos sólidos podían ser empujados, halados y lanzados; a todos esos movimientos los calificó de «violentos» y consideró que los iniciaba algún tipo de fuerza proporcionado por otro objeto, como la persona que lanzaba. Pero ¿qué producía el movimiento de lanzamiento, o el vuelo de un ave? No parecía haber una causa externa. Aristóteles afirmaba que los seres vivos, a diferencia de los objetos inanimados, eran capaces de iniciar su propio movimiento, y que en este caso la causa de dicho movimiento era el alma del animal.



Las ideas de Aristóteles acerca de los orígenes del movimiento fueron predominantes hasta la Edad Media; pero entonces ocurrió algo notable. Los científicos (que en aquella época se habrían descrito a sí mismos como filósofos naturales) empezaron a expresar teorías acerca del movimiento de objetos inanimados en el lenguaje de la lógica y las matemáticas. Se podría discutir acerca de quién fue responsable de este giro extraordinariamente productivo en el pensamiento humano; eruditos medievales árabes y persas, como Alhacén y Avicena, desempeñaron ciertamente un papel relevante, y la tendencia continuó después en las nacientes instituciones sabias de Europa, como las universidades de París y Oxford. Pero esta manera de describir el mundo dio probablemente su primer gran fruto en la Universidad de Padua, en Italia, donde Galileo consagró leyes sencillas del movimiento en fórmulas matemáticas. En 1642, el mismo año en que Galileo murió, nació Isaac Newton en Lincolnshire, en Inglaterra. Newton acabó por proporcionar una descripción matemática extraordinariamente exitosa de cómo el movimiento de objetos inanimados podía ser cambiado por fuerzas, un sistema que hasta el presente se denomina mecánica newtoniana.

Las fuerzas de Newton fueron, en un primer momento, ideas bastante misteriosas, pero a lo largo de los siglos siguientes se identificaron cada vez más con el concepto de «energía». Se decía que los objetos que se movían poseían energía que podía transferirse a los objetos estacionarios contra los que chocaban y que hacían que se movieran. Pero las fuerzas podían transmitirse también remotamente entre objetos: ejemplos de estas eran la fuerza gravitatoria de la Tierra, que hizo caer la manzana de Newton al suelo, o las fuerzas magnéticas que desviaban las agujas de las brújulas.

Los increíbles avances científicos que iniciaron Galileo y Newton se aceleraron en el siglo XVIII, y al final del siglo XIX ya se había establecido prácticamente el marco básico de lo que llegó a conocerse como «física clásica». Por esta época se sabía que otras formas de energía, como el calor y la luz, eran también capaces de interactuar con los constituyentes de la materia, átomos y moléculas, y provocaban que se hicieran más calientes, que emitieran luz o que cambiaran de color. Se consideraba que los objetos estaban compuestos por partículas cuyo movimiento estaba controlado por las fuerzas de la gravedad o del electromagnetismo. \* De modo que el mundo material, o al menos los objetos inanimados que hay en él, se dividió en dos entidades distintas: la materia visible, compuesta de partículas, y las fuerzas invisibles que actuaban entre ellas de una manera todavía poco conocida, ya fuera como ondas de energía que se propagaban por el espacio o en términos de campos de fuerza. Pero ¿qué ocurría

con la materia animada que constituía los organismos vivos? ¿De qué estaba hecha y cómo se movía?

#### EL TRIUNFO DE LAS MÁQUINAS

La antigua idea de que todos los seres vivos estaban animados por algún tipo de sustancia o entidad sobrenatural proporcionaba al menos algún tipo de explicación para las notables diferencias entre lo vivo y lo no vivo. La vida era diferente porque era animada por un alma espiritual y no por ninguna de estas fuerzas mecánicas mundanas. Pero esta era siempre una explicación insatisfactoria, pues equivalía a explicar el movimiento del Sol, la Luna y las estrellas diciendo que eran empujados por ángeles. En realidad, no había una explicación real, pues la naturaleza de las almas (y de los ángeles) seguía siendo un misterio total.

En el siglo XVII, el filósofo francés René Descartes proporcionó una hipótesis alternativa radical. Le habían impresionado los relojes, los juguetes mecánicos y los muñecos autómatas que proporcionaban diversión a las cortes europeas de la época, y se inspiró en sus mecanismos para efectuar la revolucionaria afirmación de que los cuerpos de plantas y animales, incluido el cuerpo de los humanos, eran simplemente máquinas complejas compuestas de materiales convencionales y animadas por dispositivos mecánicos tales como bombas, ruedas dentadas, pistones y levas que, a su vez, estaban sometidos a las mismas fuerzas que regían el movimiento de la materia inanimada. Descartes eximió a la mente humana de su visión mecanicista, y la dejó con un alma inmortal; pero su filosofía intentó al menos proporcionar un marco científico que explicara la vida en términos de las leyes físicas que se estaba descubriendo que regían los objetos inanimados.

La aproximación biológica mecanicista la continuó un casi contemporáneo de sir Isaac Newton, el médico William Harvey, quien descubrió que el corazón no era más que una bomba mecánica. Un siglo más tarde, el químico francés Antoine Lavoisier demostró que un conejillo de Indias que respira consume oxígeno y genera dióxido de carbono, exactamente igual que el fuego que proporcionaba la fuerza motriz de la nueva tecnología de las máquinas de vapor. En consecuencia, concluyó que «la respiración es pues un fenómeno de combustión muy lento, muy similar a la del carbón». Tal como Descartes podía haber predicho, los animales no parecían ser muy diferentes de las locomotoras que funcionaban con carbón y que pronto habrían de arrastrar la revolución industrial por toda Europa.

Pero ¿acaso las fuerzas que mueven los trenes de vapor pueden también mover la vida? Para dar respuesta a esta pregunta hemos de entender de qué manera los trenes de vapor suben las cuestas.

#### UNA MESA DE BILLAR MOLECULAR

La ciencia que trata de la manera en que el calor interactúa con la materia se denomina «termodinámica»; y su idea clave la proporcionó el físico austríaco del siglo XIX Ludwig Boltzmann, quien dio el atrevido paso de tratar las partículas de materia como si fueran una enorme cantidad de bolas de billar que colisionaban entre sí al azar y obedecían las leyes de Newton.

Imagine el lector la superficie de una mesa de billar <sup>\*</sup> dividida en dos mitades por una vara móvil. Todas las bolas, incluida la pinta, se hallan a la izquierda de la vara, y el conjunto está perfectamente dispuesto en un triángulo. Ahora imagine el lector que lanza con fuerza la bola pinta contra las demás bolas, de manera que estas salen disparadas en todas direcciones y con movimientos rápidos, y colisionan entre sí. Considere ahora lo que le ocurre a la vara: estará sometida a la fuerza de muchas colisiones procedentes de la izquierda, que es donde se encuentran todas las bolas, pero a ninguna colisión procedente del lado vacío de la mesa, a la derecha. A pesar de que el movimiento de las bolas es totalmente aleatorio, la vara, impulsada por todas estas bolas que se mueven al azar, experimentará una fuerza promedio que la empujará hacia la derecha, con lo que el área de juego a la izquierda se ampliará y la vacía de la derecha se reducirá. Podemos imaginar además que aparejamos nuestra mesa de billar para que haga algún trabajo, construyendo un artilugio de palancas y poleas que capten el movimiento de la vara hacia la derecha y lo redirijan, por ejemplo, para hacer que un tren de juguete suba una cuesta de juguete.

Esta, pensó Boltzmann, es en esencia la manera en que las máquinas de vapor impulsan a las locomotoras de vapor reales (recuerde el lector que esta era la época del vapor) para que suban por cuestas reales. Las moléculas de agua dentro del cilindro del motor de vapor se comportan de manera muy parecida a las bolas de billar después de que el impacto de la pinta las haya dispersado: el calor de la caldera acelera su movimiento aleatorio, de modo que las moléculas chocan entre sí y con el pistón del motor, de manera más enérgica, y empujan al pistón hacia fuera para que impulse los ejes, los mecanismos, las cadenas y las ruedas del tren de vapor y, con ello, produzca un movimiento directo. Más de un siglo después de Boltzmann, nuestros automóviles impulsados por gasolina

funcionan precisamente por los mismos principios, pero en la actualidad los productos de la combustión de la gasolina sustituyen al vapor.

Un aspecto notable de la ciencia de la termodinámica es que esto es en realidad todo lo que hay. El movimiento ordenado de cada máquina de vapor que se haya construido se consigue controlando el movimiento promedio de billones de átomos y moléculas que se mueven de manera aleatoria. No solo esto, sino que además la ciencia es extraordinariamente general, aplicable no solo a las máquinas de vapor, sino también a casi toda la química estándar que tiene lugar siempre que quemamos carbón al aire, dejamos que un clavo de hierro se oxide, cocinamos una comida, fabricamos acero, disolvemos sal en agua, hacemos hervir una cafetera o enviamos un cohete a la Luna. Todos estos procesos químicos implican el intercambio de calor y, a un nivel molecular, todos están impulsados por principios termodinámicos que se basan en el movimiento aleatorio. De hecho, casi todos los procesos no biológicos (físicos y químicos) que causan cambios en nuestro mundo están causados por principios termodinámicos. Las corrientes oceánicas, las tempestades violentas, la meteorización de las rocas, los incendios forestales y la corrosión de los metales están todos controlados por las inexorables fuerzas del caos que socazan la termodinámica. Cada proceso complejo nos puede parecer estructurado y ordenado, pero en su fundamento todos están impulsados por movimientos moleculares aleatorios.

#### ¿LA VIDA COMO CAOS?

Entonces, ¿acaso lo mismo es válido para la vida? Volvamos a nuestra mesa de billar, pero al principio del juego, cuando todas las bolas estaban situadas en un triángulo perfecto. Esta vez añadiremos también un gran número de bolas adicionales (imaginemos que se trata de una mesa muy grande) y dispondremos las cosas para que choquen con violencia alrededor del triángulo de las bolas originales. De nuevo, el movimiento aleatorio de la vara que divide la mesa, producido por las colisiones, se aprovechará para que realice trabajo útil; pero en lugar de limitarnos a dejar que accione un tren de juguete cuesta arriba, construiremos un dispositivo todavía más ingenioso. Esta vez, nuestra máquina accionada por el movimiento, impelida por el choque caótico de todas estas bolas, hará algo bastante especial: mantendrá el triángulo perfecto de las bolas originales en medio de todo el caos. Cada vez que una de las bolas que se mueven al azar desplaza a una de las bolas del grupo triangular, algún tipo de

dispositivo sensor detecta el suceso y dirige un brazo mecánico que sustituye la bola que falta en el triángulo (quizá llenando un hueco en uno de sus ángulos) por una bola idéntica, extraída de entre todas las bolas que chocan al azar.

Esperamos que el lector vea que el sistema está usando ahora parte de la energía que todas estas colisiones moleculares producen para mantener una parte de este en un estado muy ordenado. En termodinámica, se utiliza el término «entropía» para describir la falta de orden, de manera que se dice que los estados muy ordenados tienen una baja entropía. Puede decirse que nuestra mesa de billar extrae energía de las colisiones de elevada entropía (caóticas) para mantener parte de sí misma, el triángulo de bolas situado en medio, en un estado de baja entropía (ordenado).

De momento no importa cómo podemos construir un dispositivo tan complicado: el punto clave es que nuestra mesa de billar accionada por entropía está haciendo algo muy interesante. Con solo el movimiento caótico de las bolas con el que operar, este nuevo sistema de bolas, mesa, vara, dispositivo de detección de las bolas y brazo móvil es capaz de mantener el orden en un subsistema de sí mismo.

Imaginemos ahora otro nivel de refinamiento: esta vez, parte de la energía disponible de la vara móvil (a la que podríamos denominar la «energía libre» \* del sistema) se usa para construir y mantener el dispositivo sensorial y el brazo móvil e incluso para utilizar gran cantidad de bolas de billar como materia prima para construir, en primer lugar, estos dispositivos. Ahora todo el sistema es autosostenible y, en principio, podrá mantenerse de manera indefinida, siempre y cuando se le suministren gran cantidad de bolas que se desplazan al azar y suficiente espacio para que la vara se mueva.

Por último, además de mantenerse a sí mismo, este sistema extendido logrará un hecho adicional y sorprendente: utilizará la energía libre disponible para detectar, captar y organizar las bolas de billar para hacer una copia de sí mismo en su totalidad: la mesa, la vara, el dispositivo de detección de bolas y el brazo móvil, así como el triángulo de bolas. Y estas copias serán asimismo capaces de domeñar sus bolas de billar y la energía libre disponible de sus colisiones para producir más de estos dispositivos autosostenibles. Y estas copias...

Bien, el lector ya habrá adivinado adónde conduce esto. Nuestro imaginario proyecto «hágalo usted mismo» ha construido un equivalente de la vida accionado por bolas de billar. Al igual que un pájaro, un pez o un humano, nuestro dispositivo imaginario es capaz de mantenerse y de replicarse captando energía libre procedente de colisiones moleculares aleatorias. Y aunque esta es

una tarea compleja y difícil, por lo general se considera que su fuerza motriz es exactamente la misma que la utilizada para hacer que los trenes de vapor suban cuestas. En la vida cotidiana, las bolas de billar son sustituidas por las moléculas que se obtienen del alimento, pero aunque el proceso es mucho más complejo que el que se ha descrito en nuestro ejemplo simple, el principio es el mismo: la energía libre extraída de colisiones moleculares aleatorias (y sus reacciones químicas) se dirige a mantener un cuerpo y hacer una copia de este.

Así pues, ¿acaso es la vida una rama de la termodinámica? Cuando salimos de excursión, ¿subimos las cuestas mediante el mismo proceso que impulsa a las locomotoras de vapor? Y el vuelo del petirrojo, ¿no es acaso tan diferente del de una bala de cañón? Cuando vamos a lo esencial, ¿es la chispa vital de la vida solo movimiento molecular aleatorio? Para dar respuesta a esta pregunta necesitamos echar un vistazo más detenido a la estructura fina de lo vivo.

#### MIRAR LA VIDA CON MAYOR DETENIMIENTO

El principal avance importante en el descubrimiento de la estructura fina de la vida lo proporcionó el «filósofo natural» del siglo XVII Robert Hooke, quien observó a través de su microscopio rudimentario lo que denominó «celdas» \* en secciones finas de corcho, y el microscopista holandés Anton van Leeuwenhoek, quien identificó lo que llamó «animálculos» (que ahora llamamos seres unicelulares) en gotas de agua de charcas. También observó células vegetales, glóbulos rojos de la sangre e incluso espermatozoides. Más tarde se comprendió que todos los tejidos vivos estaban divididos en estas unidades celulares, que son las piezas fundamentales de los seres vivos. En 1858, el médico y biólogo alemán Rudolf Virchow escribió:

Así como un árbol constituye una masa dispuesta de una manera definida, en el que en cada parte concreta, tanto en las hojas como en la raíz, tanto en el tronco como en la flor, se ha descubierto que las células son los elementos últimos, tal ocurre con las formas de vida animal. Cada animal se presenta como una suma de entidades vitales, cada una de las cuales manifiesta todas las características de la vida.

A medida que las células se estudiaban cada vez con mayor detalle mediante microscopios cada vez más potentes, se revelaba que su estructura interna era muy compleja. Cada célula posee un núcleo en el centro lleno de cromosomas y rodeado por el citoplasma, en el que hay incrustadas subunidades especializadas denominadas orgánulos, que, como los órganos de nuestro cuerpo, realizan funciones concretas dentro de la célula. Por ejemplo, unos orgánulos, las mitocondrias, efectúan la respiración dentro de las células humanas, \* mientras

que los orgánulos llamados cloroplastos realizan la fotosíntesis dentro de las células vegetales. En su conjunto, la célula da la impresión de ser una atareada fábrica en miniatura. Pero ¿qué la hace funcionar? ¿Qué es lo que anima la célula? Al principio se creía de manera general que las células estaban llenas de fuerzas «vitales», que en lo esencial equivalían al concepto de alma de Aristóteles; y durante gran parte del siglo XIX persistió la creencia en el vitalismo, es decir, en que los seres vivos están animados por una fuerza que está ausente en los no vivos. Se creía que las células estaban llenas de una misteriosa sustancia viva denominada protoplasma, que se describía en términos casi místicos.

Pero el vitalismo se debilitó debido al trabajo de varios científicos en el siglo XIX, que pudieron aislar de células vivas sustancias químicas que eran idénticas a las sintetizadas en el laboratorio. Por ejemplo, en 1828, el químico alemán Friedrich Wöhler consiguió sintetizar urea, una molécula bioquímica que previamente se había creído que era peculiar de las células vivas. Louis Pasteur logró incluso reproducir transformaciones químicas, como la fermentación, que antes se creía que era única de la vida, utilizando extractos de células vivas (que más tarde se denominaron enzimas). Cada vez más, la materia de lo vivo resultaba estar constituida exactamente por las mismas sustancias químicas que formaban la no viva, y por lo tanto era probable que estuviera regida por la misma química. De manera gradual, el vitalismo dio paso al mecanicismo.

A finales del siglo XIX se había producido el triunfo total de los bioquímicos sobre los vitalistas. \* Se consideraba que las células eran bolsas de sustancias bioquímicas operadas por una química compleja, pero una química que no obstante se basaba en el movimiento aleatorio del tipo de las bolas de billar que había descrito Boltzmann. La vida, se creía de manera general, no era de hecho más que termodinámica compleja.

Excepto por un aspecto, que puede decirse que era el más importante de todos.

## GENES

La capacidad de los organismos vivos de transmitir de manera fidedigna las instrucciones para producir una copia de sí mismos (ya se trate de un petirrojo, de un rododendro o de una persona) fue, durante siglos, un absoluto misterio. En su «51.<sup>a</sup> ejercitación», de 1653, el cirujano inglés William Harvey escribió:

Aunque es una cosa conocida, suscrita por todos, que el feto asume su origen y nacimiento a partir del macho y la hembra, y en consecuencia que el huevo es producido por el gallo y la gallina y el pollo sale

del huevo, sin embargo ninguna de las escuelas de médicos ni el perspicaz cerebro de Aristóteles han revelado la manera en que el gallo y su simiente troquelan y acuñan el pollo que sale del huevo.

Parte de la respuesta la proporcionó dos siglos más tarde el monje y botánico austríaco Gregor Mendel, quien hacia 1850 cultivaba guisantes en el huerto de la abadía agustina de Brno. Sus observaciones le llevaron a proponer que rasgos tales como el color de la flor o la forma del guisante eran controlados por «factores» heredables que podían transmitirse, sin cambios, de una generación a la siguiente. Los «factores» de Mendel proporcionaban, por lo tanto, un depósito de información heredable que permitía a los guisantes conservar su carácter durante cientos de generaciones... y mediante estos «el gallo y su simiente troquelan y acuñan el pollo que sale del huevo».

Es conocido que la obra de Mendel pasó desapercibida a la mayoría de sus contemporáneos, incluido Darwin, y no se redescubrió hasta principios del siglo xx . Sus factores se rebautizaron como «genes» y no tardaron en incorporarse al creciente consenso mecanicista de la biología del siglo xx . Pero aunque Mendel había demostrado que dichas entidades tenían que existir dentro de las células vivas, nadie las había visto ni sabía de qué estaban compuestas. Sin embargo, en 1902 el genetista estadounidense Walter Sutton advirtió que unas estructuras intracelulares denominadas cromosomas tendían a seguir la herencia de factores mendelianos, lo que le llevó a proponer que los genes estaban situados en los cromosomas.

Pero los cromosomas son estructuras grandes (hablando en términos relativos) y complicadas compuestas por proteínas, azúcares y una sustancia bioquímica denominada ácido desoxirribonucleico, o ADN. Al principio no estaba claro cuál de estos componentes era responsable de la herencia, suponiendo que alguno lo fuera. Después, en 1943, el científico canadiense Oswald Avery consiguió transferir un gen de una célula bacteriana a otra extrayendo ADN de la célula donante e inyectándolo en la célula receptora. El experimento demostró que lo que portaba toda la información genética no eran ni las proteínas ni las sustancias bioquímicas, sino el ADN de los cromosomas. \* No obstante, no parecía que el ADN tuviera nada de mágico; en aquel momento se consideraba solo una molécula química ordinaria.

Aun así, la pregunta seguía planteada: ¿cómo funcionaba todo esto? ¿Cómo transmite una sustancia química la información necesaria para proporcionar «la manera en que el gallo y su simiente troquelan y acuñan el pollo que sale del huevo»? ¿Cómo se copiaban y replicaban los genes de una generación a la siguiente? La química convencional, impulsada por aquellas moléculas parecidas



a bolas, simplemente no parecía ser capaz de proporcionar los medios para almacenar, copiar y transmitir con precisión la información genética.

Es sabido que la respuesta se obtuvo en 1953, cuando James Watson y Francis Crick, que trabajaban en los laboratorios Cavendish, en Cambridge, consiguieron encajar una notable estructura a los datos experimentales que su colega Rosalind Franklin había obtenido del ADN: la doble hélice. Se encontró que cada hebra de ADN era una especie de cordel molecular constituido por átomos de fósforo, oxígeno y un azúcar llamado desoxirribosa, y a lo largo de dicho cordel se situaban a intervalos, como cuentas, unas estructuras químicas llamadas nucleótidos. <sup>\*\*</sup> Estas cuentas de nucleótidos aparecen en cuatro variedades: adenina (A), guanina (G), citosina (C) y timina (T), de modo que su disposición a lo largo de la hebra de ADN proporciona una secuencia unidimensional de letras genéticas tal como esta: «GTCCATTGCCCGTATTACCG». Francis Crick había pasado los años de la guerra trabajando para el Almirantazgo (la autoridad responsable del mando de la Armada Real), de manera que cabe suponer que estaba familiarizado con los códigos, como los que producían las máquinas alemanas Enigma que se estaban descifrando en Bletchley Park. En cualquier caso, cuando vio la hebra de ADN la reconoció inmediatamente como un código, una secuencia de información que proporcionaba las instrucciones cruciales de la herencia. Y, como descubriremos en el capítulo 7, la identificación de la hebra en doble hélice del ADN también resolvió el problema de cómo se copia la información genética. De un solo golpe se habían resuelto dos de los mayores misterios de la ciencia.

El descubrimiento de la estructura del ADN proporcionó una llave mecanicista que abría el misterio de los genes. Estos son sustancias químicas, y la química es solo termodinámica; así pues, ¿acaso el descubrimiento de la doble hélice puso a la vida, finalmente y de manera total, en el ámbito de la ciencia clásica?

#### LA CURIOSA SONRISA DE LA VIDA

En *Alicia en el país de las maravillas*, de Lewis Carroll, el gato de Cheshire tiene la costumbre de desaparecer, dejando solo su sonrisa, lo que lleva a Alicia a señalar que «a menudo ha visto un gato sin sonrisa, pero nunca una sonrisa sin un gato». Muchos biólogos experimentan una confusión parecida cuando, a pesar de saber de qué manera la termodinámica opera en las células vivas y cómo los genes codifican todo lo que se requiere para formar una célula, el misterio de lo que es realmente la vida continúa sonriéndoles.

Un problema es la enorme complejidad de las reacciones bioquímicas que tienen lugar en el interior de cada célula viva. Cuando los químicos producen artificialmente un aminoácido o un azúcar, casi siempre sintetizan un único producto cada vez, cosa que consiguen al controlar de manera cuidadosa las condiciones experimentales para la reacción seleccionada, como la temperatura y las concentraciones de los diversos ingredientes, con el fin de optimizar la síntesis del compuesto objetivo. Esta no es una tarea fácil, y requiere el control de muchas condiciones diferentes dentro de matraces, condensadores, columnas de separación, dispositivos de filtración y otros aparatos químicos complicados y específicos para dichas reacciones químicas. Pero cada célula viva de nuestro cuerpo sintetiza continuamente miles de sustancias bioquímicas distintas en el interior de una cámara de reacción llena de solo unas pocas millonésimas de microlitro de líquido. \* ¿Cómo se producen a la vez todas estas diversas reacciones? ¿Cómo se orchestra toda esta acción molecular en el interior de una célula microscópica? Estas preguntas son el meollo de la nueva ciencia de la biología de sistemas; pero es justo decir que las respuestas siguen siendo misteriosas.

Otro enigma de la vida es la mortalidad. Una característica de las reacciones químicas es que siempre son reversibles. Podemos escribir una reacción química en la dirección sustratos → productos. Pero, en realidad, la reacción inversa, en la dirección producto → sustrato, siempre se está dando de manera simultánea. Lo que ocurre es que, bajo un conjunto dado de condiciones, tiende a dominar una dirección. Sin embargo, siempre es posible encontrar otro conjunto de condiciones que favorezca la dirección química inversa. Por ejemplo, cuando los combustibles fósiles se queman en el aire, los sustratos son carbono y oxígeno, y el único producto es dióxido de carbono, un gas de invernadero. Por lo general se considera que esta es una reacción irreversible; pero algunas formas de tecnología de captación de carbono están trabajando para invertir este proceso mediante la utilización de una fuente de energía para hacer que la reacción se invierta. Por ejemplo, Rich Masel, de la Universidad de Illinois, ha establecido una compañía, Dioxide Materials, cuyo objetivo es usar la electricidad para convertir el dióxido de carbono atmosférico en combustible para vehículos. <sup>1</sup>

La vida es diferente. Nadie ha descubierto todavía una condición que favorezca la dirección célula muerta → célula viva. Este, desde luego, fue el enigma que propició que nuestros antepasados tuvieran la idea de un alma. Ya no creemos que una célula posea ningún tipo de alma; pero, entonces, ¿qué es lo que se pierde de manera irrevocable cuando una célula o una persona mueren?

Llegados a este punto, el lector puede estar pensando: «¿Y qué hay de esta ciencia que se acaba de anunciar de la biología sintética?». A buen seguro, quienes practican dicha ciencia deben de poseer la clave del misterio de la vida. Probablemente, el practicante más famoso de la biología sintética es Craig Venter, pionero de la secuenciación del genoma, quien en 2010 conjuró una tormenta científica cuando afirmó haber creado vida artificial. Su trabajo apareció en titulares de todo el mundo y desencadenó temores de que unas nuevas razas de criaturas creadas artificialmente se apoderarían del planeta. Pero Venter y su equipo solo consiguieron modificar una forma de vida ya existente, en lugar de crear realmente nueva vida. Lo hicieron sintetizando primero el ADN que codifica todo el genoma de un patógeno bacteriano, *Mycoplasma mycoides*, que causa una enfermedad en las cabras. Después inyectaron su genoma de ADN sintetizado en una célula bacteriana viva y, de manera muy ingeniosa, consiguieron que sustituyera su cromosoma original (y único) por su versión sintética.

Sin duda, este trabajo fue un *tour de force* técnico. El cromosoma bacteriano contiene 1,8 millones de letras genéticas, todas las cuales tuvieron que enhebrarse en la secuencia precisamente correcta. Pero, en esencia, lo que los científicos habían hecho era efectuar la misma transformación que todos nosotros conseguimos realizar sin esfuerzo cuando convertimos las sustancias químicas inertes de nuestro alimento en nuestra propia carne viva.

La síntesis e inserción que Venter y su equipo llevaron a cabo con éxito de un cromosoma bacteriano sustituto abre todo un nuevo campo de la biología sintética que volveremos a visitar en el capítulo final. Es probable que conlleve maneras más eficientes de producir medicinas, cultivar plantas o destruir contaminantes. Pero en estos experimentos y en otros similares, los científicos no han creado nueva vida. A pesar del logro de Venter, el misterio esencial de la vida continúa sonriéndonos. Se dice del físico Richard Feynman, que obtuvo un premio Nobel, que insistía en que «lo que no podemos hacer, no lo entendemos». Según esta definición, no comprendemos la vida porque todavía no hemos conseguido crearla. Podemos mezclar sustancias bioquímicas, podemos caldearlas, podemos irradiarlas y podemos, al igual que el Frankenstein de Mary Shelley, utilizar electricidad para animarla; pero la única manera en que podemos producir vida es inyectando estas sustancias bioquímicas en células que ya están vivas, o comiéndonoslas, con lo que conseguimos transformarlas en parte de nuestro propio cuerpo.

Así pues, ¿cómo es que todavía somos incapaces de realizar un truco que

ejecutan sin esfuerzo cada segundo billones de los más humildes microbios? ¿Acaso estamos pasando por alto algún ingrediente? Esta es la pregunta acerca de la cual un famoso físico, Erwin Schrödinger, meditó hace más de setenta años; y su respuesta, muy sorprendente, es fundamental para el asunto de este libro. Para comprender por qué la solución de Schrödinger a los más profundos misterios de la vida era y continúa siendo tan revolucionaria hemos de retornar a los inicios del siglo xx , antes del descubrimiento de la doble hélice, cuando se estaba poniendo patas arriba el mundo de la física.

## LA REVOLUCIÓN CUÁNTICA

La explosión del saber científico durante la Ilustración de los siglos XVIII y XIX produjo la mecánica newtoniana, el electromagnetismo y la termodinámica, y demostró que, juntas, estas tres áreas de la física describían de la manera adecuada el movimiento y el comportamiento de todos los objetos y fenómenos macroscópicos cotidianos de nuestro mundo, de las balas de cañón a los relojes, de las tormentas a los trenes de vapor, de los péndulos a los planetas. Pero a finales del siglo XIX y principios del XX , cuando los físicos dirigieron su atención a los constituyentes microscópicos de la materia (átomos y moléculas), descubrieron que las leyes familiares ya no eran de aplicación. La física necesitaba una revolución.

El primer avance importante (el concepto del «cuanto») lo hizo el físico alemán Max Planck, quien presentó sus resultados en un seminario de la Sociedad Física Alemana el 14 de diciembre de 1900, una fecha que se considera, de manera habitual, la del nacimiento de la teoría cuántica. En aquella época, la idea general era que la radiación calórica se desplazaba a través del espacio, como otras formas de energía, como una onda. El problema era que la teoría ondulatoria no podía explicar la manera en que determinados objetos calientes radian energía. De modo que Planck propuso la idea radical de que la materia en las paredes de estos cuerpos calientes vibraba a determinadas frecuencias discretas, lo que acarreaba, como consecuencia, que la energía térmica solo se radiaba en minúsculos grumos discretos, o «cuantos», que no podían subdividirse. Su sencilla teoría tuvo un éxito notable, pero se apartaba radicalmente de la teoría clásica de la radiación, en la que se consideraba que la energía era continua. Su teoría sugería que la energía, en lugar de fluir de la materia, como el agua que sale continuamente de un grifo, se presentaba como un conjunto de paquetes separados e indivisibles: como si surgiera de un grifo

que gotea despacio.

Planck nunca se sintió cómodo con la idea de que la energía era grumosa, pero cinco años después de que propusiera su teoría cuántica, Albert Einstein extendió esta idea y sugirió que toda la radiación electromagnética, incluida la luz, está «cuantizada» en lugar de ser continua, y se presenta en paquetes discretos, o partículas, que ahora llamamos fotones. Einstein propuso que esta manera de pensar acerca de la luz podía explicar un enigma que hacía tiempo que existía, conocido como efecto fotoeléctrico, un fenómeno por el cual la luz podía hacer saltar electrones de la materia. Fue este trabajo, y no sus más famosas teorías de la relatividad, lo que le valió a Einstein el premio Nobel en 1921.

Sin embargo también había muchas pruebas de que la luz se comporta como una onda extendida y continua. Pero ¿cómo puede ser la luz a la vez grumosa y ondulante? En aquel entonces esto no parecía tener sentido; al menos, no en el marco de la ciencia clásica.

El siguiente paso de gigante lo dio el físico sueco Niels Bohr, quien en 1912 se fue a Mánchester a trabajar con Ernest Rutherford. Este acababa de proponer su famoso modelo planetario del átomo, que consistía en un núcleo minúsculo y denso en el centro, rodeado de electrones todavía más minúsculos que orbitaban a su alrededor. Pero nadie comprendía cómo era posible que los átomos permanecieran estables. Según la teoría electromagnética estándar, los electrones de carga negativa emitirían energía luminosa de manera constante mientras orbitaban alrededor del núcleo, cargado positivamente. Al hacerlo, perderían energía y, con suma rapidez (en cuestión de una billonésima de segundo), caerían en espiral hacia el núcleo, lo que haría que el átomo se desplomara. Pero los electrones no hacen esto. Así pues, ¿cuál era su truco?

Para explicar la estabilidad de los átomos, Bohr propuso que los electrones no son libres para ocupar cualquier órbita alrededor del núcleo, sino solo algunas órbitas finas («cuantizadas»). Un electrón solo puede descender hasta la siguiente órbita inferior mediante la emisión de un grumo (o cuanto) de energía electromagnética (un fotón) del mismo valor exacto que la diferencia de energías entre las dos órbitas implicadas. Asimismo, solo puede ascender hasta una órbita superior mediante la absorción de un fotón de la energía apropiada.

Una manera de visualizar esta diferencia entre la teoría clásica y la cuántica, y de explicar por qué el electrón ocuparía tan solo determinadas órbitas fijas en el átomo, es comparar cómo se tocan las notas en una guitarra y en un violín. Cuando un violinista toca una nota, presiona un dedo sobre una de las cuerdas a

lo largo del mango del violín para acortar dicha cuerda y obtener de esta manera la nota cuando el arco se arrastra sobre ella, haciendo que vibre. Las cuerdas más cortas vibran a frecuencias altas (muchas vibraciones por segundo) para generar notas altas, mientras que las cuerdas largas vibran a frecuencias bajas (pocas vibraciones por segundo) para generar notas bajas.

Antes de continuar hemos de decir algunas palabras acerca de una de las características fundamentales de la mecánica cuántica, que es la manera en que frecuencia y energía se hallan íntimamente relacionadas. \* Vimos en el capítulo anterior que las partículas subatómicas poseen asimismo propiedades ondulatorias, lo que significa que, como cualquier onda extendida, poseen una longitud de onda y una frecuencia de oscilación asociadas. Las vibraciones u oscilaciones rápidas son siempre más energéticas que las vibraciones lentas. Piense el lector en su secadora de ropa, que debe girar (oscilar) a una frecuencia alta con el fin de poseer la suficiente energía para hacer que el agua salga de la ropa.

Volvamos ahora a nuestro violín. El tono de la nota (su frecuencia de vibración) puede variar de forma continua, en función de la longitud de la cuerda entre su extremo fijo y el dedo del violinista. Esto es equivalente a una onda clásica que pueda adoptar cualquier longitud de onda (la distancia entre picos sucesivos). Por lo tanto, definiremos al violín como un instrumento clásico, no en el sentido de «música clásica», sino en el sentido de física clásica no cuantizada. Desde luego, esta es la razón por la que resulta tan difícil tocar bien el violín, porque el músico tiene que saber de forma precisa dónde colocar su dedo para obtener solo la nota adecuada.

Pero el mástil de una guitarra es diferente; tiene «trastes» a intervalos a lo largo de su longitud; son unas barras de metal espaciadas ligeramente y elevadas sobre el mástil, pero que no tocan las cuerdas que pasan por encima. De modo que cuando un guitarrista coloca su dedo sobre una cuerda, esta se presiona sobre el traste y hace que este, y no el dedo, sea temporalmente un extremo de la cuerda. Cuando la cuerda se pulsa o puntea, el tono de la nota resultante se produce por la vibración de la cuerda únicamente entre el traste y el puente. El número finito de trastes implica que en la guitarra solo se pueden tocar determinadas notas discretas. Ajustar la posición del dedo entre dos trastes no alterará la nota cuando se pulse la cuerda. Así, la guitarra es similar a un instrumento cuántico. Y puesto que, según la teoría cuántica, frecuencia y energía están relacionadas, la cuerda vibrante de la guitarra debe poseer energías discretas, y no continuas. De manera parecida, las partículas fundamentales,

como los electrones, solo pueden estar asociadas a determinadas frecuencias de onda características, cada una asociada con su propio nivel discreto de energía. Cuando un electrón salta de un estado energético a otro, debe absorber o emitir la radiación correspondiente a la diferencia de energía entre el nivel desde el que salta y el nivel al que va a parar.

A partir de mediados de la década de 1920, Bohr, que entonces estaba de nuevo en Copenhague, era uno de varios físicos europeos que trabajaba febrilmente en una teoría matemática más completa y coherente para describir lo que ocurría en el mundo subatómico. Uno de los físicos más brillantes de este grupo era un joven genio alemán, Werner Heisenberg. Mientras se restablecía de un ataque de fiebre del heno en la isla alemana de Helgoland durante el verano de 1925, Heisenberg hizo un progreso importante en la formulación de la nueva matemática que se necesitaba para describir el mundo de los átomos. Pero era un tipo extraño de matemáticas, y lo que nos decía acerca de los átomos era más extraño todavía. Por ejemplo, Heisenberg afirmaba no solo que no podíamos decir exactamente donde estaba un electrón atómico si no lo medíamos, sino también que el propio electrón no tenía una localización definida porque se hallaba extendido de una manera vaga e incognoscible.

Heisenberg se vio obligado a concluir que el mundo atómico es un lugar fantasmal e insustancial que solo cristaliza en una existencia definida cuando disponemos un aparato de medida para que interactúe con él. Este es el proceso de medición cuántica que describimos de forma somera en el último capítulo. Heisenberg demostró que este proceso solo revela aquellas características que está específicamente diseñado para medir, de manera muy parecida a la que tiene cada uno de los instrumentos del salpicadero de un automóvil para proporcionar información acerca de un único aspecto de su operación, como su velocidad, la distancia recorrida o la temperatura del motor. Así, podríamos preparar un experimento para determinar la posición precisa de un electrón en un momento dado. También podríamos elaborar un experimento diferente para medir la velocidad del mismo electrón. Pero Heisenberg demostró, en términos matemáticos, que es imposible preparar un experimento único en el que podamos medir, de manera tan precisa como queramos, dónde se encuentra un electrón y, de manera simultánea, lo rápido que se desplaza. En 1927 este concepto quedó formulado en el famoso principio de incertidumbre de Heisenberg, que desde entonces se ha verificado muchos miles de veces en laboratorios de todo el mundo. Sigue siendo una de las ideas más importantes de toda la ciencia y uno de los cimientos de la mecánica cuántica.

En enero de 1926, por la misma época en que Heisenberg desarrollaba sus ideas, el físico austríaco Erwin Schrödinger escribió un artículo en el que esbozaba una imagen muy distinta del átomo. En dicho artículo propuso una ecuación matemática, conocida ahora como ecuación de Schrödinger, en la que no describía la manera en que una partícula se mueve, sino la manera en que una onda evoluciona. Sugería que en lugar de ser un electrón una partícula vaga en el átomo, con una posición incognoscible cuando orbita alrededor del núcleo, es una onda extendida por el átomo. A diferencia de Heisenberg, quien creía que era absolutamente imposible tener una imagen de un electrón cuando no lo medimos, Schrödinger prefería pensar en el electrón como una onda física real cuando no la observamos, y que se «desploma» \* en una partícula discreta cada vez que la observamos. Su versión de la teoría atómica acabó por conocerse como mecánica ondulatoria, y su famosa ecuación describe de qué manera dichas ondas evolucionan y se comportan a lo largo del tiempo. Hoy en día consideramos que las descripciones de Heisenberg y Schrödinger son modos diferentes de interpretar la matemática de la mecánica cuántica y que ambas, cada una a su manera, son correctas.

#### LA FUNCIÓN DE ONDA DE SCHRÖDINGER

Cuando queremos describir el movimiento de objetos cotidianos, ya se trate de balas de cañón, trenes de vapor o planetas, cada uno de ellos compuesto de billones de partículas, resolvemos el problema utilizando un conjunto de ecuaciones matemáticas que se remontan al trabajo de Isaac Newton. Pero si el sistema que describimos se encuentra en el mundo cuántico, entonces tenemos que utilizar la ecuación de Schrödinger. Y aquí reside la profunda distancia entre los dos enfoques, porque en nuestro mundo newtoniano la solución de una ecuación de movimiento es un número, o un conjunto de números, que define(n) la localización precisa de un objeto en un momento dado del tiempo. En el mundo cuántico, la solución de la ecuación de Schrödinger es una cantidad matemática llamada función de onda, que no nos dice la posición precisa de, pongamos por caso, un electrón en un momento concreto del tiempo, sino que proporciona todo un conjunto de números que describen la probabilidad de que un electrón se encontrara en distintas posiciones del espacio si lo buscáramos allí.

Desde luego, la primera reacción del lector ante esto debe de ser: «Pero esto no es lo bastante bueno; decirnos simplemente dónde podría estar el electrón no



parece una información muy útil». El lector puede querer saber exactamente dónde se halla la partícula. Pero a diferencia de un objeto clásico que siempre ocupa una posición definida en el espacio, un electrón puede hallarse en múltiples lugares a la vez hasta el momento en que es medido. La función de onda cuántica se halla extendida por todo el espacio, lo que significa que al describir un electrón, pongamos por caso, lo mejor que podemos hacer es resolver un conjunto de números que den la probabilidad de encontrarlo no en una única posición, sino simultáneamente en cada punto del espacio. Sin embargo, es importante darse cuenta de que estas probabilidades cuánticas no representan alguna deficiencia en nuestro conocimiento, que podría curarse obteniendo más información; son, en cambio, una característica fundamental del mundo natural a esta escala microscópica.

Imaginemos un ladrón de joyas que acaba de obtener la libertad condicional y sale de la prisión. En lugar de enmendarse, vuelve inmediatamente a sus antiguas costumbres y empieza a allanar casas en toda la ciudad. Al estudiar un mapa, los policías pueden trazar su probable paradero desde el momento en el que sale en libertad. Aunque no pueden precisar su localización exacta en un momento dado, pueden asignar probabilidades a los robos cometidos por el ladrón en diferentes distritos.

Para empezar, las casas que se hallan cerca de la prisión son las más expuestas, pero con el tiempo el área amenazada se hace mayor. Y, al saber el tipo de propiedades en las que ha irrumpido en el pasado, la policía también puede predecir con cierta fiabilidad que los distritos más pudientes, con sus joyas de mayor valor, tienen un mayor riesgo que los más pobres. Puede pensarse en esta oleada de delitos cometidos por un solo hombre y que se extiende por la ciudad como una oleada de probabilidad. No es tangible y no es real, solo un conjunto de números abstractos que se pueden asignar a las distintas partes de la ciudad. De una manera similar, una función de onda se expande a partir del punto en el que se vio un electrón por última vez. Calcular el valor de esta función de onda en diferentes posiciones y tiempos nos permite asignar probabilidades a dónde podría aparecer a continuación.

Ahora bien, ¿qué pasaría si la policía actuara a partir de un soplo y pudiera capturar al ladrón con las manos en la masa, mientras sale por una ventana con el saco de su botín al hombro? De inmediato, su distribución amplia de probabilidades que describía el paradero posible del ladrón se habría reducido a tenerlo definitivamente en una posición y, definitivamente, en ningún otro lugar. Asimismo, si el electrón es detectado en una determinada posición, entonces su

función de onda se altera de manera instantánea. En el momento de la detección habrá una probabilidad cero de encontrarlo en algún otro lugar.

Sin embargo (y aquí es donde la analogía termina), aunque antes de capturar al ladrón la policía solo puede asignar probabilidades al paradero del caco, esta sabe que ello solo se debe a su falta de información. Después de todo, en realidad el ladrón no se ha extendido por toda la ciudad, y aunque la policía debe considerar que, en potencia, se halla en cualquier sitio, lo cierto es que, desde luego, en cada momento dado se encuentra en un solo lugar. Pero, en claro contraste con el ratero, cuando no hacemos el seguimiento del movimiento de un electrón no podemos asumir que este exista en algún lugar definido y en algún momento dado. Por el contrario, todo lo que tenemos para describirlo es la función de onda, que está en todas partes a la vez. Solo mediante el acto de observar (realizar una medición) podemos «obligar» al electrón a convertirse en una partícula localizada.

Hacia 1927, gracias a los esfuerzos de Heisenberg, Schrödinger y otros, los cimientos matemáticos de la mecánica cuántica estaban esencialmente completos. En la actualidad, constituyen el fundamento sobre el que se construye gran parte de la física y la química, y nos proporcionan una visión notablemente completa de las piezas fundamentales de todo el universo. De hecho, sin el poder explicativo de la mecánica cuántica a la hora de describir cómo encaja todo, gran parte de nuestro moderno mundo tecnológico sería simplemente imposible.

Y así fue como a finales de la década de 1920, satisfechos por sus éxitos recientes a la hora de domar el mundo atómico, varios de aquellos pioneros cuánticos salieron de sus laboratorios de física dispuestos a conquistar un área distinta de la ciencia: la biología.

#### LOS PRIMEROS BIÓLOGOS CUÁNTICOS

En la década de 1920, la vida era todavía un misterio. Aunque los bioquímicos del siglo XIX habían realizado grandes progresos en la construcción de un conocimiento mecanicista de la química de la vida, muchos científicos continuaban aferrándose al principio vitalista de que la biología no podía reducirse a química y física, sino que requería su propio conjunto de leyes. Todavía se consideraba que el «protoplasma» del interior de las células vivas era una forma misteriosa de materia animada por fuerzas desconocidas, y el secreto de la herencia continuaba eludiendo a la ciencia de la genética, entonces en crecimiento.

Pero durante dicha década surgió una nueva casta de científicos, denominados organicistas, que rechazaron las ideas tanto de los vitalistas como de los mecanicistas. Dichos científicos aceptaban que la vida entrañaba algo misterioso, pero afirmaban que, en principio, el misterio podría explicarse mediante leyes de la física y de la química que todavía no se habían descubierto. Uno de los principales defensores del movimiento organicista fue otro austríaco, que tenía el exótico nombre de Ludwig von Bertalanffy. Escribió algunos de los primeros artículos sobre teorías del desarrollo biológico y destacó la necesidad de algún nuevo principio biológico para describir la esencia de la vida en su libro de 1928 *Kritische Theorie der Formbildung* (*Teoría crítica de la morfogénesis*). Sus ideas, y en particular este libro, influyeron en muchos científicos, entre ellos otro pionero de la física cuántica, Pascual Jordan.

Nacido y educado en Hannover, Pascual Jordan estudió con uno de los padres fundadores de la mecánica cuántica, Max Born, \* en Gotinga, en Alemania. En 1925, Jordan y Born publicaron el artículo clásico «Zur Quantenmechanik» («Sobre mecánica cuántica»). Al año siguiente, Jordan, Born y Heisenberg publicaron una «secuela», «Zur Quantenmechanik II». Este trabajo, conocido como el *Dreimännerwerk*, el «artículo de los tres hombres», se considera uno de los clásicos de la mecánica cuántica, porque partió del notable descubrimiento de Heisenberg y lo desarrolló en una manera, elegante desde el punto de vista matemático, de describir el comportamiento del mundo atómico.

Al año siguiente, Jordan hizo lo que cualquier joven físico europeo de la época que se preciara habría hecho de habersele presentado la oportunidad: pasó un tiempo en Copenhague trabajando con Niels Bohr. En algún momento alrededor de 1929, los dos hombres empezaron a discutir sobre si la mecánica cuántica podría tener alguna aplicación en el campo de la biología. Pascual Jordan volvió a Alemania, a un puesto en la Universidad de Rostock, desde donde durante los dos años siguientes mantuvo correspondencia con Bohr sobre la relación entre física y biología. Sus ideas culminaron en el que podríamos considerar el primer artículo científico sobre biología cuántica, que Jordan escribió en 1932 para la revista *Die Naturwissenschaften* y se titulaba «Die Quantenmechanik und die Grundprobleme der Biologie und Psychologie» («La mecánica cuántica y los problemas fundamentales de la biología y la psicología»). <sup>2</sup>

Lo cierto es que los escritos de Jordan contienen varias intuiciones interesantes sobre el fenómeno de la vida; sin embargo, sus especulaciones biológicas se politizaron cada vez más y se alinearon con la ideología nazi. Llegó a afirmar que el concepto de un único líder o guía dictatorial (*Führer*) era

un principio fundamental de la vida.

Sabemos que en una bacteria, entre el enorme número de moléculas que constituyen este [...] organismo [...] hay un número muy pequeño de moléculas especiales dotadas de autoridad dictatorial sobre el organismo total. Forman un *Steuerungszentrum* [centro conductor] de la célula viva. La absorción de un cuanto de luz en cualquier lugar fuera de dicho *Steuerungszentrum* no puede matar a la célula, de la misma manera que una gran nación no puede ser aniquilada por matar a un único soldado. Pero la absorción de un cuanto de luz en el *Steuerungszentrum* de la célula puede hacer que todo el organismo muera y se disuelva [...] de manera similar a como un asalto ejecutado con éxito a un hombre de estado principal [*führenden*] puede hacer que toda una nación entre en un profundo proceso de disolución. <sup>3</sup>

Este intento de importar la ideología nazi a la biología es a la vez fascinante y pavoroso. Pero contiene el germen de una idea curiosa, la que Jordan llamaba *Verstärkertheorie*, o teoría de la amplificación. Jordan señalaba que los objetos inanimados eran regidos por el movimiento aleatorio promedio de millones de partículas, de tal manera que el movimiento de una única molécula no tiene ninguna influencia en el objeto entero. Pero la vida, aducía, es diferente, porque está gobernada por muy pocas moléculas dentro del *Steuerungszentrum* que tienen una influencia dictatorial, de modo que los acontecimientos a nivel cuántico que rigen su movimiento, como el principio de incertidumbre de Heisenberg, son amplificados e influyen sobre todo el organismo.

Esta es una intuición interesante, y volveremos a ella; pero en aquella época no se desarrolló y no tuvo mucha influencia porque, después de la derrota de Alemania en 1945, las simpatías políticas de Jordan por el nazismo lo desacreditaron ampliamente entre sus contemporáneos, y sus ideas sobre la biología cuántica se dejaron de lado. A otros casamenteros entre las disciplinas de biología y de física cuántica se los dispersó a los cuatro vientos como secuelas de la guerra; y la física, sacudida hasta los cimientos por el uso de la bomba atómica, dirigió su atención a problemas más tradicionales.

Pero la llama de la biología cuántica se mantuvo encendida gracias al mismísimo inventor de la mecánica ondulatoria cuántica, Erwin Schrödinger. En vísperas de la Segunda Guerra Mundial huyó de Austria (ya que las leyes nazis consideraban que su mujer era no aria) y se instaló en Irlanda, donde en 1944 publicó un libro cuyo título planteaba la pregunta *¿Qué es la vida?*, <sup>\*</sup> y en el que esbozó una nueva concepción biológica que resulta fundamental para el campo de la biología cuántica y, de hecho, para este libro. Es esta concepción la que exploraremos con algo de detalle antes de acabar este capítulo dedicado a la historia.

El problema que intrigaba a Schrödinger era el misterioso proceso de la herencia. El lector recordará que en esa época, en la primera mitad del siglo xx , los científicos sabían que los genes se heredaban de una generación a la siguiente, pero ignoraban de qué estaban hechos los genes o cómo funcionaban. ¿Qué leyes, se preguntaba Schrödinger, proporcionaban a la herencia su alto nivel de fidelidad? En otras palabras, ¿cómo podían transmitirse copias idénticas de genes prácticamente inalteradas de una generación a la siguiente?

Schrödinger sabía que las leyes precisas y repetidamente demostrables de la física y la química clásicas, como las de la termodinámica, que es impulsada por el movimiento aleatorio de átomos y moléculas, eran en realidad leyes estadísticas, lo que significa que solo son ciertas «por término medio», y solo son fiables porque implican un número muy grande de partículas que interactúan. Volviendo a nuestra mesa de billar, el movimiento de una sola bola es absolutamente impredecible, pero si lanzamos una gran cantidad de bolas a la mesa y las golpeamos al azar durante un período aproximado de una hora, podremos predecir que la mayoría terminarán entrando en las troneras. La termodinámica funciona así: es el comportamiento promedio de una enorme cantidad de moléculas lo que es predecible, no el comportamiento de

Pensemos, por ejemplo, en las leyes de los gases que describieron Robert Boyle y Jacques Charles hace trescientos años. Describen la manera en que el volumen de gas en un globo se expandirá si se calienta y se contraerá si se enfría. Este comportamiento puede resumirse en una fórmula matemática sencilla conocida como la ley de un gas ideal. \* Un globo sigue estas leyes ordenadas: si lo calentamos, se expandirá; si lo enfriamos, se contraerá. Sigue estas leyes a pesar del hecho de estar lleno de billones de moléculas que tomadas de manera individual se comportan como las bolas de billar desordenadas cuyo movimiento es completamente al azar, que chocan y empujan unas a otras y rebotan de la pared interna del globo. ¿De qué manera el movimiento desordenado genera leyes ordenadas?

Cuando se calienta el globo, las moléculas de aire se agitan más rápidamente, lo que asegura que entrechoquen entre sí, y con las paredes del globo, con algo más de fuerza. Esta fuerza adicional ejerce más presión sobre la piel elástica del globo (al igual que sucedía con la vara móvil de la mesa de billar de Boltzmann), lo que hace que este se expanda. La cantidad de expansión dependerá de cuánto calor se proporciona y es completamente predecible, y las leyes de los gases la describen con precisión. El punto importante es que el objeto singular que es el globo obedece estrictamente a la ley de los gases porque el movimiento

ordenado de su superficie única, elástica y continua procede de los movimientos desordenados de un número enorme de partículas, que generan, tal como Schrödinger decía, orden a partir del desorden.

Schrödinger afirmaba que no son solo las leyes de los gases las que derivan su exactitud de las propiedades estadísticas de los grandes números, sino que «todas» las leyes de la física y la química clásicas (entre ellas, las leyes que rigen la dinámica de fluidos o de reacciones químicas) se basan en este principio de «promedio de grandes números» o de «orden a partir del desorden».

Pero, aunque un globo de tamaño normal lleno de billones de moléculas de aire seguirá siempre las leyes de los gases, un globo microscópico tan pequeño que solo contuviera un puñado de moléculas de aire no lo haría. Ello se debe a que, incluso a temperatura constante, se encontrará que estas pocas moléculas se alejarán unas de las otras, de manera ocasional y totalmente al azar, lo que hará que el globo se expanda. De forma parecida, se contraerá de manera ocasional por la sencilla razón de que todas sus moléculas se desplazarán de manera aleatoria hacia dentro. Por ello, el comportamiento de un globo minúsculo será impredecible en gran medida.

Esta dependencia del orden y la predictibilidad en los grandes números nos es, desde luego, muy conocida en otros ámbitos de la vida. Por ejemplo, los estadounidenses juegan más al béisbol que los canadienses, mientras que estos juegan más al hockey sobre hielo que aquellos. Sobre la base de esta «ley» estadística se pueden hacer predicciones adicionales acerca de cada país; por ejemplo, que Estados Unidos importará más pelotas de béisbol que Canadá, y que Canadá importará más palos de hockey que Estados Unidos. Pero aunque estas leyes estadísticas tienen valor predictivo, cuando se aplican a países enteros que tienen muchos millones de habitantes no pueden predecir con exactitud el comercio en palos de hockey o en pelotas de béisbol en una única región, como por ejemplo Minnesota o Saskatchewan.

Schrödinger fue más allá de la simple observación de que al nivel microscópico no era posible fiarse de las leyes estadísticas de la física clásica: cuantificó la reducción en la precisión, y calculó que la magnitud de las desviaciones de estas leyes es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del número de partículas implicadas. De modo que un globo lleno de un billón de partículas (un millón de millones) se aparta del comportamiento estricto de las leyes de los gases en tan solo una millonésima. Sin embargo, un globo que estuviera lleno de solo cien partículas se apartaría del comportamiento ordenado en una parte de cada diez. Aunque dicho globo tendería todavía a expandirse

cuando se lo calentara y a contraerse cuando se lo enfriara, no lo haría de ninguna manera que pudiera predecir ninguna ley determinista. Todas las leyes estadísticas de la física clásica se hallan sometidas a esta restricción: son ciertas para objetos compuestos por un número muy elevado de partículas, pero no consiguen describir el comportamiento de objetos compuestos de un número reducido de partículas. De modo que cualquier cosa que se base en las leyes físicas para fiabilidad y regularidad tiene que estar compuesta de gran cantidad de partículas.

Pero ¿qué hay de la vida? ¿Acaso su comportamiento ordenado, como las leyes de la herencia, puede explicarse mediante leyes estadísticas? Cuando Schrödinger meditó al respecto, llegó a la conclusión de que el principio del «orden a partir del desorden» que socializaba la termodinámica no podía regir la vida, porque, tal como él lo veía, al menos algunas de las más diminutas máquinas biológicas son, simplemente, demasiado pequeñas como para que las rijan las leyes clásicas.

Por ejemplo, por la época en que Schrödinger escribía *¿Qué es la vida ?* (una época en la que se sabía que los genes regían la herencia, pero en la que la naturaleza de los genes seguía siendo un misterio), planteó esta sencilla pregunta: ¿son los genes lo bastante grandes para derivar su exactitud reproductiva de las leyes estadísticas de «orden a partir del desorden»? Llegó a un tamaño estimado de un único gen de no más que un cubo cuyos lados medían unos 300 angstroms (un angstrom es 0,0000001 milímetros). Un cubo así contendría alrededor de un millón de átomos. Puede parecer que son muchos átomos, pero la raíz cuadrada de un millón es mil, de manera que el nivel de inexactitud o «ruido» en la herencia debería ser del orden de uno en un millar, o un 0,1%. De modo que si la herencia se basara en leyes estadísticas clásicas, entonces debería generar errores (desviaciones de las leyes) a un nivel de uno en un millar. Pero se sabía que los genes se podían transmitir fielmente con tasas de mutación (errores) de menos de uno en mil millones. Este grado de exactitud extraordinariamente grande convenció a Schrödinger de que las leyes de la herencia no podían basarse en las leyes clásicas de «orden a partir del desorden». En lugar de ello, Schrödinger propuso que los genes se parecían más a átomos o moléculas individuales por hallarse sujetos a las reglas no clásicas pero extrañamente ordenadas de la ciencia que él había contribuido a fundar, la mecánica cuántica. Schrödinger propuso que la herencia se basaba en el principio nuevo de «orden a partir del orden».

Schrödinger presentó por primera vez sus ideas en una serie de conferencias

en el Trinity College de Dublín, en 1943, y las publicó al año siguiente en *¿Qué es la vida?*, libro en el que escribió lo siguiente: «El organismo vivo parece ser un sistema macroscópico que en parte de su comportamiento se acerca a lo que [...] todos los sistemas tienden, a medida que la temperatura se acerca al cero absoluto y el desorden molecular es eliminado». Por razones que pronto descubriremos, en el cero absoluto todos los objetos se hallan sometidos a las leyes cuánticas, no a las termodinámicas. La vida, afirmaba Schrödinger, es un fenómeno de nivel cuántico capaz de volar en el aire, andar sobre dos o cuatro patas, nadar en el océano, crecer en el suelo o, efectivamente, leer este libro.

#### EL DISTANCIAMIENTO

Los años siguientes a la publicación del libro de Schrödinger vieron el descubrimiento de la doble hélice del ADN y el ascenso meteórico de la biología molecular, una disciplina que se desarrolló en gran medida sin referencia a los fenómenos cuánticos. La clonación de genes, la ingeniería genética, la identificación y la secuenciación del genoma fueron desarrolladas por biólogos que, en líneas generales, se conformaban, con cierta justificación, con hacer caso omiso del mundo cuántico que planteaba retos matemáticos. Hubo incursiones ocasionales en la zona fronteriza entre la biología y la mecánica cuántica. Sin embargo, la mayoría de los científicos olvidaron la atrevida afirmación de Schrödinger. Muchos eran incluso abiertamente hostiles a la idea de que la mecánica cuántica fuera necesaria para explicar la vida. Por ejemplo, en 1962, Christopher Longuet-Higgins, químico y científico cognitivo inglés, escribía lo siguiente:

Recuerdo alguna discusión hace varios años acerca de la posible presencia de fuerzas de mecánica cuántica de largo alcance entre los enzimas y sus sustratos. Sin embargo, era perfectamente correcto que dicha hipótesis se tratara con reservas, no solo debido a la poca solidez de las pruebas experimentales, sino también a causa de la gran dificultad a la hora de reconciliar dicha idea con la teoría general de las fuerzas intermoleculares. [4](#)

Incluso en 1993, cuando se publicó el libro *What Is Life? The Next Fifty Years*, [5](#) que agrupaba artículos escritos por los participantes en una reunión que tuvo lugar en Dublín cincuenta años después de la presentación de Schrödinger, apenas se mencionaba la mecánica cuántica.

Gran parte del escepticismo que la afirmación de Schrödinger atrajo en su época se basaba en la creencia general de que tal vez los delicados estados cuánticos no podrían sobrevivir en los ambientes moleculares cálidos, húmedos



y atareados del interior de los seres vivos. Tal como descubrimos en el capítulo anterior, esta era la razón principal de que muchos científicos fuesen (y muchos todavía lo son) muy escépticos con respecto a la idea de que la mecánica cuántica pueda regir la brújula de las aves. El lector recordará que, cuando discutíamos esta cuestión en el capítulo 1, describimos que las propiedades cuánticas de la materia se «desvanecían» por la disposición aleatoria de las moléculas en los objetos grandes. Con los conocimientos termodinámicos de que disponemos ahora, podemos ver el origen de esta disipación: son los empujones moleculares del tipo de bolas de billar que Schrödinger identificó como origen de las leyes estadísticas del «orden a partir del desorden». Las partículas dispersas pueden realinearse para revelar sus profundidades cuánticas ocultas, pero solo en circunstancias especiales y, por lo general, solo de manera muy breve. Por ejemplo, vimos cómo los núcleos de hidrógeno dispersos y que giran en nuestro cuerpo pueden alinearse para generar una señal de MRI coherente a partir de la propiedad cuántica del espín... pero únicamente mediante la aplicación de un campo magnético muy fuerte que proporciona un imán grande y potente, y solo mientras se mantenga la fuerza magnética: tan pronto como se desconecta el campo magnético, las partículas vuelven a alinearse de manera aleatoria por todos los empujones moleculares, y la señal cuántica se dispersa y es indetectable. Este proceso mediante el cual el movimiento molecular aleatorio perturba sistemas mecánicos cuánticos cuidadosamente alineados se denomina decoherencia, y elimina con toda rapidez los extraños efectos cuánticos en los objetos inanimados grandes.

Aumentar la temperatura de un cuerpo aumenta la energía y la velocidad de los empujones moleculares, de modo que es más fácil que la decoherencia se produzca a temperaturas elevadas. Pero no se piense que «elevadas» quiere decir «calientes». En realidad, la decoherencia es instantánea incluso a la temperatura ambiente. Por este motivo se consideró muy improbable, al menos en un primer momento, la idea de que los cuerpos vivos cálidos pudieran mantener estados cuánticos delicados. Solo cuando los objetos se enfrían hasta acercarse al cero absoluto (una temperatura de  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) se detiene completamente el movimiento aleatorio molecular para mantener la decoherencia a raya, lo que permite que pueda notarse la mecánica cuántica. Ahora resulta clara la ya citada afirmación de Schrödinger. Este físico afirmaba que, de alguna manera, la vida consigue funcionar según un reglamento que suele operar solo a temperaturas  $273\text{ }^{\circ}\text{C}$  más frías que la de cualquier organismo vivo.

Pero, tal como Jordan y Schrödinger aducían, y como el lector descubrirá si

sigue leyendo, la vida es distinta de los objetos inanimados porque un número relativamente pequeño de partículas muy ordenadas, como las que hay en el interior de un gen o en la brújula aviar, puede suponer una gran diferencia para un organismo completo. Esto es lo que Jordan denominaba «amplificación» y Schrödinger llamaba «orden a partir de orden». El color de nuestros ojos, la forma de nuestra nariz, aspectos de nuestro carácter, nuestro nivel de inteligencia e incluso nuestra propensión a la enfermedad han sido determinados, en realidad, precisamente por cuarenta y seis supermoléculas muy ordenadas: los cromosomas de ADN que hemos heredado de nuestros progenitores. No existe ningún objeto macroscópico inanimado en todo el universo conocido que posea esta sensibilidad a la estructura detallada de la materia en su nivel más fundamental, un nivel en el que reinan las leyes de la mecánica cuántica en lugar de las leyes clásicas. Schrödinger decía que esto es lo que hace que la vida sea tan especial. En 2014, setenta años después de que Schrödinger publicara por primera vez su libro, apreciamos finalmente las sorprendentes implicaciones de la extraordinaria respuesta que el físico austríaco le dio a la siguiente pregunta: ¿qué es la vida?

### 3

## LOS MOTORES DE LA VIDA

Todo lo que hacen los seres vivos puede entenderse en términos del meneo y contoneo de los átomos...

RICHARD FEYNMAN [1](#)

HAMLET: ¿Cuánto tiempo puede estar un hombre enterrado sin descomponerse?

SEPULTURERO: A decir verdad, si no está podrido antes de morir (puesto que hoy día nos vienen muchos cadáveres pustulosos, que no hay modo de cogerlos para enterrarlos), os vendrá a durar ocho o nueve años; un curtidor os durará nueve años.

HAMLET: ¿Y por qué él más que otro?

SEPULTURERO: ¡Toma!, porque su pellejo está tan curtido por razón de su oficio, que resiste mucho tiempo el agua; y el agua, señor mío, es un terrible destructor de todo hideputa cuerpo muerto.

WILLIAM SHAKESPEARE, *Hamlet*, Acto V, escena 1, «Un camposanto»

Hace sesenta y ocho millones de años, en el período que ahora llamamos Cretáceo tardío, un joven *Tyrannosaurus rex* se abría camino a través de un valle fluvial escasamente arbolado que cortaba un bosque semitropical. Cerca de los dieciocho años de edad, el animal no había llegado todavía a la madurez, pero alcanzaba casi cinco metros de altura. Con cada paso pesado aceleraba hacia delante muchas toneladas de carne de dinosaurio, con un ímpetu suficiente para aplastar árboles o cualquier animal más pequeño que tuviera la desgracia de interponerse en su camino. El que su cuerpo pudiera conservar su integridad al tiempo que estaba sometido a estas fuerzas desgarradoras de la carne se debía al hecho de que cada hueso, tendón y músculo era mantenido en su lugar por fibras duras pero elásticas de una proteína llamada colágeno. Esta proteína actúa como una especie de pegamento que une la carne, y es un componente esencial del cuerpo de todos los animales, nosotros incluidos. Como todas las biomoléculas, lo producen y destruyen las máquinas más notables del universo conocido. En este capítulo nos centraremos en cómo funcionan estas nanomáquinas \*

biológicas; y a partir de aquí exploraremos el descubrimiento reciente de que los engranajes y palancas de estos motores de la vida se hunden en el mundo cuántico para mantenernos vivos a nosotros y a todos los demás organismos vivos.

Pero, primero, volvamos a nuestro antiguo valle. En aquel día concreto, la masa del dinosaurio, hecha de millones de nanomáquinas, sería su perdición, porque aquellas patas que habían sido tan efectivas a la hora de perseguir y despedazar a sus presas demostrarían ser de poco uso a la hora de desembarazarlo del fango pegajoso del blando lecho del río en el que había dado un traspie. Después de muchas horas de esfuerzos infructuosos, las enormes mandíbulas del tiranosaurio se llenaron de agua turbia y el animal agonizante se hundió en el fango. En la mayoría de las circunstancias la carne del animal habría padecido la misma descomposición rápida que los «cadáveres» del sepulturero de Hamlet, pero este dinosaurio concreto se hundió con tal rapidez que todo su cuerpo no tardó en quedar sepultado en espeso fango y arena, que conservaron la carne. A lo largo de años y siglos, minerales de grano fino ocuparon cavidades y poros en sus huesos y carne, que sustituyeron los tejidos del animal con piedra: el cadáver del dinosaurio se convirtió en un dinosaurio fósil. En la superficie, los ríos continuaron deambulando por el paisaje, depositando capas sucesivas de arena, fango y cieno, hasta que el fósil quedó situado bajo decenas de metros de arenisca y esquisto.

Unos cuarenta millones de años más tarde, el clima se caldeó, los ríos se desecaron y los cálidos vientos del desierto erosionaron las capas de roca que cubrían los huesos que llevaban mucho tiempo muertos. Pasaron otros veintiocho millones de años antes de que miembros de otra especie de bípedo, *Homo sapiens*, entraran en el valle fluvial; pero estos primates erectos evitaban en lo posible este territorio árido y hostil. Cuando, en tiempos más modernos, llegaron los colonos europeos, bautizaron estas inhóspitas tierras con el nombre de Badlands \* de Montana, y llamaron Hell Creek al valle del río seco. En 2002, un equipo de paleontólogos dirigido por el cazador de fósiles más famoso de todos, Jack Horner, acampó allí. Uno de los componentes del grupo, Bob Harmon, estaba almorzando cuando advirtió que había un hueso grande que sobresalía de la roca, justo sobre su cabeza.

A lo largo de los tres años siguientes, casi la mitad del esqueleto entero del animal se extrajo meticulosamente de la roca circundante, tarea que implicó al Cuerpo de Ingenieros del Ejército, un helicóptero y a muchos graduados universitarios; el esqueleto fue transportado al museo de las Rocosas, en

Bozeman (Montana), donde lo designaron como espécimen MOR 1125. Hubo que cortar en dos el fémur del dinosaurio antes de poder izarlo a un helicóptero mediante un cabrestante, y en el proceso se rompió un pedazo de hueso fosilizado. Jack Horner le dio varios de los fragmentos a su colega paleontóloga de la Universidad Estatal de Carolina del Norte, la doctora Mary Schweitzer, de la que sabía que estaba interesada por la constitución química de los fósiles.

Cuando Schweitzer abrió la caja, se llevó una sorpresa. El primer fragmento que observó parecía tener un tejido de aspecto muy insólito en el lado interior (la cavidad medular) del hueso. Colocó el hueso en un baño de ácido, que disolvería sus minerales pétreos externos, para revelar sus estructuras más profundas. Sin embargo, en esta ocasión dejó accidentalmente el hueso demasiado tiempo en el baño de ácido y, para cuando volvió, todos sus minerales se habían disuelto. Schweitzer esperaba que todo el fósil se hubiera desintegrado, pero ella y sus colegas se quedaron sorprendidos al descubrir que quedaba una sustancia fibrosa flexible que, al ser observada al microscopio, tenía el mismo aspecto de tejido blando que se puede encontrar en los huesos modernos. Y, al igual que en los tejidos modernos, este aparecía atestado de vasos sanguíneos, glóbulos sanguíneos y estas largas cadenas de fibras de colágeno, el pegamento biológico que había mantenido al enorme animal vivo de una pieza.

Los fósiles que conservan la estructura de tejidos blandos son raros, pero en absoluto desconocidos. Los fósiles de Burgess Shale, que se encontraron a buena altura de las montañas Rocosas canadienses entre 1910 y 1925, conservan impresiones asombrosamente detalladas de la carne de animales que nadaban en los mares del Cámbrico hace cerca de seiscientos millones de años, al igual que el famoso fósil con plumas de *Archaeopteryx*, de la cantera de Solnhofen, en Alemania, que vivió hace unos ciento cincuenta millones de años. Pero los fósiles convencionales de tejido blando conservan únicamente la impresión del tejido biológico, no su sustancia; sin embargo, el material elástico que quedó en el baño de ácido de Mary Schweitzer parecía ser el mismo tejido blando del dinosaurio. Cuando, en 2007, Schweitzer publicó su hallazgo en la revista *Science*, [2](#) su artículo fue recibido inicialmente con sorpresa y un grado considerable de escepticismo. Pero, aunque la supervivencia de biomoléculas durante millones de años es realmente asombrosa, lo que de veras nos interesa de este relato es lo que ocurrió después. Para comprobar que las estructuras fibrosas estaban realmente constituidas por colágeno, Schweitzer demostró primero que las proteínas que se pegan al colágeno moderno se fijaron asimismo a las fibras en su hueso antiguo. Como prueba final, mezcló el tejido del dinosaurio con un

enzima llamado colagenasa, una de las muchas máquinas biomoleculares que producen y destruyen las fibras de colágeno en el cuerpo de los animales. En cuestión de minutos, el enzima descompuso cadenas de colágeno que se habían mantenido firmes durante sesenta y ocho millones de años.

Los enzimas son los motores de la vida. Los que tal vez nos resulten más familiares tienen usos algo mundanos y cotidianos, como las proteasas que se añaden a los detergentes «biológicos» que contribuyen a eliminar manchas, la pectina que se añade a la mermelada para que espese o el cuajo que se añade a la leche para hacer que esta coagule y se transforme en queso. Podemos apreciar también el papel que los diversos enzimas de nuestro estómago e intestino desempeñan a la hora de digerir nuestra comida. Pero estos son ejemplos bastante triviales de la acción de las nanomáquinas de la naturaleza. Toda la vida depende, o dependió, de enzimas, desde aquellos primeros microbios que surgieron rezumando de la sopa primitiva, pasando por los dinosaurios que pisoteaban los bosques del Jurásico, hasta todos los organismos que viven en la actualidad. Cada una de las células de nuestro cuerpo está llena de cientos o incluso miles de estas máquinas moleculares que facilitan el mantener en movimiento este proceso continuo de montaje y reciclado de biomoléculas, el proceso que denominamos vida.

Aquí «facilitan» es la palabra clave que define lo que hacen los enzimas: su tarea es acelerar (catalizar) todo tipo de reacciones bioquímicas que, de otro modo, se producirían con demasiada lentitud. Así, los enzimas proteasas que se añaden a los detergentes aceleran la digestión de las proteínas de las manchas, los enzimas pectinas aceleran la digestión de los polisacáridos en la fruta, y los enzimas del cuajo aceleran la coagulación de la leche. De manera parecida, los enzimas de nuestras células aceleran el metabolismo: el proceso por el que billones de biomoléculas del interior de nuestras células se están transformando continuamente en billones de otras biomoléculas para mantenernos vivos.

El enzima colagenasa que Mary Schweitzer añadió a sus huesos de dinosaurio es solo una de estas biomáquinas cuya tarea regular en el cuerpo de los animales es desintegrar las fibras de colágeno. La tasa de aceleración que proporcionan los enzimas puede estimarse de manera aproximada comparando el tiempo que tarda la digestión de las fibras de colágeno en su ausencia (claramente, más de sesenta y ocho millones de años) y en presencia del enzima adecuado (unos treinta minutos): una diferencia de un billón de veces.

En este capítulo exploraremos cómo consiguen los enzimas como la colagenasa estas aceleraciones químicas astronómicas. Una de las sorpresas de

los últimos años es el descubrimiento de que la mecánica cuántica desempeña un papel clave en la acción de al menos algunas enzimas; y, puesto que son fundamentales para la vida, los enzimas son nuestra primera parada obligada en el viaje a través de la biología cuántica.

#### ENZIMAS: ENTRE LOS VIVOS Y LOS MUERTOS

La explotación de enzimas antedata en varios milenios su descubrimiento y caracterización. Hace varios miles de años, nuestros antepasados transformaban los cereales en cerveza o el zumo de uvas en vino mediante la adición de levadura, que en esencia es un saco microbiano de enzimas. \* También sabían que un extracto del revestimiento del estómago de terneros (cuajo) aceleraba la transformación de la leche en queso. Durante muchos siglos se creyó que estas propiedades transformadoras las realizaban fuerzas vitales asociadas a los organismos vivos, a los que dotaban con la vitalidad y la velocidad de cambio que distinguía a los vivos de los muertos (según la referencia bíblica \*\* del título de este apartado).

En 1752, inspirado por la filosofía mecanicista de René Descartes, el científico francés René Antoine Ferchault de Réaumur se dispuso a investigar una de estas supuestas actividades vitales, la digestión, con un experimento ingenioso. En aquella época se creía generalmente que los animales digerían su comida mediante un proceso mecánico producido por el golpeteo y la agitación dentro de sus órganos digestivos. Esta teoría parecía en especial pertinente para las aves, cuya molleja contenía piedrecitas que se pensaba que maceraban la comida, una acción mecánica consistente con la teoría de René Descartes (que se ha esbozado en el capítulo anterior) de que los animales eran simples máquinas. Pero a Réaumur le intrigaba cómo las aves de presa, cuyas mollejas carecían de piedras digestivas, conseguían también digerir su comida. De modo que dio de comer a un halcón que tenía como mascota pequeños fragmentos de carne encerrados dentro de diminutas cápsulas de metal perforadas por pequeños agujeros. Cuando recuperó las cápsulas descubrió que la carne había sido digerida por completo, a pesar del hecho de que, protegida dentro del metal, no podía haber sido sometida a ninguna acción mecánica. Resultaba evidente que las ruedas dentadas, palancas y molinillos de Descartes eran insuficientes para dar cuenta de, al menos, una de las fuerzas vitales de la vida.

Un siglo después de la obra de Réaumur, otro francés, Louis Pasteur, químico y fundador de la microbiología, estudió otra transformación biológica que hasta

entonces se había atribuido a «fuerzas vitales»: la conversión de zumo de uva en vino. Demostró que el principio transformador de la fermentación parecía estar intrínsecamente asociado a células vivas de levadura que estaban presentes en los «fermentos» usados en la industria cervecera, o en la levadura utilizada para hacer pan. Entonces el fisiólogo alemán Wilhelm Friedrich Kühne acuñó en 1877 el término «enzima» («en la levadura», en griego) para describir los agentes de estas actividades vitales, como las realizadas por las células de levadura vivas, o de hecho cualquiera de las transformaciones promovidas por sustancias extraídas de tejidos vivos.

Pero ¿qué son los enzimas y cómo aceleran las transformaciones de la vida? Volvamos al enzima que abrió nuestro relato en este capítulo, la colagenasa.

#### POR QUÉ NECESITAMOS ENZIMAS Y CÓMO PIERDEN LA COLA LOS RENACUAJOS

El colágeno es la proteína más abundante en los animales (humanos incluidos). Actúa como una especie de filamento molecular urdido en y entre nuestros tejidos, que mantiene unida la carne. Como todas las proteínas, está compuesto de bloques químicos básicos: hebras de aminoácidos que se presentan en una veintena de variedades, y algunos de los cuales (por ejemplo, glicina, glutamina, lisina, cisteína y tirosina) le pueden resultar familiares al lector como suplementos nutricionales que pueden comprarse en las tiendas de dietética. Cada molécula de aminoácido está constituida por (más o menos) entre diez y cincuenta átomos de carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y ocasionalmente azufre, que se mantienen unidos mediante enlaces químicos, cada una en su propia forma tridimensional, única y característica.

Varios cientos de estas formas moleculares retorcidas de los aminoácidos se ensartan entre sí para formar una proteína, como si fueran cuentas de formas extrañas a lo largo de un cordel. Cada cuenta se halla unida a la siguiente mediante un enlace peptídico, que conecta un átomo de carbono de un aminoácido con un átomo de nitrógeno del siguiente. Los enlaces peptídicos son muy fuertes; después de todo, los que mantenían unidas las fibras de colágeno de *T. rex* habían sobrevivido durante sesenta y ocho millones de años.

El colágeno es una proteína especialmente resistente, cosa que le resulta fundamental para desempeñar su papel de red interna que mantiene la forma y estructura de nuestros tejidos. Las proteínas se hallan retorcidas en hebras triples, que a su vez se enlazan en cordones gruesos, o «fibras». Dichas fibras se enhebran entre nuestros tejidos para coser entre sí nuestras células; se hallan



también presentes en los tendones, que fijan los músculos a nuestros huesos, y en los ligamentos, que unen hueso con hueso. Esta densa red de fibras se denomina matriz extracelular, y básicamente mantiene nuestro cuerpo unido.

Quienquiera que no sea vegetariano ya está familiarizado con la matriz extracelular: es el cartílago filamentosos que puede encontrarse dentro de una salchicha indigerible o en una de las tajadas de carne baratas. Los cocineros son también conscientes de la insolubilidad de este material tendinoso, que no hay manera de que se ablande ni siquiera tras horas de cocer un guiso. Pero por desagradable que la matriz extracelular pueda ser en un plato en la mesa, su presencia en el cuerpo de los comensales es absolutamente vital. Sin colágeno, nuestros huesos se desbaratarían, nuestros músculos caerían de los huesos y nuestros órganos internos se convertirían en una especie de jalea.

Pero las fibras de colágeno presentes en nuestros huesos, músculos o comida no son indestructibles. Si se las hierva en ácidos o álcalis fuertes, los enlaces peptídicos entre las cuentas de aminoácidos acabarán por romperse y estas fibras resistentes se transformarán en gelatina soluble, la sustancia de consistencia de jalea que se usa para hacer dulces de malvavisco y jalea (gelatina en Estados Unidos). Los aficionados al cine recordarán el Hombre de Malvavisco (Marshmallow Man) de *Los cazafantasmas*, la masa enorme y torpe de carne blanca y tambaleante que aterrorizaba Nueva York. Pero al Hombre de Malvavisco lo derrotaban rápidamente al licuarlo en nata de malvavisco fundida. Los enlaces peptídicos entre las cuentas de aminoácidos de las fibras de colágeno son lo que marca la diferencia entre el Hombre de Malvavisco y *Tyrannosaurus rex*. Las resistentes fibras de colágeno hacen que los animales reales sean resistentes.

Sin embargo, existe un problema cuando al cuerpo de un animal se le proporciona el andamiaje de materiales resistentes y duraderos como el colágeno. Considere el lector qué ocurre cuando se corta o se hiere, o incluso cuando se rompe un brazo o una pierna: se destruyen tejidos, y es probable que la matriz extracelular de soporte, esta membrana fibrosa, quede dañada o rota. Si una tormenta o un terremoto dañan una casa, la eliminación de la estructura rota debe preceder a la reparación. De forma similar, el cuerpo de los animales utiliza el enzima colagenasa para arrancar las partes dañadas de la matriz extracelular para que el tejido pueda ser reparado por otro conjunto de enzimas.

De manera todavía más crucial, hay que remodelar de manera constante la matriz extracelular a medida que un animal crece: el andamiaje interno que sostenía a un niño no servirá para sostener a un adulto mucho mayor. Este

problema es particularmente agudo (y, por lo tanto, su solución particularmente instructiva) en los anfibios, cuya forma adulta es muy distinta de la juvenil. El ejemplo más familiar es la metamorfosis de los anfibios: la transformación desde un huevo esférico hasta un renacuajo serpenteante, que más tarde madura hasta convertirse en una rana saltarina. Se encuentran fósiles de estos anfibios de cuerpo corto y sin cola, con sus inconfundibles y potentes patas traseras, en rocas del Jurásico que se remontan a mediados de la era Mesozoica, hace doscientos millones de años, conocida como la Edad de los Reptiles. Pero también pueden encontrarse en rocas correspondientes al período Cretáceo. De modo que parece probable que hubiera ranas que nadaban en el mismo río de Montana en el que el dinosaurio que se convirtió en MOR 1125 encontró su fin. Pero, a diferencia de los dinosaurios, las ranas consiguieron sobrevivir a la gran extinción del Cretáceo y siguen siendo comunes en nuestras charcas, ríos y pantanos, lo que ha permitido a generaciones de escolares, y de científicos, estudiar de qué manera el cuerpo se forma y se reforma.

La transformación de un renacuajo en una rana implica una cantidad considerable de desmantelamiento y remodelación de, por ejemplo, la cola del animal, que se reabsorbe en el cuerpo de manera gradual, y cuya carne se recicla para formar las nuevas patas de la rana. Todo esto requiere desmantelar rápidamente la matriz extracelular basada en el colágeno que sostenía la cola del animal antes de ensamblarse de nuevo en las patas que se están formando. Pero recuerde el lector aquellos sesenta y ocho millones de años bajo las rocas de Montana: las fibras de colágeno no se rompen con facilidad. La metamorfosis de la rana tardaría muchísimo tiempo si se confiara únicamente en la descomposición química del colágeno mediante procesos inorgánicos. Es evidente que un animal no puede hacer hervir sus duros tendones en ácido caliente, y por lo tanto necesita un medio mucho más suave de desmantelar sus fibras de colágeno.

Aquí es donde hace su aparición el enzima colagenasa.

Pero ¿cómo funciona este enzima (y todos los demás)? La creencia vitalista según la cual la actividad enzimática estaba mediada por algún tipo de fuerza viva misteriosa persistió hasta finales del siglo XIX. Por aquel entonces, uno de los colegas de Kühne, el químico Eduard Buchner, demostró que extractos no vivos de células de levadura podían estimular precisamente las mismas transformaciones químicas que efectuaban las células vivas. Buchner hizo la propuesta revolucionaria de que la «fuerza vital» no era más que una forma de «catálisis» química.

Los catalizadores son sustancias que aceleran las reacciones químicas ordinarias y ya eran conocidos por los químicos en el siglo XIX. De hecho, muchos de los procesos químicos que impulsó la revolución industrial dependían fundamentalmente de catalizadores. Por ejemplo, el ácido sulfúrico era una sustancia química esencial que espoleó tanto la revolución industrial como la revolución agrícola al usarse en la fabricación del hierro y del acero, en la industria textil y en la fabricación de fertilizantes fosfatados. Se produce mediante una reacción química que se inicia con dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y oxígeno (los reactantes); ambos reaccionan con agua para formar el producto: ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Sin embargo, la reacción es muy lenta, y por ello fue difícil comercializarlo al principio. Pero en 1831, Peregrine Phillips, un productor de vinagre de Bristol, en Inglaterra, descubrió una manera de acelerarla haciendo pasar el dióxido de azufre y el oxígeno sobre platino caliente, que actuaba como un catalizador. Los catalizadores difieren de los reactantes (las sustancias iniciales que participan en la reacción) porque ayudan a acelerar la reacción sin tomar parte en ella ni ser cambiados por ella. La afirmación de Buchner fue, por lo tanto, que los enzimas no eran diferentes, en principio, del tipo de catalizador inorgánico que había descubierto Phillips.

Décadas de investigación bioquímica posterior han confirmado en gran medida la intuición de Buchner. El cuajo, que se produce en el estómago de las terneras, fue el primer enzima en ser purificado. Los antiguos egipcios almacenaban leche en bolsas hechas con el revestimiento del estómago de terneros, y se les suele atribuir el descubrimiento de que este improbable material aceleraba la conversión de la leche en queso, de mejor conservación. Esta práctica continuó hasta el final del siglo XIX. Para entonces, los estómagos de terneros se secaban y se vendían como «cuajos» en las farmacias. En 1874 estaban entrevistando al químico danés Christian Hansen para un puesto de trabajo en una farmacia cuando oyó que alguien pedía una docena de cuajos y, al preguntar qué era aquello, tuvo la idea de emplear sus habilidades químicas para proporcionar una fuente de cuajo menos desagradable. Volvió a su laboratorio, donde desarrolló un método para convertir el líquido maloliente obtenido al rehidratar el estómago de terneros en un polvo seco, e hizo su fortuna al comercializar el producto, que se vendió en todo el mundo como Extracto de Cuajo del Doctor Hansen.

De hecho, el cuajo es una mezcla de varios enzimas diferentes, el más activo de los cuales para los fines de la producción de queso es la quimosina, que a su vez es una enorme familia de enzimas llamadas proteasas que aceleran la

división de las proteínas. Su acción en la producción de queso es hacer que la leche cuaje de modo que pueda separarse en cuajada y suero; pero su papel natural en el cuerpo de un ternero joven es cuajar la leche que ingiere para que permanezca durante más tiempo en el tubo digestivo, lo que le proporciona más tiempo para ser absorbida. La collagenasa es otra proteasa, pero no se desarrollaron métodos para su purificación hasta medio siglo después, en la década de 1950, cuando Jerome Gross, un científico clínico de la facultad de Medicina de Harvard, en Boston, se sintió intrigado por la cuestión de cómo absorben su cola los renacuajos para convertirse en ranas.

Gross se interesó por el papel de las fibras de colágeno como ejemplo de autoensamblaje molecular, que consideraba que «contenía un secreto importante de la vida». <sup>3</sup> Decidió trabajar en la cola relativamente voluminosa del renacuajo de la rana toro (*Lithobates catesbeianus*), que alcanza un palmo de longitud. Gross intuyó correctamente que el proceso de la reabsorción de la cola debe implicar un montaje y desmontaje generalizado de las fibras de colágeno del animal. Para detectar la actividad de la collagenasa desarrolló una prueba sencilla en la que una placa de Petri se llenaba de una capa de gel de colágeno, de aspecto lechoso, repleto de estas fibras de colágeno resistentes y duraderas. Cuando colocó fragmentos de tejido de la cola de renacuajos sobre la superficie del gel, advirtió una zona que rodeaba el tejido en la que aquellas fibras resistentes se degradaban y se transformaban en gelatina soluble. Se dispuso entonces a purificar la sustancia que digería el colágeno, el enzima collagenasa.

La collagenasa está presente en los tejidos de las ranas y de otros animales, entre ellos el dinosaurio que dejó sus huesos en Hell Creek. El enzima realizaba hace sesenta y ocho millones de años la misma función que hace ahora: descomponer las fibras de colágeno; pero se inactivó cuando el animal murió y cayó en el pantano, de manera que sus fibras de colágeno permanecieron intactas hasta que Mary Schweitzer añadió algo de collagenasa fresca a los fragmentos de hueso.

La collagenasa no es más que uno de los millones de enzimas de los que dependen todos los animales, microbios y plantas para efectuar casi todas las actividades vitales de la vida. Unos enzimas producen las fibras de colágeno de la matriz extracelular; otros fabrican biomoléculas tales como las proteínas, el ADN, las grasas y los carbohidratos, y un conjunto de enzimas completamente distinto degrada y recicla estas biomoléculas. Los enzimas son responsables de la digestión, la respiración, la fotosíntesis y el metabolismo. Son responsables de hacernos a todos nosotros; y nos mantienen vivos. Son los motores de la vida.

Pero ¿son los enzimas únicamente catalizadores biológicos que proporcionan el mismo tipo de química que se emplea para producir ácido sulfúrico y gran número de otras sustancias químicas industriales? Hace algunas décadas, la mayoría de los biólogos habrían estado de acuerdo con la opinión de Buchner de que la química de la vida no es distinta de los tipos de procesos que tienen lugar en el interior de una planta química, o incluso en un juego infantil de química. Pero en las dos últimas décadas esta idea ha cambiado de manera radical a medida que diversos experimentos clave han proporcionado nuevas y notables informaciones acerca de la manera en que los enzimas funcionan. Parece que los catalizadores de la vida pueden llegar hasta un nivel de realidad más profundo que la antigua y sencilla química clásica y utilizar algunos bonitos trucos cuánticos.

Pero para comprender por qué se necesita la mecánica cuántica para explicar la vitalidad de la vida, primero hay que investigar cómo funcionan los catalizadores industriales mucho más mundanos.

#### CAMBIAR EL PAISAJE

Los catalizadores operan con una gran variedad de mecanismos diferentes, pero la mayoría pueden entenderse mediante una idea denominada teoría del estado de transición (TST, por sus siglas en inglés) [4](#) que proporciona una explicación simple de cómo los catalizadores aceleran las reacciones. Para comprender la TST, tal vez sea útil darle la vuelta al problema y considerar por qué se necesitan catalizadores para acelerar las reacciones. La respuesta es que la mayoría de las sustancias químicas comunes de nuestro entorno son bastante estables y poco o nada reactivas. No se descomponen de manera espontánea ni reaccionan fácilmente con otras sustancias químicas; al fin y al cabo, si hicieran cualquiera de estas dos cosas no serían comunes en la actualidad.

La razón por la que las sustancias químicas comunes son estables es que sus enlaces no se suelen romper por la inevitable turbulencia molecular que siempre existe dentro de la materia. Podemos visualizar esto como si las moléculas reactantes tuvieran que abrirse paso por un paisaje, ascendiendo hasta la cumbre de una colina que se halla situada entre ellas y la conversión en productos (véase figura 3.1). La energía necesaria para ascender el «flanco de la colina» la proporciona sobre todo el calor, que acelera el movimiento de átomos y moléculas, lo que hace que se desplacen o vibren con mayor rapidez. Este choque y forcejeo molecular puede romper los enlaces químicos que mantienen unidos los átomos dentro de las moléculas e incluso les permite formar nuevos

enlaces. Pero los átomos de moléculas más estables (los que son comunes en nuestro entorno) se mantienen unidos por enlaces que son lo bastante fuertes para resistir la turbulencia molecular circundante. De modo que las sustancias químicas que encontramos a nuestro alrededor son comunes por que sus moléculas son, de manera general, estables, \* a pesar del enérgico zarandeo molecular de su ambiente.

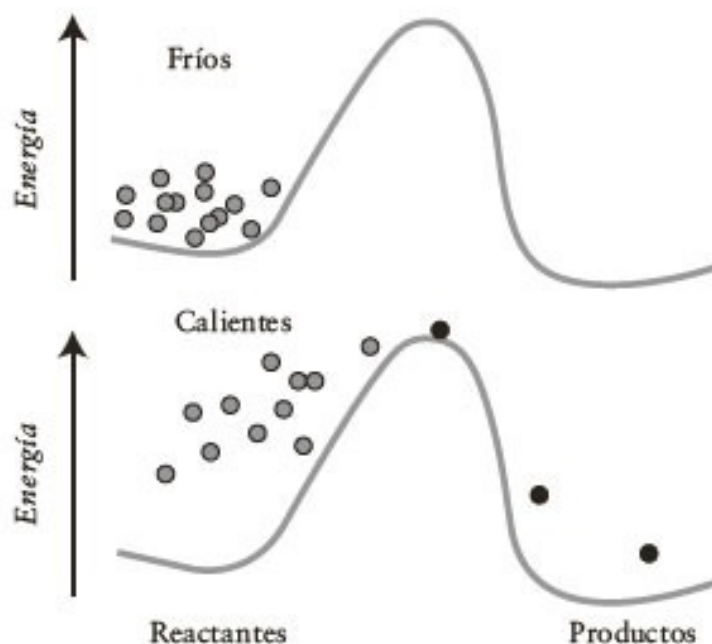


FIGURA 3.1. Las moléculas reactantes, representadas mediante puntos grises, pueden convertirse en moléculas de producto, representadas por puntos negros, pero primero tienen que escalar una colina de energía. Las moléculas frías rara vez poseen la energía suficiente para efectuar el ascenso, pero las moléculas calientes pueden llegar a la cima y superarla con facilidad.

Sin embargo, incluso las moléculas estables pueden henderse si se les suministra la energía suficiente. Una posible fuente de dicha energía es más calor, que acelera el movimiento molecular. Si se caldea una sustancia química, sus enlaces acabarán por romperse. Esta es la razón por la que cocinamos buena parte de nuestra comida: el calor acelera las reacciones químicas responsables de transformar los ingredientes en bruto (los reactantes) en productos más sabrosos.

Una manera conveniente de visualizar el modo en que el calor acelera las reacciones químicas es imaginar que las moléculas de los reactantes son como los granos de arena en la cámara izquierda de un reloj de arena que descansa sobre su lado (véase figura 3.2a). Si se le deja inmóvil, todos los granos de arena permanecerán donde se hallan hasta el fin de los tiempos, puesto que no tienen

suficiente energía para alcanzar el cuello del reloj de arena y pasar a la cámara de la derecha, que representa los productos finales de la reacción. A las moléculas reactantes de un proceso químico se les puede proporcionar más energía si se las calienta, con lo que se provoca que se muevan y vibren más rápidamente, y se proporciona a algunas de ellas la energía suficiente para que se conviertan en productos. Podemos imaginar esto limitándonos a darle al reloj de arena una buena sacudida, de manera que algunos de los granos de arena serán lanzados a la cámara de la derecha y pasarán de ser reactantes a ser productos (véase figura 3.2b).

Pero otra manera de convertir reactantes en productos es disminuir la barrera de energía que necesitan para pasar de una cámara a otra. Esto es lo que hacen los catalizadores. Realizan el equivalente de hacer más ancho el cuello del reloj de arena, de modo que la arena de la cámara de la izquierda pueda pasar a la de la derecha con solo una cantidad mínima de agitación térmica (véase figura 3.2c). De esta manera la reacción se acelera mucho por la capacidad del catalizador de cambiar la forma del paisaje energético de tal manera que permite que los sustratos <sup>\*</sup> se conviertan en productos mucho más deprisa de lo que pueden hacerlo en ausencia de un catalizador.

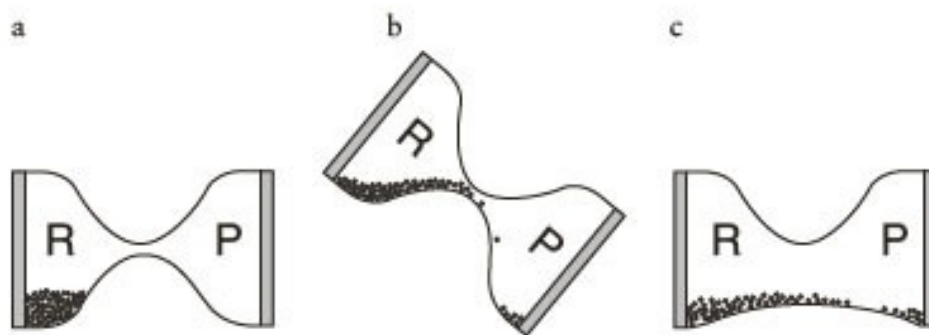


FIGURA 3.2. Cambio del paisaje energético. a) Las moléculas pueden pasar del estado de reactante (R) al de producto (P), pero primero deben poseer suficiente energía para ascender al estado de transición (el cuello del reloj de arena). b) Girar el reloj de arena pone al reactante (sustrato) en un estado de energía superior al del producto, lo que le permite pasar fácilmente de un lado a otro. c) Hay enzimas que funcionan estabilizando el estado de transición, reduciendo efectivamente su energía (el cuello del reloj de arena), lo que permite que los sustratos fluyan a través de él con más facilidad hacia el estado de producto.

Podemos ilustrar la manera en que esto funciona a un nivel molecular considerando primero la reacción lentísima responsable de descomponer una molécula de colágeno en ausencia del enzima colagenasa <sup>\*</sup> (véase figura 3.3).

Tal como ya hemos explicado, el colágeno es una hebra de aminoácidos, cada uno de ellos fijado al siguiente por un enlace peptídico (que en la figura se muestra como una línea gruesa) entre un átomo de carbono y uno de nitrógeno. El enlace peptídico es solo uno de los diferentes tipos de enlaces que mantienen a los átomos unidos entre sí en las moléculas. Consiste esencialmente en un par de electrones que se comparten entre los átomos de nitrógeno y carbono. Estos electrones, con carga negativa y compartidos, atraen a los núcleos atómicos, con carga positiva, a cada lado del enlace, con lo que actúan como una especie de pegamento electrónico que mantiene unidos a los átomos en el enlace peptídico.

\*

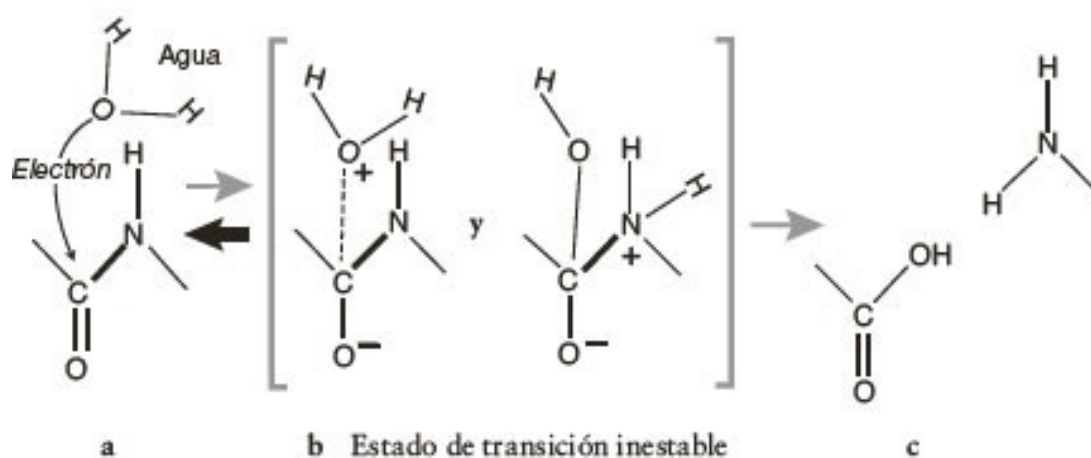


FIGURA 3.3. Las proteínas como el colágeno (a) consisten en cadenas de aminoácidos constituidos por átomos de carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O) e hidrógeno (H) unidos por enlaces peptídicos. Uno de dichos enlaces se representa mediante la línea gruesa de la figura. El enlace peptídico puede ser hidrolizado por una molécula de agua ( $H_2O$ ), que rompe el enlace peptídico (c), pero primero debe pasar por un estado de transición inestable, que consiste en al menos dos estructuras diferentes que se interconvierten mutuamente (b).

Los enlaces peptídicos son muy estables porque romperlos, obligando a los electrones compartidos a separarse, requiere una elevada «energía de activación»; el enlace ha de trepar una cuesta de energía muy alta antes de alcanzar el cuello del reloj de arena de la reacción. En la práctica, el enlace no suele romperse por su cuenta y necesita una mano amiga de una de las moléculas de agua circundantes en un proceso denominado «hidrólisis». Para que este tenga lugar, primero la molécula de agua tiene que pasar lo bastante cerca del enlace peptídico para donar uno de sus electrones al átomo de carbono del enlace, formando así un nuevo enlace débil que traba a la molécula de agua en su sitio, tal como se representa mediante líneas de puntos en la figura 3.3. Este



estado intermedio se denomina estado de transición (de ahí el nombre de teoría del estado de transición) y es el pico inestable de la colina de energía que hay que trepar si es que el enlace ha de romperse, representado por el cuello del reloj de arena. Adviértase a partir de la figura que este electrón donado procedente del agua se ha desplazado todo el trecho hasta el átomo de oxígeno adyacente al enlace peptídico, que al haber adquirido un electrón adicional está ahora cargado negativamente. Mientras tanto, la molécula de agua que donó el electrón ha quedado con una carga global positiva en el estado de transición.

Aquí es donde el proceso resulta algo más difícil de comprender. Piénsese que esta molécula de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) está cargada positivamente no porque haya perdido un electrón, sino porque ahora contiene un núcleo de hidrógeno básico, un protón, representado por el signo  $+$  en la figura. Este protón de carga positiva ya no es mantenido firmemente en su lugar en la molécula de agua y se vuelve «deslocalizado» en el sentido de mecánica cuántica que discutimos en el último capítulo. Aunque pasa la mayor parte de su tiempo todavía asociado con su molécula de agua (la estructura de la izquierda en la figura 3.3b), una fracción del tiempo se le puede encontrar más lejos, cerca del átomo de nitrógeno (la estructura de la derecha en la figura 3.3b), en el otro extremo del enlace peptídico. En esta posición, el protón ambulante puede arrastrar a uno de los electrones del enlace peptídico fuera de su posición, con lo que rompe el enlace.

Pero esto no suele ocurrir. El motivo es que los estados de transición, como el que se ilustra en la figura 3.3b, son efímeros, y tan inestables que el menor «golpecito» puede desalojarlos. Por ejemplo, el electrón con carga negativa que la molécula de agua donó es reclamado fácilmente, de manera que vuelven a formarse los reactantes iniciales, como se muestra mediante la flecha gruesa en la figura. Esta es una situación mucho más probable que la reacción hacia delante en la que el enlace se rompe. De modo que los enlaces peptídicos no suelen romperse. De hecho, en las soluciones neutras, que no son ácidas ni alcalinas, el tiempo que tardan la mitad de los enlaces peptídicos de una proteína en romperse, lo que se conoce como vida media de la reacción, es de más de quinientos años.

Todo esto, desde luego, es lo que ocurre sin enzimas: todavía no hemos descrito de qué manera el enzima interviene para ayudar en el proceso de hidrólisis. Según la teoría del estado de transición, los catalizadores aceleran los procesos químicos, como la rotura del enlace peptídico, al hacer que el estado de transición sea más estable, con lo que aumentan las probabilidades de que se formen los productos finales. Esto puede ocurrir de diversas maneras. Por

ejemplo, un átomo metálico con carga positiva cerca del enlace puede neutralizar el átomo de oxígeno con carga positiva en el estado de transición para estabilizarlo, de modo que ya no tenga tanta prisa para devolver el electrón que ha donado la molécula de agua. Al estabilizar los estados de transición, los catalizadores prestan una mano amiga al efectuar el equivalente de ampliar el cuello del reloj de arena.

Ahora necesitamos plantearnos si la teoría del estado de transición, que hemos visto con la analogía del reloj de arena, puede explicar asimismo la manera en que los enzimas aceleran todas las demás reacciones necesarias para la vida.

#### SACUDIDAS Y CONTONEOS

El enzima collagenasa que Mary Schweitzer utilizó para desmenuzar aquellas fibras de colágeno antiguas del *Tyrannosaurus* es el mismo enzima que Jerome Gross detectó en las ranas. El lector recordará que se necesita este enzima para dismantelar la matriz extracelular del renacuajo, de modo que sus tejidos, células y biomoléculas puedan ensamblarse de nuevo en una rana adulta. Realizó la misma función en el dinosaurio, y continúa realizando dicha función en nuestro cuerpo: dismantelar fibras de colágeno para permitir el crecimiento y reformación de tejido durante el desarrollo y después de lesiones. Para ver este proceso enzimático en acción, tomaremos prestada una idea de una conferencia que transformó la ciencia y que dictó Richard Feynman en el Instituto de Tecnología de California en 1959, titulada «Hay mucho espacio en el fondo». Por lo general, se considera que esta conferencia fue el cimiento intelectual del campo de la nanotecnología: la ingeniería a la escala de átomos y moléculas. Se dice que las ideas de Feynman también inspiraron el filme de 1966 *Viaje alucinante*, \* en el que un submarino y su tripulación son reducidos a un tamaño tan pequeño que los pueden inyectar en el cuerpo de un científico para encontrar y reparar un coágulo de sangre potencialmente fatal en su cerebro. Para investigar cómo funciona, haremos un viaje en un nanosubmarino imaginario. Nuestro destino será la cola del renacuajo.

Primero debemos encontrar nuestro renacuajo. Una visita a la charca local revela una freza de huevos de rana, de la que extraemos con cuidado un puñado de las esferas de aspecto gelatinoso con una mancha negra y las transferimos a un depósito de agua de vidrio. No tenemos que esperar mucho tiempo para observar contoneos dentro de la freza y, en cuestión de días, renacuajos diminutos que salen de los huevos. Después de tomar unas rápidas notas de sus

características principales bajo la lupa (una cabeza relativamente grande con hocico sobre una boca pequeña, ojos laterales y branquias plumosas delante de una larga y poderosa aleta caudal), suministramos a los renacuajos alimento suficiente (algas) y volvemos cada día para hacer observaciones. Durante varias semanas advertimos pocos cambios en la forma del animal, pero nos impresiona su rápido aumento de longitud y sección. Hacia las ocho semanas advertimos que las branquias del animal se han retraído dentro del cuerpo, lo que revela las patas anteriores. Otras dos semanas, y de la base de su robusta cola surgen las patas posteriores. En esta fase debemos efectuar observaciones más frecuentes, puesto que la tasa de cambio en el animal que se metamorfosea parece acelerarse. Las branquias y bolsas branquiales del renacuajo desaparecen por completo y sus ojos migran a mayor altura de su cabeza. Junto a estos cambios espectaculares en la parte anterior del renacuajo, su cola empieza a reducirse. Esta es la señal que estábamos esperando, de modo que nos embarcamos en nuestro nanosubmarino y lo botamos en el depósito de vidrio para investigar una de las transformaciones más notables de la naturaleza.

A medida que nuestra nave se reduce podemos ver más detalles de la metamorfosis de la rana, entre ellos unos cambios espectaculares en la piel del renacuajo, que se ha hecho más gruesa, más dura y llena de glándulas secretoras de mucus que la mantendrán húmeda y flexible cuando el animal abandone la charca y vaya caminando por tierra. Nos sumergimos en una de estas glándulas, lo que nos hace atravesar la piel del animal. Después de superar sin problemas varias barreras celulares, penetramos en su sistema circulatorio. Navegando por las venas y arterias del animal, podemos contemplar desde el interior los muchos cambios que tienen lugar dentro de su cuerpo. A partir de sus inicios como sacos, los pulmones se forman, se expanden y se llenan de aire. El largo tubo digestivo espiral del renacuajo, que era adecuado para digerir algas, se endereza para convertirse en el típico de un depredador. Su esqueleto cartilaginoso y translúcido, que incluye el notocordio (una forma primitiva de columna vertebral que recorre toda la longitud del cuerpo), se torna denso y opaco como cartílago y es sustituido por hueso. Continuando nuestra misión, seguimos la espina dorsal hasta la cola del renacuajo, que está empezando el proceso de ser absorbida en el cuerpo en crecimiento de la rana. A esta escala podemos ver gruesas fibras de músculo estriado que se apiñan a lo largo de su longitud.

Otra ronda de reducción nos permite ver que cada fibra muscular está compuesta de largas columnas de células cilíndricas cuyas contracciones periódicas son el origen de la locomoción del renacuajo. Rodeando a estos

cilindros musculares hay un denso retículo de cuerdas fibrosas: la matriz extracelular que es el objetivo de nuestra investigación. La matriz parece hallarse en un estado de flujo, pues las cuerdas individuales se desenredan para soltar células musculares atrapadas que se liberan para unirse a una masa creciente de migración celular que pasa de la cola del renacuajo, que va desapareciendo, al cuerpo de la rana.

Si nos reducimos todavía más, nos dirigimos a una de estas cuerdas que se desenredan de la matriz extracelular que se desintegra. A medida que su contorno se expande, vemos que, como una cuerda, está trenzada a partir de miles de cordones individuales de proteína, cada uno de los cuales es un manojo de fibras de colágeno. Cada fibra está constituida por tres bramantes de proteína, de colágeno (aquellas cuentas de aminoácido en un cordel que antes mencionamos, cuando discutíamos sobre el hueso de dinosaurio), pero se enrollan cada una sobre las otras para producir una dura sarta helicoidal, algo así como el ADN, pero de tres hebras en lugar de dos. Y aquí, por último, vemos el objetivo de nuestra expedición: una molécula del enzima colagenasa. Su estructura tiene el aspecto de una almeja sujeta a una de las fibras de colágeno, a lo largo de la cual se desliza, separando las hebras de la triple hélice antes de cortar sencillamente los enlaces peptídicos que conectan las cuentas de los aminoácidos. La cadena que, de otro modo, podría permanecer intacta durante millones de años, se rompe en un instante. Ahora nos acercaremos todavía más para ver exactamente cómo funciona esta acción de desmochar.

Nuestro siguiente episodio de reducción nos lleva hasta la escala molecular de solo unos pocos nanómetros (millonésimas de milímetro). Es difícil comprender lo minúscula que es realmente esta escala, de manera que para ofrecer al lector una mejor idea, considere el tamaño de la letra «o» en esta página: si el lector pudiera reducirse desde su tamaño normal hasta la escala nanométrica, entonces para él dicha «o» tendría aproximadamente el tamaño de todo Estados Unidos de América. A esta escala podemos ver que el interior de la célula se halla atestado de moléculas de agua, iones \* metálicos y una variedad enorme y diversa de biomoléculas, que incluye gran cantidad de estos aminoácidos de extrañas formas. Ese estanque molecular atestado y atareado se halla en un estado de agitación y turbulencia constantes, con las moléculas girando y vibrando, rebotando entre sí en este movimiento molecular parecido al de las bolas de billar que encontramos en el capítulo anterior.

Y allí, entre toda esta actividad molecular turbulenta y aleatoria, hay estos enzimas de aspecto de almeja que se deslizan a lo largo de las fibras de colágeno

y se mueven de una manera muy distinta. A esta escala podemos acercarnos a un único enzima a medida que se abre camino recortando la cadena de proteína que es el colágeno. A primera vista, la forma general de la molécula del enzima tiene un aspecto más bien grumoso y amorfo, lo que da la falsa impresión de que se trata de un conjunto de partes relativamente desorganizado. Pero la collagenasa, como todos los enzimas, tiene una estructura precisa, en la que cada átomo ocupa un lugar específico dentro de la molécula. Y, en contraste con los empujones moleculares aleatorios de las moléculas circundantes, el enzima efectúa una danza molecular elegante y precisa al tiempo que se enrolla alrededor de la fibra de colágeno, desenredando los giros helicoidales de la fibra y recortando de manera precisa los enlaces peptídicos que unen a los aminoácidos en la cadena antes de desenrollarse y desplazarse a lo largo de esta para recortar el siguiente enlace peptídico de la cadena. No se trata de las versiones miniaturizadas de máquinas hechas por el hombre cuyas operaciones están impulsadas, a un nivel molecular, por el movimiento caótico parecido al de las bolas de billar de billones de partículas que se mueven al azar. Estas nanomáquinas de la naturaleza ejecutan, a un nivel molecular, una danza cuidadosamente coreografiada cuyas acciones han sido preparadas con precisión por millones de años de selección natural para manipular el movimiento de las partículas fundamentales de la materia.

Para echar un vistazo más detenido a la acción de cortar, descendemos a la hendidura en forma de mandíbula del enzima que mantiene al sustrato en su sitio: la cadena de proteína que es el colágeno y una única molécula de agua. Este es el lugar activo del enzima: su extremo funcional que acelera la rotura de enlaces peptídicos al doblar el cuello del reloj de arena de la energía. La acción coreografiada que tiene lugar en el seno de su centro directivo molecular es muy diferente de todos los empujones aleatorios que tienen lugar fuera del enzima y a su alrededor, y desempeña un papel desproporcionadamente importante en la vida de toda la rana.

El lugar activo del enzima se ilustra en la figura 3.4. Si se compara este esquema con la figura 3.3, puede verse que el enzima sujeta el enlace peptídico en el estado de transición inestable que ha de alcanzarse antes de que el enlace pueda romperse. Los sustratos están apersogados mediante enlaces químicos débiles, que se indican mediante líneas discontinuas en la figura, que esencialmente son electrones que se comparten entre el sustrato y el enzima. Esta atadura mantiene a los sustratos en una configuración precisa, lista para la acción sajadora de las fauces moleculares del enzima.

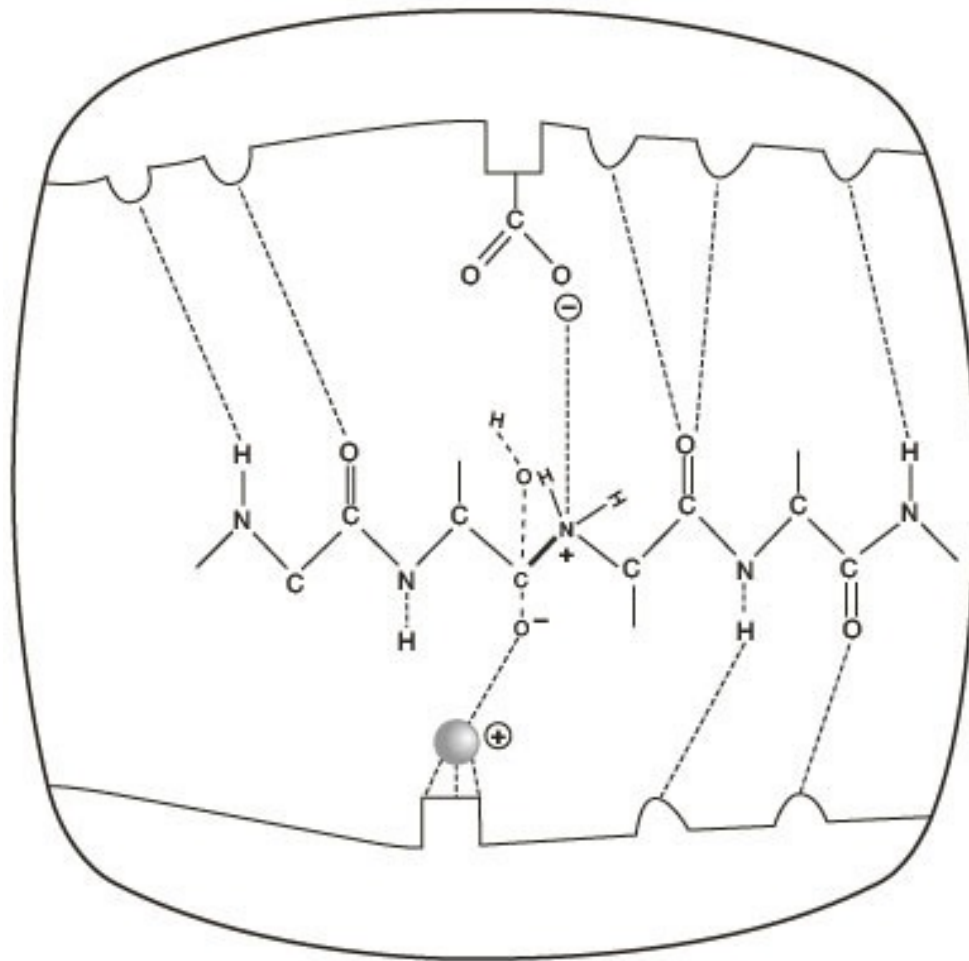


FIGURA 3.4. Rotura del enlace peptídico (línea gruesa) del colágeno en el lugar activo de la collagenasa. El estado de transición del sustrato se muestra mediante las líneas de trazos. La esfera a la izquierda del centro en la parte inferior es el ion zinc con carga positiva; el grupo carboxilo (COO) de la parte superior corresponde a un aminoácido, el glutamato, en el lugar activo del enzima. Adviértase que las distancias moleculares no se han dibujado a escala.

Cuando las fauces del enzima se cierran, hacen algo mucho más sutil que simplemente «morder» el enlace: proporcionan los medios por los que la catálisis puede tener lugar. Vemos un átomo grande con carga positiva que cuelga directamente debajo del enlace peptídico objetivo que está girando hasta su posición. Es un átomo de zinc con carga positiva. Si consideramos que el lugar activo del enzima son sus fauces, entonces el átomo de zinc es uno de sus dos incisivos. El átomo con carga positiva arranca un electrón del átomo de oxígeno de los sustratos para estabilizar el estado de transición y de esta manera deformar el paisaje energético: al reloj de arena se le acaba de ensanchar el cuello.

El resto de la tarea lo realiza el segundo incisivo molecular del enzima. Este es

uno de los aminoácidos propios del enzima, el glutamato, que se ha situado en posición haciendo colgar su oxígeno cargado negativamente sobre el enlace peptídico objetivo. Su papel es primero arrancar un protón con carga positiva de la molécula de agua apersogada. Después escupe este protón en el átomo de nitrógeno situado en un extremo del enlace peptídico objetivo, dándole una carga positiva que atrae electrones del enlace peptídico. El lector recordará que los electrones proporcionan el pegamento de los enlaces químicos; de modo que hacer salir el electrón es como extraer el pegamento de una unión enlazada, que hace que se debilite y se rompa. <sup>5</sup> Unas cuantas redistribuciones de electrones más y las fauces moleculares del enzima expulsan los productos de la reacción, las cadenas peptídicas rotas. Una reacción que de otro modo podría durar más de sesenta y ocho millones de años se ha completado en cuestión de nanosegundos.

Pero ¿dónde aparece en escena la mecánica cuántica? A fin de apreciar por qué necesitamos la mecánica cuántica para explicar la catálisis enzimática, haremos una pausa momentánea para considerar de nuevo aquellos descubrimientos que hicieron los pioneros de la mecánica cuántica. Ya hemos mencionado el papel especial que desempeñan aquellas contadas partículas en el sitio activo del enzima cuyos movimientos coreografiados suponen un contraste absoluto con el zarandeo molecular aleatorio que se da en todos los otros lugares del ambiente molecular. Aquí, biomoléculas muy estructuradas interactúan de maneras muy específicas con otras biomoléculas muy estructuradas. Esto puede interpretarse como la amplificación dictatorial de Jordan o el «orden a partir del orden» de Erwin Schrödinger que se extiende desde la rana en desarrollo, a través de sus tejidos y células organizados, hasta las fibras que mantienen unidos dichos tejidos y células y el movimiento coreografiado de partículas fundamentales dentro del lugar activo de la colagenasa que remodela dichas fibras y con ello afecta al desarrollo de toda la rana. Tanto si escogemos el modelo de Jordan como si optamos por el de Schrödinger, es evidente que lo que está sucediendo aquí es muy diferente del movimiento molecular caótico que hace que los trenes suban las cuestas.

Pero ¿acaso este orden molecular permite que entre en juego en la vida un conjunto diferente de reglas, como afirmaba Schrödinger? Para descubrir la respuesta a esta pregunta, debemos saber algo más acerca de este conjunto diferente de reglas que opera a la escala de lo muy pequeño.

¿LO EXPLICA TODO LA TEORÍA DEL ESTADO DE TRANSICIÓN?

Este movimiento molecular coreografiado, ¿implica necesariamente a la mecánica cuántica? Hemos descubierto que la capacidad de la colagenasa de acelerar la rotura de los enlaces peptídicos incluye varios de los mecanismos catalíticos que los químicos emplean de forma habitual para acelerar las reacciones químicas, sin recurrir a la mecánica cuántica. Por ejemplo, el átomo metálico del zinc en el lugar activo del enzima parece que desempeña un papel similar al del metal platino caliente que Peregrine Phillips usó en el siglo XIX para acelerar la fabricación de ácido sulfúrico. Estos catalizadores inorgánicos se basan en movimientos moleculares aleatorios, y no en acciones coreografiadas, para situar sus grupos catalíticos cerca de sus sustratos, y de esta forma acelerar sus reacciones químicas. ¿Acaso la catálisis enzimática es solo un conjunto de varios mecanismos catalíticos clásicos apretujados en los lugares activos, con lo que proporcionan la chispa vital que prende la vida?

Hasta hace muy poco, casi todos los enzímólogos habrían dicho que sí; se consideraba que la teoría del estado de transición, con su descripción de los distintos procesos que contribuyen a extender la vida del estado de transición intermedio, era la mejor explicación de cómo funcionan los enzimas. Pero una vez que se tenían en cuenta todos los factores conocidos que contribuían a ello, surgían algunas dudas. Por ejemplo, se conoce bien cada uno de los diferentes mecanismos posibles que pueden acelerar la reacción de corte de los péptidos, lo que ya se ha comentado en este capítulo, y que provocan, de manera individual, factores de mejora que multiplican el proceso por un factor de cien, aproximadamente. Pero incluso si se multiplican entre sí todos estos factores, lo más que se puede obtener es un factor de alrededor de un millón de veces en la tasa de reacción. Esta es una cifra exigua comparada con los tipos de aumento de la tasa que se sabe que los enzimas producen: parece que existe un espacio embarazosamente grande entre la teoría y la realidad.

Otro enigma es cómo varios tipos de cambio en la estructura de los enzimas afectan a la actividad de estos. Por ejemplo, como todos los enzimas, la colagenasa consiste esencialmente en un chasis de proteína sobre una hebra que sostiene las fauces y dientes del enzima dentro de su lugar activo. Cabría esperar que los cambios de los aminoácidos que forman sus fauces y dientes tuvieran un impacto enorme en la eficiencia de un enzima, y de hecho así es. Lo que es más sorprendente es el descubrimiento de que cambiar los aminoácidos de un enzima que se hallan lejos del lugar activo puede tener asimismo efectos espectaculares sobre su eficiencia. La razón por la cual estas modificaciones supuestamente inocuas de la estructura del enzima suponen una diferencia tan drástica sigue



siendo un gran misterio dentro de la teoría estándar del estado de transición; pero resulta tener sentido si se toma en consideración la mecánica cuántica. Volveremos a este descubrimiento en el capítulo final del libro.

Pero otro problema es que, hasta el presente, la teoría del estado de transición no ha conseguido producir enzimas artificiales que funcionen tan bien como los reales. El lector recordará la famosa máxima de Feynman: «Lo que no podemos hacer, no lo entendemos». Ello es relevante para los enzimas porque, a pesar de que sabemos muchas cosas de los mecanismos enzimáticos, hasta ahora nadie ha conseguido diseñar un enzima a partir de cero que pueda producir nada que se parezca a los aumentos en las tasas que producen los enzimas naturales. <sup>6</sup> Según el criterio de Feynman, todavía no sabemos cómo funcionan los enzimas.

Pero démosle otra ojeada a la figura 3.4 y formulemos la siguiente pregunta: ¿qué está haciendo el enzima? La respuesta es muy evidente: los enzimas manipulan los átomos, protones y electrones individuales, dentro de las moléculas y entre ellas. Hasta ahora, en este capítulo hemos considerado que estas partículas se comportan como si fueran diminutas masas de carga eléctrica que son impulsadas y atraídas de un lugar a otro como si fueran moléculas que se movieran al estilo de un taco que golpea una bola. Pero como vimos en nuestras exploraciones del último capítulo, los electrones, los protones e incluso los átomos enteros son muy diferentes de estas bolas de billar clásicas porque se ajustan a las reglas de la mecánica cuántica, incluidas las extrañas que dependen de la coherencia pero que normalmente son filtradas al nivel macroscópico de las bolas de billar por aquel proceso de decoherencia. Al fin y al cabo, las bolas de billar no son modelos buenos para las partículas fundamentales; de modo que, para comprender la acción real que tiene lugar dentro de los lugares activos de los enzimas, hemos de dejar atrás nuestras preconcepciones clásicas y penetrar en el extraño mundo de la mecánica cuántica, en el que los objetos pueden hacer dos o cien cosas a la vez, pueden poseer conexiones fantasmales y pueden atravesar barreras aparentemente impenetrables. Estas son hazañas que ninguna bola de billar ha logrado nunca.

#### ZARANDEANDO A LOS ELECTRONES

Como hemos descubierto, una de las actividades clave de los enzimas consiste en desplazar a los electrones dentro de las moléculas de sustrato, por ejemplo cuando la collagenasa introduce y extrae electrones de la molécula de péptido. Pero de la misma manera que se zarandea a los electrones dentro de las

moléculas, también se los puede transmitir de una molécula a otra.

Un tipo muy común de reacción de transferencia de electrones en química tiene lugar durante un proceso llamado «oxidación». Esto es lo que ocurre cuando quemamos en el aire combustibles basados en el carbono, como el carbón. La esencia de la oxidación es el movimiento de electrones desde una molécula donante a una aceptante. Cuando quemamos un pedazo de carbón, los electrones de alta energía de los átomos de carbono se desplazan para formar enlaces de energía menor dentro de átomos de oxígeno, lo que da origen al dióxido de carbono. La energía excedentaria se libera en forma del calor de un fuego de carbón. Empleamos esta energía térmica para caldear nuestros hogares, cocinar nuestra comida y transformar el agua en el vapor que impulsa un motor o hace girar una turbina para generar electricidad. Pero la quema de carbón y los motores de combustión interna son dispositivos relativamente toscos e ineficaces para utilizar la energía de los electrones. Hace muchísimo tiempo que la naturaleza descubrió un medio mucho más eficiente de captar esta energía: mediante el proceso de respiración.

Tendemos a pensar que la respiración es el proceso fisiológico que lleva el mismo nombre: \* introducir en nuestros pulmones el oxígeno que necesitamos y expulsar el dióxido de carbono como producto de desecho. Pero la respiración es, en realidad, una combinación de los pasos primero (la entrega de oxígeno) y último (la expulsión de dióxido de carbono) de un proceso molecular mucho más complejo y ordenado que funciona dentro de nuestras células. Tiene lugar en el seno de orgánulos \*\* complejos llamados mitocondrias, que tienen un aspecto parecido a células bacterianas atrapadas dentro de nuestras propias células animales, que son mayores, puesto que también poseen estructuras internas tales como membranas, e incluso su propio ADN. De hecho, es casi seguro que las mitocondrias evolucionaron a partir de bacterias simbiotas que se instalaron dentro del antepasado de las células de animales y plantas hace cientos de millones de años y después perdieron la capacidad de vivir de forma independiente. Pero su abolengo como unas células bacterianas que vivían de forma independiente tal vez explique por qué son capaces de efectuar un proceso tan extraordinariamente intrincado como es la respiración. De hecho, en términos de complejidad química, la respiración quizá solo le va a la zaga a la fotosíntesis, con la que nos toparemos en el capítulo siguiente.

Para considerar el papel que la mecánica cuántica desempeña aquí, será necesario que simplifiquemos la manera en que opera la respiración. Y, aunque sea de manera simplificada, ello implica una notable secuencia de procesos que

transmiten magníficamente la maravilla de estas nanomáquinas biológicas. Se inicia con la quema de un combustible basado en el carbono; en este caso, los nutrientes que obtenemos de nuestros alimentos. Por ejemplo, en nuestro tubo digestivo, los carbohidratos se descomponen para producir azúcares, como la glucosa, que pasan al torrente sanguíneo y después se distribuyen a las células ansiosas de energía. La sangre transporta desde los pulmones a las mismas células el oxígeno necesario para quemar este combustible. Al igual que ocurre con la quema de carbón, los electrones en las órbitas exteriores de los átomos de carbono de una molécula se transfieren a una molécula llamada NADH. \* Pero en lugar de ser usados inmediatamente para enlazarse a los átomos de oxígeno, los electrones son transmitidos de un enzima a otro a lo largo de una cadena respiratoria de enzimas del interior de nuestras células, de manera parecida a como el testigo es pasado de un corredor a otro en una carrera de relevos. En cada paso de la transferencia el electrón cae a un estado de energía inferior y la diferencia energética se utiliza para proporcionar energía a enzimas que bombean protones de las mitocondrias. El gradiente de protones resultante desde el exterior al interior de las mitocondrias se utiliza entonces para impulsar la rotación de otro enzima, la llamada ATPasa, que produce una molécula denominada ATP (nucleótido adenosín trifosfato). El ATP es muy importante en todas las células vivas, pues actúa como una especie de batería energética que puede ser transportada fácilmente por toda la célula para proporcionar energía a multitud de actividades que la necesitan, como desplazar cuerpos o construirlos.

La función de los enzimas que son accionados por electrones y bombean protones es algo parecida a la de las bombas hidroeléctricas que almacenan el excedente de energía bombeando el agua cuesta arriba. La energía almacenada puede liberarse posteriormente dejando que el agua que fluye cuesta abajo haga girar un motor de turbina que genera energía eléctrica. De manera parecida, los enzimas respiratorios bombean protones de las mitocondrias. Cuando los protones vuelven a entrar, suministran energía a las rotaciones del enzima ATPasa, que es como una turbina. Estas rotaciones impulsan otro conjunto de movimientos moleculares coreografiados que sujetan un grupo fosfato de elevada energía química a una molécula del interior del enzima para producir ATP.

Si extendemos la analogía de este proceso de captación de energía como una carrera de relevos, podemos imaginar que el testigo es sustituido por una botella de agua (que representa la energía de los electrones), de la que cada corredor (enzima) toma un sorbo de líquido y después pasa la botella al siguiente, antes

de que finalmente el resto del agua se vierta en un cubo llamado oxígeno. Esta captación de la energía de los electrones en pequeñas dosis hace que todo el proceso sea mucho más eficiente que si se limitase a verterla directamente en el oxígeno, pues se desperdicia muy poca energía en forma de calor.

De modo que los acontecimientos clave de la respiración a la escala celular tienen, en realidad, muy poco que ver con el proceso de respiración a la escala del individuo, sino que consisten en cambio en una transferencia ordenada de electrones mediante un relevo de enzimas respiratorios en el seno de nuestras células. Cada evento de transferencia de electrones, entre un enzima y el siguiente en el relevo, tiene lugar salvando una brecha de varias decenas de angstroms (una distancia de muchos átomos), que es una distancia muy superior a la que se pensaba que era posible para los saltos convencionales de los electrones. El enigma de la respiración es cómo estos enzimas pueden desplazar a los electrones de manera tan rápida y eficiente a través de espacios moleculares tan grandes.

Esta pregunta la planteó ya en la década de 1940 Albert Szent-Györgyi, un bioquímico austrohúngaro y estadounidense que obtuvo el premio Nobel de Medicina en 1937 por su participación en el descubrimiento de la vitamina C. En 1941, Szent-Györgyi dictó una conferencia titulada «Hacia una nueva bioquímica», en la que defendió que la manera en que los electrones fluyen con facilidad a través de las biomoléculas es parecida a cómo se mueven en materiales semiconductores como los cristales de silicio utilizados en electrónica. Por desgracia, solo unos pocos años después se descubrió que las proteínas son, de hecho, bastante malas conductoras de la electricidad, de modo que los electrones no podían fluir tan fácilmente a través de los enzimas de la manera que Szent-Györgyi pensaba.

Durante la década de 1950 se hicieron grandes progresos en el campo de la química, en particular por parte del químico canadiense Rudolph Marcus, quien desarrolló una potente teoría que hoy en día lleva su nombre (teoría de Marcus) y que explica la tasa a la que los electrones pueden desplazarse o saltar entre diferentes átomos o moléculas. También él recibió por su trabajo un premio Nobel, de Química, en 1992.

Pero hace medio siglo, seguía siendo un enigma la cuestión de la manera en que los enzimas respiratorios en particular podían estimular una transferencia de electrones tan rápida a través de distancias moleculares relativamente grandes. Una hipótesis defendía que las proteínas podían girar en secuencia como máquinas de relojería, con lo que acercarían mucho moléculas distantes, de

manera que los electrones podrían salvar la distancia con facilidad. Una predicción importante de estos modelos era que este mecanismo se haría espectacularmente lento a temperaturas bajas, cuando hay menos energía térmica para impulsar el movimiento de relojería. Pero en 1966, uno de los primeros descubrimientos reales en el campo de la biología cuántica surgió de los experimentos de dos químicos estadounidenses, Don DeVault y Britton Chance, de la Universidad de Pensilvania. Demostraron que, en contra de lo que cabía esperar, la tasa de salto de electrones en los enzimas respiratorios no se reducía a temperaturas bajas. <sup>7</sup>

Don DeVault había nacido en Michigan en 1915 pero se mudó al oeste con su familia durante la Depresión. Estudió en Caltech y Berkeley, en California, y se doctoró en química en 1940. Era un activista comprometido con los derechos humanos y pasó algunas temporadas en prisión durante la Segunda Guerra Mundial por su actitud como objetor de conciencia. En 1958 renunció a su puesto de profesor de química en la Universidad de California para mudarse a Georgia, de modo que pudo implicarse directamente en la lucha por la igualdad racial y la integración en el sur. Sus fuertes convicciones, su dedicación a la causa y la adopción de la protesta pacífica lo expusieron al riesgo de los ataques físicos durante las marchas con activistas negros. En una ocasión incluso le rompieron la mandíbula, cuando un piquete atacó su grupo de manifestantes, que estaba compuesto por personas de todas las razas. Pero esto no lo disuadió de su lucha.

En 1963, DeVault fue a trabajar a la Universidad de Pensilvania con Britton Chance, un hombre que solo tenía dos años más que él y que ya se había ganado una reputación mundial como uno de los principales científicos de su campo. Chance había obtenido no un doctorado, sino dos, el primero en química física y el otro en biología. De modo que su «campo» de experiencia era muy amplio y sus intereses de investigación diversos. Había pasado gran parte de su carrera trabajando sobre la estructura y función de los enzimas, mientras sacaba tiempo para ganar una medalla de oro en vela para Estados Unidos en las Olimpiadas de 1952.

A Britton Chance le había intrigado un mecanismo por el que la luz puede promover la transferencia de electrones desde el citocromo, un enzima respiratorio, al oxígeno. Junto con Mitsuo Nishimura, Chance encontró que esta transferencia tiene lugar en la bacteria *Chromatium vinosum* aun cuando sus células se hayan enfriado a una helada temperatura de  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$  \* mediante nitrógeno líquido. Pero todavía se desconocía la manera en que este proceso

variaba al cambiar la temperatura, lo que podría proporcionar pistas para el mecanismo molecular implicado. Lo que se necesitaba, comprendió Chance, era iniciar la reacción muy rápidamente con un destello luminoso muy breve, pero intenso. Y aquí es donde intervino la pericia de Don DeVault. Había pasado algunos años trabajando como asesor en materia de electricidad para una pequeña compañía que desarrollaba un láser que podía proporcionar exactamente estos breves pulsos de luz.

Juntos, DeVault y Chance diseñaron un experimento en el que un láser de rubí disparaba un breve destello de brillante luz roja durante solo treinta nanosegundos (treinta milmillonésimas de segundo) a células bacterianas repletas de enzimas respiratorios. Encontraron que a medida que reducían la temperatura, la tasa de transferencia de electrones caía hasta que, hacia los 100 K (o  $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), el tiempo de reacción de la transferencia de electrones era unas mil veces más lento que a temperatura ambiente. Esto es lo que cabía esperar si el proceso de transferencia de electrones lo impulsaba primariamente la cantidad de energía térmica implicada. Sin embargo, cuando DeVault y Chance redujeron la temperatura por debajo de los 100 K, sucedió algo extraño. En lugar de caer a valores inferiores, la tasa de transferencia de electrones pareció haber alcanzado una meseta, y permaneció constante a pesar de una ulterior reducción de la temperatura, hasta 35 K por encima del cero absoluto ( $-238\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Esto indicaba que el mecanismo de transferencia de electrones no puede deberse únicamente al salto «clásico» de electrones antes descrito. Parece ser, pues, que la respuesta reside en el mundo cuántico, y de manera más específica en el extraño proceso del efecto de túnel cuántico que vimos en el capítulo 1.

## EFFECTO DE TÚNEL CUÁNTICO

El lector recordará del capítulo 1 que el efecto de túnel cuántico es el peculiar proceso cuántico que permite que las partículas atraviesen barreras impenetrables tan fácilmente como el sonido atraviesa paredes. Lo descubrió el físico alemán Friedrich Hund en 1926, y poco después se utilizó con éxito para explicar el concepto de desintegración radiactiva por parte de George Gamow, Ronald Gurney y Edward Condon, todos los cuales emplearon la matemática entonces nueva de la mecánica cuántica. El efecto de túnel cuántico se convirtió en una característica esencial de la física nuclear, pero posteriormente se apreció que era un fenómeno con aplicaciones más amplias en ciencia de materiales y química. Como ya hemos visto, es esencial para la vida en la Tierra, pues

permite que pares de núcleos de hidrógeno cargados positivamente en el interior del Sol se fusionen en el primer paso de convertir el hidrógeno en helio, con lo que liberan la vasta energía del Sol. Sin embargo, hasta hace poco no se pensaba que estuviera implicado en ningún proceso de la vida.

Podemos plantearnos el efecto de túnel cuántico como el medio por el que las partículas pueden pasar de un lado a otro de una barrera de una manera que el sentido común nos dice que sería imposible. Por «barrera» queremos decir aquí una región del espacio infranqueable en términos físicos (sin la energía suficiente): piense el lector en los campos de fuerza que se usan en los relatos de ciencia ficción. Esta región puede consistir en un estrecho material aislante que separa dos lados de conductores eléctricos, o incluso espacio vacío, como el hueco entre dos enzimas en una cadena respiratoria. Puede ser también el tipo de colina de energía que ya hemos descrito (véase figura 3.1). Considere el lector el ejemplo de una bola que se empuja hacia la parte superior de una pequeña colina. Para que alcance la cima y caiga rodando por el otro lado se le ha de dar un empujón lo bastante fuerte. A medida que sube cuesta arriba, su velocidad se irá reduciendo y, si no tiene la suficiente energía (un impulso lo bastante fuerte), simplemente se detendrá y caerá rodando por el camino que siguió al subir. Según la mecánica newtoniana clásica, la única manera de que una bola pueda atravesar una barrera es que posea la energía suficiente para pasar por encima de la colina de energía. Pero si esta bola fuera un electrón, pongamos por caso, y la colina una barrera de energía repulsiva, entonces habría una pequeña probabilidad de que el electrón fluyera a través de la barrera en forma de onda, con lo que esencialmente conseguiría pasar a su través de forma alternativa y más eficiente. Esto es el efecto de túnel cuántico (véase figura 3.5).

Una característica importante de la mecánica cuántica es que cuanto más ligera sea la partícula, más fácil será que produzca un túnel. Por lo tanto, no es sorprendente que una vez que se comprendió que este proceso era una característica general del mundo subatómico, se encontró que el efecto de túnel de los electrones era el más común, pues estos son partículas elementales muy ligeras. La emisión de electrones por parte de metales se explicó como un efecto de túnel a finales de la década de 1920. El efecto de túnel cuántico explicaba también cómo tiene lugar la desintegración radiactiva: cuando determinados núcleos atómicos, como los del uranio, expulsan una partícula de manera ocasional. Esta fue la primera aplicación exitosa de la mecánica cuántica a los problemas de la física nuclear. En química, el efecto de túnel cuántico de electrones, protones (núcleos de hidrógeno) e incluso de átomos más pesados es

algo que hoy se comprende bien.

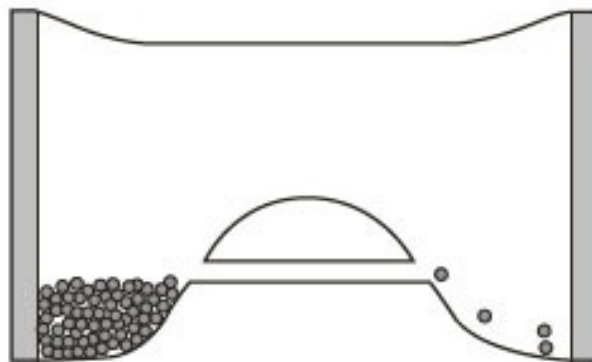


FIGURA 3.5. Efecto de túnel cuántico a través del paisaje energético.

Una característica esencial del efecto de túnel cuántico es que, al igual que otros muchos fenómenos cuánticos, depende de la naturaleza como de onda extendida de las partículas de materia. Pero para que un cuerpo constituido por muchísimas partículas produzca el efecto de túnel, debe mantener los aspectos ondulatorios de todos sus constituyentes moviéndose al unísono, con los picos y los valles de las ondas coincidiendo, algo a lo que nos referimos al decir que el sistema es coherente, o simplemente «afinado». La decoherencia describe el proceso en el que todas las numerosas ondas cuánticas dejan de moverse rápidamente al compás unas con respecto a las otras y deshacen cualquier comportamiento general coherente, con lo que destruyen la capacidad del cuerpo de presentar el efecto de túnel cuántico. Para que una partícula presente efecto de túnel cuántico debe permanecer ondulatoria con el fin de filtrarse a través de la barrera. Por este motivo los objetos grandes, como los balones de fútbol, no presentan efecto de túnel cuántico: están constituidos por billones de átomos que no pueden comportarse de una manera ondulatoria, coordinada y coherente.

Según las normas cuánticas, las células vivas son asimismo objetos grandes, de modo que, a primera vista, parecería improbable que se pudiera encontrar efecto de túnel cuántico dentro de células cálidas y húmedas cuyos átomos y moléculas se estarían moviendo, en su mayoría, de manera incoherente. Pero, como hemos descubierto, el interior de un enzima es diferente: sus partículas se dedican a una danza coreográfica más que a un devaneo caótico. De modo que vamos a explorar de qué manera esta coreografía puede marcar la diferencia para la vida.



El inesperado perfil térmico del experimento de 1966 de DeVault y Chance tardó varios años en poder explicarse de manera completa. Otro científico estadounidense cuyo trabajo se ha extendido por muchas disciplinas, que van desde la biología molecular a la física y la informática, es John Hopfield. Más conocido por el desarrollo de redes neurales en informática, Hopfield estaba sin embargo muy interesado en los procesos físicos implicados en biología. En 1974 publicó un artículo titulado «Transferencia de electrones entre moléculas biológicas mediante efecto de túnel activado térmicamente», [8](#) en el que desarrollaba un modelo teórico para explicar el resultado de DeVault y Chance. Hopfield señalaba que a una temperatura elevada la energía vibratoria de las moléculas sería suficiente para permitir que los electrones saltaran por encima de una barrera sin efecto de túnel. A medida que la temperatura se redujera, no habría suficiente energía vibratoria para que tuviera lugar la reacción enzimática. Pero DeVault y Chance habían encontrado que la reacción sí se producía a temperaturas bajas. Por lo tanto, Hopfield sugería que a estas temperaturas más bajas el electrón es elevado a un estado que se encuentra a medio camino de la cuesta de energía, donde la distancia que tiene que recorrer es más corta que cuando se encuentra en la parte baja de la cuesta, lo que aumenta sus probabilidades de producir un efecto de túnel a través de la barrera. Y estaba en lo cierto: la transferencia de electrones mediada por el efecto de túnel tiene lugar incluso a temperaturas muy bajas, tal como DeVault y Chance habían encontrado.

En la actualidad, pocos científicos dudan de que los electrones se desplacen a lo largo de las cadenas respiratorias mediante efecto de túnel cuántico. Esto sitúa, sin la menor duda, a las más importantes reacciones de captación de energía en los animales y en las células microbianas no fotosintéticas (trataremos de las fotosintéticas en el siguiente capítulo) dentro de la esfera de la biología cuántica. Pero los electrones son muy livianos, incluso para los estándares del mundo cuántico, y resulta inevitable que su comportamiento sea muy «ondulatorio». Por lo tanto, no cabe considerar que se desplazan y saltan como minúsculas partículas clásicas, a pesar del hecho de que todavía se los trata de esta manera en muchos textos convencionales de biología que siguen empleando el modelo de «sistema solar» del átomo. Una representación mucho más apropiada de los electrones en un átomo es una nube extendida y ondulante de «electronicidad» que rodea al núcleo minúsculo, la «nube de probabilidad» de la

que hablamos en el capítulo 1. Por lo tanto, quizá no sea sorprendente que las ondas de electrones puedan atravesar barreras de energía, de la misma manera que las ondas sonoras atraviesan paredes, como describimos en el primer capítulo, incluso en los sistemas biológicos.

Pero ¿qué hay de las partículas mayores, como los protones o incluso átomos enteros? ¿Acaso estas también pueden producir efecto de túnel cuántico en los sistemas biológicos? A primera vista pensaríamos que la respuesta sería que no. Incluso un único protón es dos mil veces más pesado que un electrón, y se sabe que el efecto de túnel cuántico es exquisitamente sensible a lo voluminosa que sea la partícula que perfora el túnel: las partículas pequeñas perforan con facilidad, mientras que las partículas pesadas son mucho más resistentes a abrir túneles, a menos que las distancias a cubrir sean muy cortas. Pero experimentos recientes y notables indican que incluso estas partículas relativamente voluminosas son capaces de producir el efecto de túnel cuántico en las reacciones enzimáticas.

#### TRASEGANDO PROTONES

El lector recordará que, además de promover la transferencia de electrones, una de las actividades clave del enzima colagenasa (véase figura 3.4) es desplazar protones para promover la rotura de la cadena de colágeno. Como ya se ha indicado, este tipo de reacción es uno de los trucos de manipulación de partículas más comunes que efectúan los enzimas. Alrededor de un tercio de todas las reacciones enzimáticas implican desplazar un átomo de hidrógeno de un lugar a otro. Adviértase que «átomo de hidrógeno» puede significar varias cosas: puede tratarse de un átomo de hidrógeno neutro (H), que consiste en un electrón alrededor de su núcleo (un protón); podría ser un ion hidrógeno con carga positiva ( $H^+$ ), que es solo un núcleo pelado (un protón sin electrón); o podría ser incluso un ion hidruro con carga negativa, que es un átomo de hidrógeno con un electrón adicional ( $H^-$ ).

Como cualquier químico o bioquímico que se respete nos dirá rápidamente, trasegar átomos de hidrógeno (bueno, protones) dentro de moléculas o entre ellas no implica necesariamente ningún efecto cuántico; o, al menos, ninguno que requiera que apelemos explícitamente a los extrañísimos procesos del mundo cuántico, como el efecto de túnel. De hecho, para la mayoría de las reacciones químicas que tienen lugar con el rango de temperaturas a las que opera la vida, se cree que los protones se mueven sobre todo mediante saltos térmicos no

cuánticos de una molécula a otra. Pero el efecto de túnel en protones se da en unas pocas reacciones químicas que pueden identificarse por su relativa indiferencia a la temperatura, tal como DeVault y Chance habían demostrado en lo relativo al efecto de túnel en electrones.

La vida opera a temperaturas elevadas, según las pautas del mundo cuántico. Así, durante la mayor parte de la historia de la bioquímica, los científicos asumieron que la transferencia enzimática de protones era mediada enteramente por un mecanismo no cuántico: saltar por encima de la barrera de energía. \* Pero esta idea cambió en 1989 cuando Judith Klinman y sus colegas de Berkeley proporcionaron las primeras pruebas directas de efecto de túnel en protones en reacciones enzimáticas. 9 Klinman es una bioquímica que lleva tiempo insistiendo en la importancia del efecto de túnel en protones en la maquinaria molecular de la vida. En realidad, ha llegado al extremo de afirmar que es uno de los mecanismos más importantes y generalizados de toda la biología. Su descubrimiento provino de un estudio de un enzima particular en la levadura llamado alcohol deshidrogenasa (ADH), cuya tarea consiste en transferir un protón de una molécula de alcohol a otra pequeña molécula llamada NAD<sup>+</sup> para formar NADH (dinucleótido de nicotinamida y adenina, una molécula con la que ya nos hemos encontrado antes y que es el principal transportador de electrones de la célula). El equipo pudo confirmar la presencia de efecto de túnel en protones al utilizar una ingeniosa técnica llamada «efecto isotópico cinético». Esta idea es bien conocida en el campo de la química y merece que la expliquemos en detalle, pues permite proporcionar una de las principales pruebas en favor de la biología cuántica y aparecerá unas cuantas veces más en este libro.

## EL EFECTO ISOTÓPICO CINÉTICO

¿Se ha encontrado alguna vez el lector con que subía una cuesta empinada en bicicleta y que la gente que iba a pie lo adelantaba? Sobre un terreno llano, no nos resulta difícil adelantar pedaleando sin esfuerzo a cualquier peatón que vaya caminando o incluso corriendo, de modo que ¿por qué perdemos efectividad en las cuestas cuando vamos en bicicleta?

Imaginemos que en lugar de ir montado en la bicicleta abandonamos el sillín y empujamos la bicicleta, o bien sobre el terreno llano, o bien cuesta arriba. Ahora la cuestión resulta evidente. En la cuesta, tenemos que empujar la bicicleta al tiempo que subimos la pendiente. El peso de la bicicleta, que era totalmente

irrelevante para su movimiento horizontal a lo largo de una carretera llana, se vuelve ahora en nuestra contra cuando intentamos subir la cuesta: debemos elevar su peso varios metros contra la atracción gravitatoria de la Tierra. Por este motivo, los fabricantes de bicicletas de carreras publicitan hasta el exceso lo ligeros que son sus modelos. Es obvio que el peso de un objeto puede marcar la diferencia en cuanto a la facilidad con que se le pueda mover; pero nuestro ejemplo de la bicicleta ilustra que esta diferencia depende del tipo de movimiento del que estemos hablando.

Imaginemos ahora que el lector quiera descubrir si el terreno que separa dos pueblos, llamémoslos pueblo A y pueblo B, es llano o montañoso, pero no puede viajar por sí mismo entre ellos. Una posible estrategia se dará cuando el lector descubra que existe un servicio postal entre dichos pueblos, que efectúan carteros que van montados en una bicicleta ligera o en una pesada. Para descubrir si el terreno intermedio es llano o montañoso, el lector solo necesita enviar por correo una serie de paquetes idénticos entre ambos pueblos, enviando la mitad de ellos mediante los carteros que montan en bicicletas livianas y el resto mediante los carteros que utilizan las más pesadas. Si el lector descubre que todos los paquetes tardan aproximadamente el mismo tiempo en entregarse, entonces puede concluir que el terreno entre los dos pueblos tal vez sea bastante llano; pero si todos los paquetes postales que llegaron sobre bicicletas pesadas tardaron mucho más, el lector llegará a la conclusión de que el terreno entre A y B es montañoso. Por lo tanto, los carteros montados en bicicleta actúan como sondas del terreno desconocido.

Los átomos de cada elemento químico se presentan, como las bicicletas, en grupos de diferentes pesos. Tomemos como ejemplo el hidrógeno, porque es a la vez el átomo más sencillo y el que más nos interesa aquí. Un elemento viene determinado por el número de protones que tiene en su núcleo (junto con el número igual correspondiente de electrones que rodean el núcleo). Así, el hidrógeno tiene un protón en su núcleo, el helio tiene dos, el litio tres, y así sucesivamente. Pero el núcleo de los átomos contiene asimismo otro tipo de partícula: el neutrón, con el que nos topamos en el capítulo 1, cuando discutíamos la fusión de núcleos de hidrógeno en el interior del Sol. Añadir neutrones al núcleo hace que el átomo sea más pesado y, por lo tanto, cambia sus atributos físicos. Los átomos de un elemento dado que poseen un número de neutrones diferente se denominan «isótopos». El isótopo normal del hidrógeno es el más ligero, constituido únicamente por un protón y un electrón. Esta es la forma más abundante de hidrógeno. Pero hay otros dos isótopos del hidrógeno,

más pesados y más raros: el deuterio (D), que tiene un neutrón además del protón en el núcleo, y el tritio (T), que contiene dos neutrones.

Puesto que las propiedades químicas de los elementos vienen determinadas principalmente por el número de electrones que contienen sus átomos, isótopos diferentes del mismo elemento, con un número distinto de neutrones en su núcleo, tendrán químicas muy parecidas, pero no idénticas. El efecto isotópico cinético implica medir lo sensible que es una reacción química al cambio de átomos, desde los isótopos ligeros a los pesados, y se define como la proporción de tasas de reacción observadas con isótopos pesados y ligeros. Por ejemplo, si el agua se halla implicada en la reacción, entonces los átomos de hidrógeno en las moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  pueden sustituirse por sus primos más pesados, el deuterio o el tritio, para producir  $\text{D}_2\text{O}$  o  $\text{T}_2\text{O}$ . Al igual que nuestros carteros ciclistas, la reacción puede ser o no sensible al peso cambiante de los átomos, en función de la ruta que los reactantes toman para ser convertidos en productos.

Hay diversos mecanismos responsables de efectos isotópicos cinéticos significativos, y uno de ellos es el efecto de túnel cuántico, que, como ir en bicicleta, es extremadamente sensible a la masa de la partícula que intenta atravesar. Aumentar la masa hace que el comportamiento de la partícula sea menos ondulatorio y, por lo tanto, menos probable que se cuele a través de una barrera energética. De modo que duplicar la masa del átomo, por ejemplo pasando del hidrógeno normal al deuterio, hace que su probabilidad de producir el efecto de túnel cuántico caiga en picado.

Por lo tanto, si se encuentra un efecto isotópico cinético grande puede ser indicativo de que el mecanismo de reacción (la ruta entre reactantes y productos) implica efecto de túnel cuántico. Sin embargo, no sería algo concluyente, puesto que el efecto podría ser atribuible a alguna química clásica (no cuántica). Pero si el efecto de túnel cuántico se halla implicado, entonces la reacción debería mostrar también una respuesta peculiar a la temperatura: su tasa debería estabilizarse a temperaturas bajas, tal como DeVault y Chance habían demostrado para el efecto de túnel cuántico. Esto es precisamente lo que Klinman y su equipo descubrieron para el enzima ADH; y el resultado proporcionó una prueba robusta de que el efecto de túnel cuántico estaba implicado en el mecanismo de la reacción.

El grupo de Klinman ha seguido recogiendo pruebas sustanciales de que el efecto de túnel cuántico tiene lugar de manera común en muchas reacciones enzimáticas a los tipos de temperatura en los que opera la vida. Otros varios grupos, como el de Nigel Scrutton, de la Universidad de Mánchester, han

realizado experimentos similares con otros enzimas y han demostrado efectos isotópicos cinéticos que señalan claramente hacia el efecto de túnel cuántico. [10](#) Pero la manera en que los enzimas mantienen la coherencia cuántica para promover el efecto de túnel sigue siendo un tema muy polémico. Ya hace algún tiempo que se sabe que los enzimas no son estáticos, sino que vibran constantemente durante sus reacciones. Por ejemplo, las «fauces» del enzima colagenasa se abren y cierran cada vez que rompen un enlace del colágeno. Se creía que estos movimientos eran incidentales al mecanismo de reacción, o que estaban implicados en la captura de los sustratos y en hacer que todos los átomos reactivos se alinearan correctamente. Sin embargo, investigadores de biología cuántica afirman ahora que estas vibraciones son los llamados «movimientos impulsores», cuya función principal es hacer que átomos y moléculas estén lo bastante cerca para permitir que sus partículas (electrones y protones) realicen el efecto de túnel cuántico. [11](#) Volveremos a este tema, uno de los campos de la biología cuántica más fascinantes y que cambia más deprisa, en el último capítulo del libro.

ASÍ PUES, ¿ESTABLECE ESTO LA PARTE CUÁNTICA DE LA BIOLOGÍA CUÁNTICA?

Los enzimas han hecho y deshecho todas y cada una de las biomoléculas del interior de cada célula que vive o ha vivido. Los enzimas son lo más cerca que hay a los factores vitales de la vida. De modo que el descubrimiento de que algunos enzimas, y posiblemente todos, funcionan promoviendo la desmaterialización de partículas de un punto del espacio y su materialización instantánea en otro nos proporciona una nueva concepción del misterio de la vida. Y aunque todavía quedan muchas cuestiones por resolver relacionadas con los enzimas, que deben comprenderse mejor, como el papel de los movimientos de las proteínas, no hay duda de que el efecto de túnel cuántico desempeña un papel en la manera en que operan.

Aun así, hemos de abordar una crítica que han hecho muchos científicos que aceptan los hallazgos de Klinman, Scrutton y otros, pero que no obstante afirman que los efectos cuánticos tienen un papel tan relevante en biología como el que desempeñan en el funcionamiento de un tren de vapor: siempre están ahí, pero son en gran medida irrelevantes para comprender cómo funcionan estos sistemas. Su argumentación suele surgir como parte de un debate acerca de si los enzimas evolucionaron o no para sacar partido de fenómenos cuánticos tales como el efecto de túnel. Los críticos aducen que la aparición de fenómenos

cuánticos en procesos biológicos es inevitable dadas las dimensiones atómicas de la mayoría de las reacciones bioquímicas. Hasta cierto punto, tienen razón. El efecto de túnel cuántico no es magia; ha tenido lugar en el universo desde su nacimiento. No es ciertamente un truco que, de alguna manera, la vida «inventó». Pero nos gustaría sostener que su aparición en la actividad enzimática está lejos de ser inevitable, dadas las condiciones cálidas, húmedas y la intensa actividad del interior de las células vivas.

Recuérdese que las células vivas son lugares extraordinariamente atestados, abarrotados de complejas moléculas en un estado de agitación y turbulencia constantes, parecido a aquel movimiento molecular similar a las bolas de billar que exploramos en el capítulo anterior y que es responsable de hacer que los trenes de vapor suban cuestas. El lector recordará que es este tipo de movimiento aleatorio el que dispersa y perturba la delicada coherencia cuántica y hace que nuestro mundo cotidiano nos parezca «normal». No cabría esperar que la coherencia cuántica sobreviviera en medio de esta turbulencia molecular, de modo que el descubrimiento de que efectos cuánticos, como el efecto de túnel, consiguen persistir en el mar de agitación molecular que es una célula viva es muy sorprendente. Después de todo, hace más o menos una década la mayoría de los científicos descartaron la idea de que el efecto de túnel y otros fenómenos cuánticos delicados pudieran tener lugar en biología. El hecho de que se hayan detectado estos fenómenos en estos hábitats sugiere que la vida toma medidas especiales para captar las ventajas que proporciona el mundo cuántico para hacer que sus células funcionen. Pero ¿qué medidas? ¿Cómo hace la vida para mantener a raya a este enemigo del comportamiento cuántico, la decoherencia? Este es uno de los mayores misterios de la biología cuántica, pero se está resolviendo lentamente, tal como descubriremos en el último capítulo.

Pero antes de seguir, volvamos allí donde dejamos a nuestro nanosubmarino: en el lugar activo del enzima colagenasa dentro de la cola de un renacuajo que iba desapareciendo. Salimos a toda prisa del lugar activo cuando las fauces vuelven a abrirse, lo que permite que la cadena de colágeno rota (¡y nosotros!) quede libre, y dejamos que el enzima en forma de almeja se disponga a cortar el siguiente enlace peptídico de la cadena. Después efectuamos una breve navegación por el resto del cuerpo del renacuajo para observar las actividades organizadas de algunos de los demás enzimas, que son igualmente fundamentales para la vida. Siguiendo a las células que migran desde la cola que se reduce hasta las patas traseras en desarrollo, vemos que nuevas fibras de colágeno se depositan, como nuevos raíles de ferrocarril, para sostener la

construcción del cuerpo de la rana adulta, a menudo a partir de células que migran desde la cola que va desapareciendo. Estas nuevas fibras son construidas por enzimas que captan las subunidades de aminoácidos que son liberadas por la colagenasa y que son fijadas de nuevo conjuntamente en nuevas fibras de colágeno. Aunque no tenemos tiempo para sumergirnos en el interior de estos enzimas, en sus lugares activos se produce el mismo tipo de movimientos coreografiados que observamos dentro del enzima colagenasa, pero ahora realizan la reacción inversa. En otras partes, diferentes enzimas hacen y deshacen todas las biomoléculas de la vida: grasas, ADN, aminoácidos, proteínas, azúcares. Asimismo, toda acción que efectúa la rana en crecimiento es mediada de manera similar por enzimas. Por ejemplo, cuando el animal ve una mosca, las señales nerviosas que transportan el mensaje desde sus ojos hasta su cerebro están mediadas por un grupo de enzimas neurotransmisores embutidos en las neuronas. Cuando dispara su lengua, las contracciones musculares que capturan a la mosca son impulsadas por otro enzima, llamado miosina, apiñado en las células musculares, que hace que dichas células se contraigan. Cuando la mosca penetra en el estómago de la rana, se libera toda una batería de enzimas para acelerar su digestión y liberar sus nutrientes para que puedan ser absorbidos. Y todavía más enzimas transforman dichos nutrientes en tejido de la rana, o captan su energía mediante enzimas respiratorios dentro de los orgánulos mitocondriales de sus células.

Toda actividad vital de las ranas y de otros seres vivos, todo proceso que los mantiene (y nos mantiene) vivos, es acelerado por enzimas, los motores de la vida, cuyo extraordinario poder catalítico lo proporciona su capacidad de coreografiar los movimientos de partículas fundamentales, y por lo tanto de hundirse en el mundo cuántico para utilizar sus extrañas leyes.

Pero el efecto de túnel no es la única ventaja potencial que la mecánica cuántica proporciona a la vida. En el próximo capítulo descubriremos que la reacción química más importante de la biosfera implica otro truco del mundo cuántico.



## LA PULSACIÓN CUÁNTICA

La sustancia de un árbol es el carbono. ¿Y de dónde vino este carbono? Viene del aire; es el dióxido de carbono del aire. La gente contempla los árboles y piensa que esta [la sustancia del árbol] procede del suelo; las plantas crecen a partir del suelo. Pero si preguntáis: «¿De dónde viene la sustancia?», descubriréis que [...] los árboles vienen del aire [...] el dióxido de carbono y el aire entran en el árbol y lo cambian, expulsando el oxígeno [...] Sabemos que el oxígeno y el carbono [en el dióxido de carbono] se hallan unidos de manera muy fuerte [...] ¿cómo consigue el árbol deshacer esto con tal facilidad? [...] Es la luz del sol que llega y hace saltar el oxígeno del carbono... ¡y que deja el carbono, y el agua, para hacer la sustancia del árbol!

RICHARD FEYNMAN [1](#)

El Instituto de Tecnología de Massachusetts, más conocido como MIT, es uno de los centros científicos neurálgicos del mundo. Fundado en 1861 en Cambridge, en Massachusetts, puede presumir de tener nueve premios Nobel actuales entre sus mil profesores (en 2014). Entre sus alumnos se cuentan astronautas (un tercio de los vuelos espaciales de la NASA estuvieron tripulados por graduados del MIT), políticos (entre ellos Kofi Annan, el antiguo secretario general de las Naciones Unidas y ganador del premio Nobel de la Paz en 2001), emprendedores como William Redington Hewlett, cofundador de Hewlett-Packard... y, desde luego, gran cantidad de científicos, entre ellos Richard Feynman, arquitecto de la electrodinámica cuántica y ganador de un premio Nobel. Pero uno de sus habitantes más ilustres no es humano; en realidad, es una planta, un manzano. Se halla en el Jardín del Presidente, a la sombra de la icónica cúpula que imita al Panteón, y es un esqueje de otro árbol que se halla en los Reales Jardines Botánicos de Inglaterra, un descendiente directo del árbol bajo el cual se hallaba supuestamente sir Isaac Newton cuando observó la caída de su famosa manzana.

La pregunta sencilla y a la vez profunda sobre la que Newton reflexionaba, sentado bajo un árbol en la granja de su madre en Lincolnshire hace tres siglos y medio, era: «¿Por qué caen las manzanas?». Tal vez parezca grosero sugerir que

su respuesta, que revolucionó la física y, de hecho, toda la ciencia, podría ser inadecuada de alguna manera; pero hay un aspecto de la famosa escena que a Newton le pasó inadvertido y que nadie se ha planteado desde entonces: ¿qué es lo que hacía la manzana allá arriba del árbol, para empezar? Si la caída acelerada de la manzana hasta el suelo era intrigante, ¿acaso no era mucho más inexplicable la combinación del aire y el agua de Lincolnshire para formar un objeto redondo colgado de las ramas de un árbol? ¿Por qué meditó Newton acerca del asunto en apariencia trivial de la atracción de la gravedad de la Tierra sobre la manzana y pasó totalmente por alto el enigma absolutamente incomprensible y previo de la formación del fruto?

Un factor que podría explicar la falta de curiosidad de Isaac Newton sobre este aspecto era la idea predominante en el siglo XVII de que, aunque la mecánica grosera de todos los objetos, incluidos los vivos, podía explicarse mediante leyes físicas, su peculiar dinámica interna (que dicta, entre otras cosas, de qué manera crecen las manzanas) era impulsada por aquella fuerza vital o *élan vital* que fluía desde una fuente sobrenatural que se hallaba fuera del alcance de cualquier ecuación matemática impía. Pero, como ya hemos descubierto, los progresos subsiguientes en materia de biología, genética, bioquímica y biología molecular desmontaron el vitalismo. Hoy en día no hay científico que se precie que dude de que la vida puede explicarse dentro de la esfera de la ciencia; pero sigue existiendo un interrogante acerca de cuál de dichas ciencias puede proporcionar la mejor explicación. A pesar de las explicaciones alternativas de científicos como Schrödinger, la mayoría de los científicos todavía creen que las leyes clásicas son suficientes, y que las leyes newtonianas actúan sobre biomoléculas que son bolas y tacos de billar y que actúan..., bueno, como bolas y tacos. Incluso Richard Feynman, uno de los sucesores intelectuales de Schrödinger, describió la fotosíntesis (en el fragmento que se cita en la cabecera de este capítulo) en términos estrictamente clásicos, con «la luz del sol que llega y hace saltar el oxígeno del carbono», con la luz que actúa como una especie de palo de golf capaz de golpear la pelota de golf que es el oxígeno y alejarla de la molécula de dióxido de carbono.

La biología molecular y la mecánica cuántica se desarrollaron en paralelo, y no lo hicieron de manera cooperativa. Los biólogos apenas asistían a las conferencias de física, y los físicos le prestaban poca atención a la biología. Pero en abril de 2007, un grupo de físicos y matemáticos radicados en el MIT y que trabajaban en un área relativamente esotérica llamada teoría de la información cuántica gozaban de una de sus reuniones regulares del club de revistas (en las

que cada miembro intervenía presentando un artículo que había encontrado en la literatura científica) cuando uno de los componentes del grupo llegó con un ejemplar del *New York Times*, en el que había un artículo que sugería que las plantas eran «ordenadores cuánticos». (En el capítulo 8 volveremos a hablar de estas notables máquinas.) El grupo se echó a reír. Uno de sus miembros, Seth Lloyd, recordó haber oído por primera vez esta «tontería cuántica»: «Pensamos que era algo realmente histérico [...] Era algo en plan: “¡Oh, Dios mío! ¡Es la cosa más loca que he oído en toda mi vida!”». <sup>2</sup> La causa de su incredulidad era el hecho de que muchos de los grupos de investigación más brillantes y mejor financiados del mundo habían pasado décadas intentando descubrir cómo construir un ordenador cuántico, una máquina que pudiera efectuar determinados cálculos con mucha mayor rapidez y de manera mucho más eficiente que los ordenadores más potentes de que hoy se dispone en el mundo, puesto que, en lugar de basarse en bits de información digitales que son ceros y unos, permitiría que fueran a la vez el cero y el uno, con lo que podría realizar de golpe todos los cálculos posibles: lo último en procesamiento en paralelo. El artículo del *New York Times* afirmaba que una humilde hoja de hierba era capaz de realizar el tipo de prestidigitación cuántica que era el fundamento de la computación cuántica. No es extraño que los investigadores del MIT se mostraran escépticos. No podían construir un ordenador cuántico que funcionara pero, si el artículo estaba en lo cierto, ¡podían comer uno en su ensalada del almuerzo!

Mientras tanto, no lejos de la sala en la que los miembros del club de revistas del MIT se partían de risa, un fotón que se desplazaba a trescientos mil kilómetros por segundo se precipitaba hacia un árbol con un famoso pedigrí.

## EL MISTERIO FUNDAMENTAL DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Volveremos de inmediato a este fotón y a este árbol, y a cómo pueden estar relacionados con el mundo cuántico, pero primero es necesario que el lector conozca un experimento maravillosamente simple que subraya lo extraño que es realmente el mundo cuántico. Aunque haremos todos los esfuerzos posibles para explicar lo mejor que podamos qué es lo que significa el concepto «superposición cuántica», la manera más efectiva de comprender mejor el mensaje es el famoso experimento de dos rendijas, que describiremos aquí.

Lo que cuenta el experimento de dos rendijas es la demostración más sencilla y escueta de que, en el mundo cuántico, todo es diferente. Las partículas pueden comportarse como ondas extendidas por el espacio, y las ondas pueden actuar a

veces como partículas localizadas individualmente. El lector ha encontrado ya esta dualidad onda-partícula: en el capítulo inicial, como la peculiaridad que es necesario tener en cuenta para la manera en que el Sol genera su energía; y en el capítulo 3, donde vimos cómo las propiedades ondulatorias de electrones y protones les permiten filtrarse al interior de enzimas a través de barreras energéticas. En este capítulo descubrirá que la dualidad onda-partícula se halla implicada asimismo en la reacción bioquímica más importante de la biosfera: la conversión de aire, agua y luz en plantas, microbios e, indirectamente, en todo el resto de nosotros. Pero primero debemos descubrir de qué manera la idea disparatada de que las partículas pueden hallarse en muchos lugares al mismo tiempo nos viene impuesta por uno de los experimentos más sencillos y más elegantes, pero de más alcance, que jamás se han realizado: el experimento que, según Feynman, «contiene el meollo de la mecánica cuántica».

Advierta el lector, sin embargo, que lo que se describe a continuación le parecerá imposible, y que puede estar seguro de que tiene que haber una manera más racional de explicar lo que ocurre. El lector puede quedarse pensando dónde está el juego de manos en lo que parece ser un truco mágico. O bien puede suponer que el experimento es una mera especulación teórica que han soñado unos científicos que carecen de la imaginación suficiente para comprender los mecanismos de la naturaleza. Pero ninguna de dichas explicaciones es correcta. El experimento de dos rendijas no tiene sentido (común), pero es real y se ha realizado miles de veces.

Describiremos el experimento en tres fases. Las dos primeras tan solo establecerán el escenario, de manera que el lector pueda apreciar después los desconcertantes resultados de la tercera fase, que es la principal.

Primero, se lanza un haz de luz monocromática (que consiste en un único color, o longitud de onda) sobre una pantalla que tiene dos estrechas rendijas que permiten que algo de la luz atraviese ambas rendijas y alcance una segunda pantalla (véase figura 4.1). Al controlar cuidadosamente la anchura de las rendijas, la distancia entre ellas y la distancia entre las dos pantallas, podemos crear una secuencia de bandas claras y oscuras sobre la segunda pantalla, lo que se conoce como patrón de interferencia.

Los patrones de interferencia son la rúbrica de las ondas y son fáciles de ver en cualquier medio ondulante. Si se lanza un guijarro a un estanque de aguas tranquilas se podrá observar que un conjunto de ondas concéntricas se mueven hacia el exterior desde el punto de entrada de la piedra. Si se lanzan dos guijarros en el mismo estanque, ambos generarán sus propias ondas concéntricas que se

expanden, pero allí donde las ondas de las dos piedras se superponen se podrá ver un patrón de interferencia (véase figura 4.2). Allí donde la cresta de una ola se encuentra con el valle de otra, ambas se anulan, lo que resulta en que en dichos puntos no hay ondas. A esto se le denomina interferencia destructiva. Por el contrario, allí donde se encuentran dos crestas o dos valles, se refuerzan la una a la otra y generan una onda de doble tamaño: esta es una interferencia constructiva. Este patrón de cancelación y refuerzo de las ondas puede producirse en cualquier medio ondulatorio. De hecho, fue la demostración por parte del físico inglés Thomas Young de la interferencia de haces de luz en una versión inicial del experimento de doble rendija, realizado hace más de dos siglos, lo que le convenció, al igual que a la mayoría de los demás científicos, de que la luz era realmente una onda.

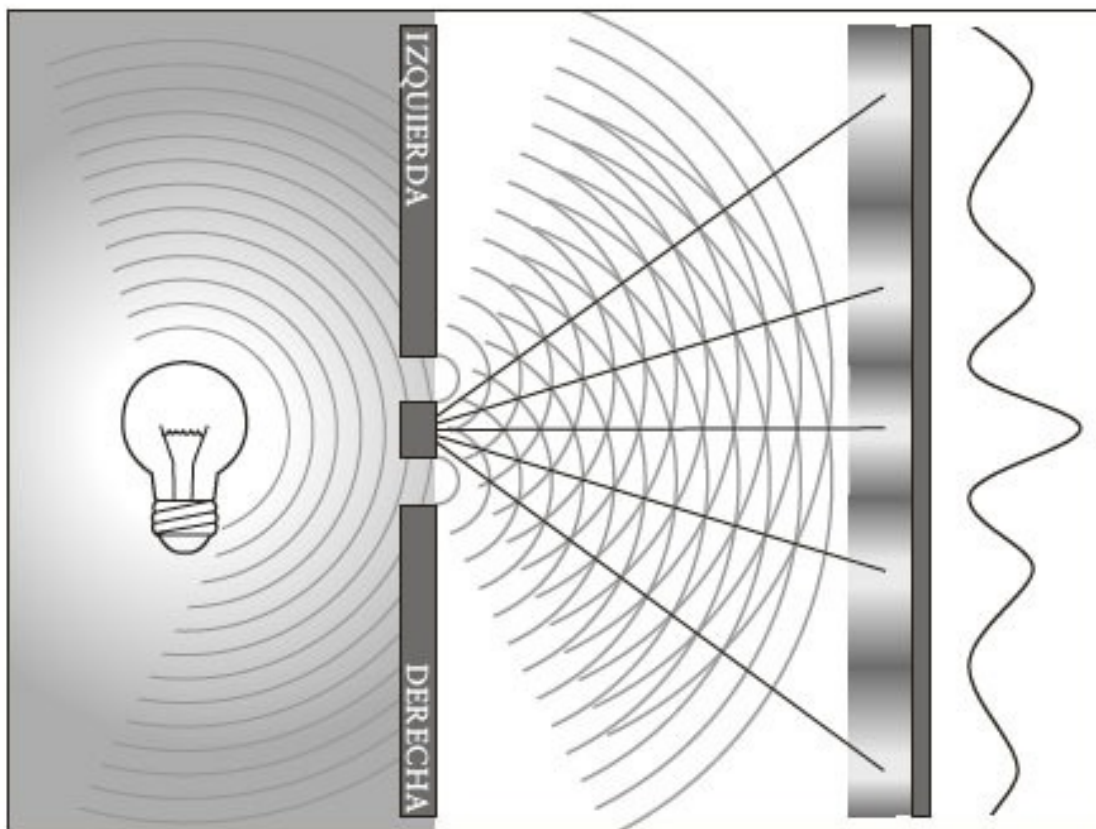


FIGURA 4.1. El experimento de doble rendija, fase 1. Cuando una luz monocromática (que tiene una longitud de onda específica) se hace incidir sobre las dos rendijas, cada una de estas actúa entonces como una nueva fuente de luz en el otro lado y, debido a su naturaleza ondulatoria, la luz se dispersa (se difracta) al pasar por cada rendija, de manera que las ondas circulares se superponen y se interfieren entre ellas, lo que produce franjas iluminadas y oscuras en la pantalla situada detrás.

La interferencia que se muestra en el experimento de doble rendija se debe

primero a la manera en que las ondas de luz atraviesan ambas rendijas y después se dispersan, una propiedad de las ondas conocida como difracción, de modo que los haces que surgen de las rendijas se superponen y se combinan, al igual que hacen las ondas de agua, antes de incidir en la pantalla posterior. En determinados puntos de la pantalla, las ondas de luz que surgen de las dos rendijas llegarán «en fase», con crestas y valles que se mueven al unísono, ya sea porque han recorrido la misma distancia hasta la pantalla, ya sea porque la diferencia en la distancia que recorrieron es igual a un múltiplo de la distancia entre sus crestas. Donde esto ocurre, las crestas y valles de las ondas se combinan para formar crestas más altas y valles más profundos: interferencia constructiva. Las ondas fusionadas crean una luz de intensidad elevada en estos puntos, y con ello una banda brillante en la pantalla. Pero en otros puntos, la luz procedente de las dos rendijas llega «fuera de fase», en el punto en el que la cresta de una onda se encuentra con el valle de otra. En estos puntos, las ondas se anulan la una a la otra, lo que se traduce en una banda oscura en la pantalla: interferencia destructiva. Entre estos dos extremos, la combinación no está completamente «en fase» ni completamente «fuera de fase», y algo de luz sobrevive. Por ello, no vemos una secuencia bien marcada de bandas claras y oscuras en la pantalla, sino una suave variación de la intensidad, entre lo que se conoce como máximos y mínimos en el patrón de interferencia. Esta variación apropiadamente ondulatoria y suave en la intensidad es un indicador clave de fenómenos ondulatorios. Un ejemplo familiar de ello puede encontrarse en las ondas sonoras: un músico que afina un instrumento escucha las «pulsaciones» \* que tienen lugar cuando una nota se encuentra muy cerca de otra en frecuencia, de modo que cuando se desplazan hasta el oído del músico a veces llegan en fase y a veces fuera de fase. Esta variación en su patrón combinado genera un sonido general cuyo volumen sube y baja de manera periódica. Esta variación suave en la intensidad del sonido se debe a la interferencia entre dos ondas separadas. Adviértase que estas pulsaciones son un ejemplo totalmente clásico que no necesita una explicación cuántica.

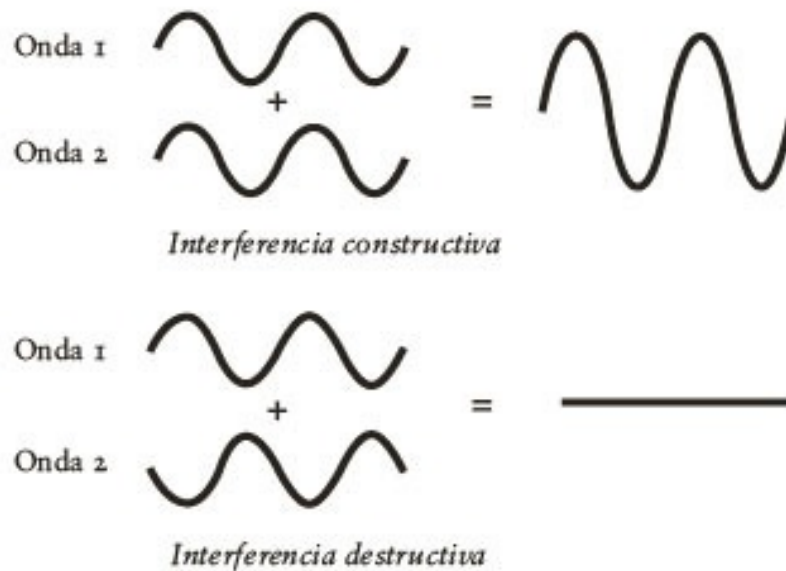


FIGURA 4.2. Interferencia de ondas constructiva y destructiva.

Un factor clave en el experimento de doble rendija es que el haz de luz que incide sobre la primera pantalla debe ser monocromático; es decir, constituido por una única longitud de onda. En contraste, la luz blanca, como la que emite una bombilla eléctrica normal, está compuesta de muchas longitudes de onda diferentes (todos los colores del arco iris), de modo que las ondas llegarán a la pantalla de una manera muy desordenada. En este caso, aunque las crestas y los valles seguirán interfiriéndose los unos a los otros, el patrón resultante será tan complejo y tan manchado que no se verán bandas definidas. De forma parecida, aunque es fácil generar un patrón de interferencia cuando dejamos caer dos piedras en un estanque, una gran cascada que caiga sobre el estanque generará tantas ondas que será imposible encontrar ningún patrón de interferencia coherente.

Pasemos ahora a la segunda fase de nuestro experimento de doble rendija, que no realizaremos con luz, sino disparando balas a la pantalla. El asunto estriba ahora en que no vamos a usar ondas extendidas, sino partículas sólidas. Desde luego, cada bala debe atravesar una u otra de las dos rendijas, no ambas a la vez. Si hay suficientes balas que pasen, vemos que la pantalla posterior habrá acumulado dos bandas de agujeros de bala correspondientes a las dos rendijas (véase figura 4.3). Es evidente que no estamos tratando con ondas. Cada bala es una partícula independiente y no tiene relación con ninguna de las demás balas, de modo que no hay interferencia.

Vayamos ahora a la tercera fase: el «truco mágico» cuántico. Repetimos el

experimento utilizando átomos en lugar de balas. Una fuente que puede producir un haz de átomos los dispara a una pantalla con dos rendijas apropiadamente estrechas. \* Para detectar la llegada de los átomos, la segunda pantalla tiene un revestimiento fotoluminiscente que se hace visible en forma de un minúsculo punto brillante cada vez que un único átomo impacta en él.

Si al nivel microscópico dominara el sentido común, entonces los átomos tendrían que comportarse como balas increíblemente diminutas. Realizamos el experimento primero con solo la rendija de la izquierda abierta y vemos una banda de puntos luminosos en la pantalla posterior, detrás de la rendija abierta. Hay cierta dispersión de los puntos, que se puede suponer que es el resultado de que algunos átomos inciden en los bordes y son desviados en lugar de atravesar limpiamente la rendija. A continuación, abrimos también la rendija de la derecha y esperamos a que los puntos se vayan acumulando en la pantalla posterior.

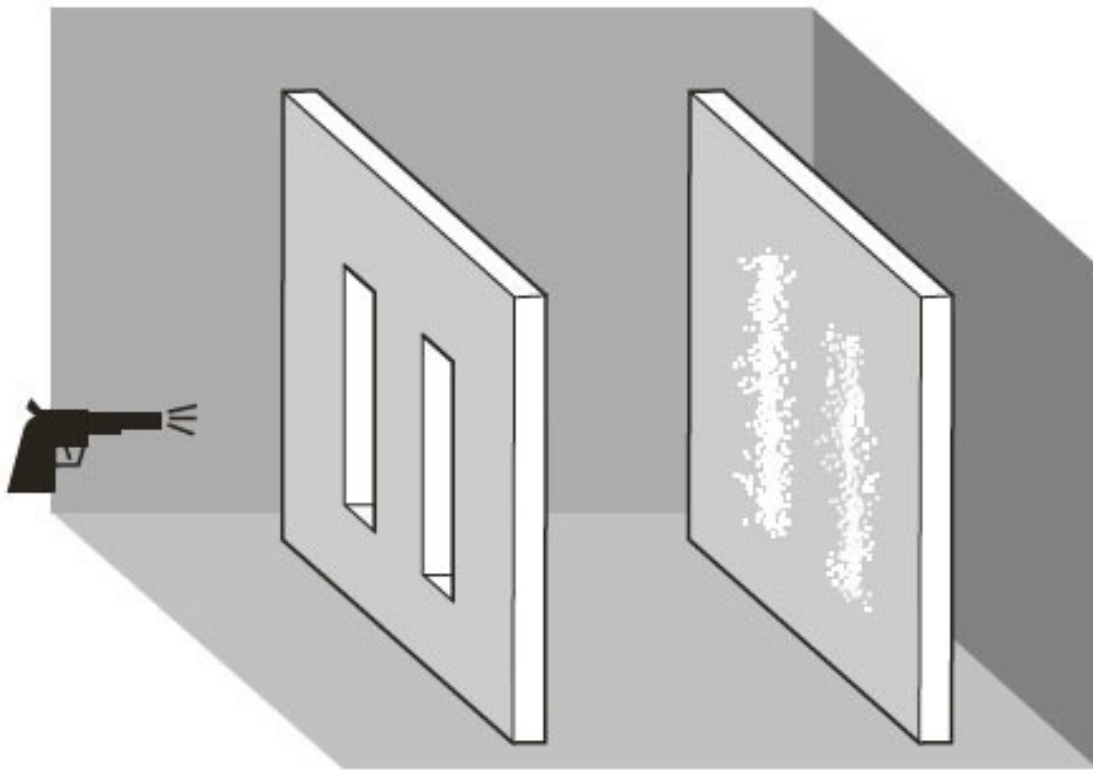


FIGURA 4.3. El experimento de doble rendija, fase 2. A diferencia del comportamiento ondulatorio que vimos con la luz, si disparamos una serie de balas a las rendijas, se obtiene un comportamiento propio de partículas. Cada bala que consigue llegar hasta la pantalla posterior ha tenido que atravesar una u otra de las dos rendijas, pero no ambas (suponiendo, desde luego, que la pantalla intermedia es lo bastante gruesa para impedir el paso de cualquier bala que no pase a través de las rendijas). En lugar de una interferencia de bandas múltiples, el patrón que aparece ahora en la pantalla posterior muestra una acumulación de balas a lo



largo de solo dos estrechas bandas adyacentes a cada una de las rendijas.

Si se nos pidiera que predijéramos la distribución de los puntos brillantes y no supiéramos nada de mecánica cuántica, entonces aventuraríamos, por supuesto, que su aspecto se parecería mucho al patrón producido por las balas; es decir, que detrás de cada rendija se produciría una banda de puntos, que darían dos manchas de luz concretas, que serían más brillantes en su centro y que de manera gradual se difuminarían a medida que nos alejáramos de este, a medida que los «blancos» de los átomos se hicieran más raros. También esperaríamos que el punto medio entre las dos manchas brillantes fuera oscuro, puesto que corresponde a una región de la pantalla que es la más difícil de alcanzar por los átomos, sea cual sea la rendija por la que consigan pasar.

Pero no es esto lo que encontramos. Por el contrario, vemos un patrón de interferencia muy claro de franjas claras y oscuras, exactamente igual que ocurría con la luz. La parte más brillante de la pantalla, lo crea el lector o no, está en el centro de esta: la misma mancha que no esperaríamos que pudieran alcanzar muchos átomos (véase figura 4.4). En realidad, con la distancia adecuada entre las rendijas y la distancia adecuada entre las dos pantallas, podemos estar seguros de que la región brillante en la pantalla posterior (el área que los átomos podían alcanzar con solo una rendija abierta) será ahora oscura (allí no llegarán átomos) cuando abramos la segunda rendija. ¿Cómo es posible que si se abre otra rendija, que solo habría de permitir que pasaran más átomos, estamos impidiendo que los átomos alcancen determinadas regiones de la pantalla?

Veamos si podemos explicar lo que ocurre empleando el sencillo sentido común y evitando por ahora hacer referencia a la mecánica cuántica. Suponga el lector que, a pesar de que cada átomo es una partícula minúscula y localizada (al fin y al cabo, cada átomo incide en la pantalla en un único punto), el enorme número de átomos implicado, todos ellos colisionando e interactuando entre sí de una manera determinada y coordinada, produce un patrón con la «apariencia» de interferencia. Después de todo, sabemos que en el agua las olas están realmente compuestas de gran cantidad de moléculas de agua que, por sí mismas, no se esperaría que fueran ondulatorias. Es el movimiento coordinado de billones de moléculas de agua lo que produce las propiedades ondulatorias, no cada molécula tomada de manera individual. Quizás el cañón de átomos dispara un flujo de átomos coordinado, algo así como una máquina de producir olas en una piscina.

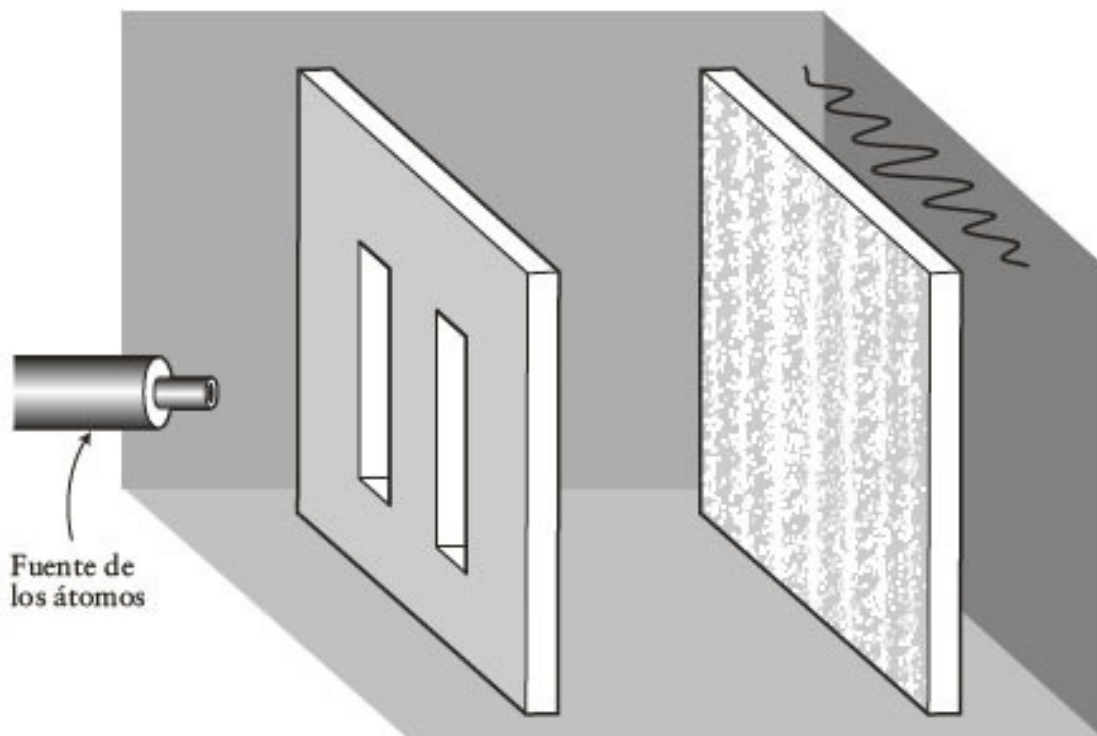


FIGURA 4.4. El experimento de doble rendija, fase 3. Si sustituimos las balas por átomos procedentes de una fuente que puede dispararlos a las rendijas (desde luego, en cada fase la anchura y separación de las rendijas se eligen adecuadamente), vemos que el patrón de interferencia ondulatoria aparece de nuevo. A pesar de que cada átomo incide sobre la pantalla posterior en un punto concreto, lo que indica su naturaleza de partícula, se agrupan en bandas, tal como se vio en el caso de la luz. De modo que, ¿qué es lo que atraviesa ambas rendijas a la vez, y sin lo cual no veríamos las múltiples franjas de interferencia?

Para comprobar la teoría de los átomos coordinados, repetimos el experimento, pero ahora enviamos los átomos de uno en uno. Disparamos el cañón de átomos y esperamos la aparición de un punto de luz en la pantalla posterior, antes de dispararlo de nuevo, y así sucesivamente. En un primer momento parece que prevalece el sentido común. Cada átomo que consigue atravesar las rendijas deja tan solo un minúsculo y localizado punto de luz en algún lugar de la pantalla. Parece que los átomos salen del cañón en forma de partículas como balas y llegan a la pantalla como partículas. ¿Acaso no resulta evidente que entre el cañón y la pantalla deben comportarse asimismo como partículas? Pero ahora el conejo cuántico sale de la chistera. A medida que los puntos, cada uno de los cuales registra la llegada de un único átomo, como si fuera una bala, van aumentando sobre la pantalla, reaparece el patrón de interferencia claro y oscuro. Ahora que los átomos atraviesan el instrumento de uno en uno, ya no podemos aducir que haya ningún comportamiento colectivo de gran cantidad de átomos que entorchocan e interactúan los unos con los otros.

No son como las ondas de agua. Y aquí debemos enfrentarnos de nuevo al resultado contrario a la lógica de que hay lugares en la pantalla posterior en los que los átomos podían incidir cuando solo había una de las rendijas abierta, y que sin embargo son completamente oscuros si también se abre la segunda rendija, a pesar de que su abertura proporciona una ruta adicional para que los átomos alcancen la pantalla. ¡Parece como si un átomo que atraviesa una rendija fuera de alguna manera «consciente» de si la otra rendija está abierta o no, y actuara en consecuencia!

Recapitulemos. Cada átomo sale del cañón como una partícula diminuta y localizada y llega a la segunda pantalla también como una partícula, como es evidente a partir del minúsculo destello de luz cuando impacta sobre ella. Pero entre un punto y otro, cuando se encuentra con las dos rendijas, ocurre algo misterioso, semejante al comportamiento de una onda extendida que se escinde en dos componentes, cada uno de los cuales surge de una rendija e interfiere con el otro en el lado alejado. ¿De qué otra forma puede un átomo ser consciente del estado (ya sea abierto o cerrado) de ambas rendijas al mismo tiempo?

Mientras sospechamos que en algún lugar tiene que haber un truco de prestidigitación, veamos si somos capaces de pillar a los átomos si los acechamos detrás de las rendijas. Podemos hacerlo instalando un receptor, supongamos que detrás de la rendija izquierda, para que registre una «señal» (quizás un bip) cada vez que un átomo pasa a través de dicha rendija en su recorrido hasta la pantalla. \* También podemos situar un segundo detector sobre la rendija derecha para captar los átomos que pasan a través de dicha rendija. Ahora bien, si un átomo atraviesa una u otra rendija, oiremos un bip procedente o bien del detector derecho, o bien del izquierdo; pero si el átomo consigue de alguna manera desenvolver su naturaleza de bala y atravesar ambas rendijas a la vez, entonces ambos detectores pitarán al mismo tiempo.

Lo que ahora encontramos es que, con cada disparo del cañón de átomos que viene acompañado con la aparición de un punto brillante sobre la pantalla, suena el detector derecho o el izquierdo, pero nunca ambos a la vez. Es seguro, pues, que al final tenemos la prueba de que los átomos que interfieren pasan de verdad a través de una rendija o de la otra, pero no de ambas simultáneamente. Pero tenga paciencia el lector y siga observando la pantalla. A medida que se producen y se fusionan destellos de luz individuales, lo que vemos es que lo que se produce ya no es un patrón de interferencia. En su lugar nos encontramos con dos bandas brillantes, que indican la acumulación de un montón de átomos detrás de cada rendija, tal como ocurría en el experimento con las balas. Los

átomos se comportan ahora como partículas convencionales a lo largo de todo el experimento. Es como si cada átomo se comportara como una onda cuando se enfrenta a las rendijas, a menos que se le espíe, en cuyo caso permanece inocentemente como una partícula minúscula.

Quizá la presencia del detector causa un problema, quizá trastoca el extraño y delicado comportamiento de los átomos que atraviesan las rendijas. Comprobemos esto eliminando uno de los detectores, por ejemplo el que se halla sobre la rendija de la derecha. Todavía podemos obtener la misma información a partir de esta disposición porque cuando disparemos el cañón, oigamos un pitido y veamos un punto brillante en la pantalla, sabremos que el átomo tiene que haber atravesado la rendija de la izquierda; cuando disparemos el cañón, no oigamos un bip pero veamos un punto brillante en la pantalla, entonces sabremos que los átomos tienen que haber alcanzado la pantalla a través de la rendija de la derecha. Ahora sabremos si los átomos han pasado a través de la rendija de la derecha o de la rendija de la izquierda, pero solo estamos «perturbando» una de las rutas. Si era el detector el que estaba causando el problema, entonces cabría esperar que aquellos átomos que desencadenaron el pitido se comportaran como balas, pero que los que no lo hiciesen (y atravesaran la rendija de la derecha) se comportasen como ondas. Quizás ahora veamos sobre la pantalla una mezcla de un patrón propio de bala (de los átomos que atraviesan la rendija de la izquierda) y de un patrón de interferencia (de los átomos que atraviesan la rendija de la derecha).

Pero no la vemos. Con esta disposición, seguimos sin observar ningún patrón de interferencia. Sobre la pantalla solo se ve el patrón propio de las balas detrás de cada rendija. Parece que la simple presencia de un detector que pueda registrar la localización de un átomo es suficiente para destruir su comportamiento ondulatorio, ¡incluso si dicho detector se halla a cierta distancia de la trayectoria del átomo a través de la otra rendija!

Quizá la presencia física del detector sobre la rendija de la izquierda es suficiente para influir sobre la trayectoria de los átomos que pasan a su través, algo así como cuando un peñasco cambia el flujo de agua en un arroyo de corriente rápida. Podemos comprobarlo desconectando el detector de la izquierda. Se halla todavía allí, de modo que cabe esperar que su influencia sea aproximadamente la misma. Pero ahora, con el detector presente pero desconectado, ¡el patrón de interferencia se produce de nuevo sobre la pantalla! Todos los átomos que atraviesan el dispositivo experimental han vuelto a comportarse como ondas. ¿Cómo es que los átomos se comportaban como

partículas cuando se conectó el detector situado sobre la rendija de la izquierda, pero tan pronto como este se desconectó se comportaron como ondas? ¿Cómo sabe una partícula que atraviesa la rendija de la derecha si el detector sobre la rendija de la izquierda está conectado o desconectado?

Es en esta fase cuando hay que dejar el sentido común de lado. Ahora hemos de enfrentarnos a la dualidad onda-partícula de objetos minúsculos, como los átomos, electrones o fotones, que se comportan como una onda cuando no tenemos información acerca de qué rendija atravesaron, pero como una partícula cuando los observamos. Este es el proceso de observación o de medición de objetos cuánticos con el que nos encontramos por vez primera en el capítulo 1, cuando consideramos la demostración de Alain Aspect del enmarañamiento cuántico en fotones separados. El lector recordará que el equipo de Aspect midió sus fotones haciéndolos pasar a través de una lente polarizada que destruyó su estado enmarañado (que es un aspecto de su naturaleza ondulatoria), obligándolos a elegir una única dirección de polarización clásica. De manera similar, la medición de átomos que pasan a través del experimento de doble rendija los obliga a elegir si hacerlo a través de la rendija de la derecha o la de la izquierda.

La mecánica cuántica nos proporciona, en efecto, una explicación perfectamente lógica de este fenómeno; pero es solo una explicación de lo que observamos (el resultado de un experimento), no de lo que sucede cuando no estamos mirando. Pero puesto que todo lo que tenemos es lo que podemos ver y medir, quizá no tiene sentido pedir más. ¿Cómo podemos establecer la legitimidad o la verdad de la explicación de un fenómeno que nunca podemos comprobar, ni siquiera en principio? Tan pronto como lo intentamos, alteramos el resultado.

La interpretación cuántica del experimento de dos rendijas es que, en cualquier momento del tiempo, hay que describir cada átomo por un conjunto de números que define su localización probabilística en el espacio. Esta es la cantidad que presentamos en el capítulo 2 como la «función de onda». Allí la describimos como algo parecido a la idea de hacer el seguimiento de una ola de crímenes que se extendía por una ciudad mediante la asignación de probabilidades a robos que tienen lugar en diferentes barrios. De manera parecida, la función de onda que describe el paso de un átomo por las dos rendijas hace el seguimiento de la probabilidad de encontrarlo en cualquier lugar del aparato en cualquier momento dado. Pero, tal como destacamos anteriormente, mientras que un ladrón ha de tener una única localización en el espacio y el tiempo, y la onda de

«probabilidad del crimen» describe tan solo nuestra falta de conocimiento acerca de dónde se encuentra realmente, en cambio, la función de onda del átomo en el experimento de doble rendija es real en el sentido de que representa el estado físico del propio átomo, que realmente no tiene una localización específica a menos que lo midamos, y se halla, hasta entonces, en todas partes a la vez... con probabilidades diversas, desde luego, de manera que es improbable que encontremos el átomo en lugares en los que su función de onda es pequeña.

De modo que, en lugar de átomos individuales que atraviesan el dispositivo experimental de doble rendija, debemos considerar la función de onda que se desplaza desde el origen hasta la pantalla posterior. Al encontrarse con las rendijas, la función de onda se divide en dos, y cada mitad atraviesa una de las rendijas. Adviértase que lo que describimos aquí es la manera en que una cantidad matemática cambia a lo largo del tiempo. Es inútil preguntar qué es lo que ocurre realmente, puesto que para comprobarlo tendríamos que mirar. Pero tan pronto como intentáramos hacerlo, alteraríamos el resultado. Preguntar qué es lo que ocurre en verdad entre observaciones es como preguntarse si la lámpara de nuestro frigorífico está encendida antes de abrir la puerta del mismo: nunca podremos saberlo porque tan pronto como echamos un vistazo cambiamos el sistema.

Se plantea la pregunta: entonces, ¿cuándo «se convierte» de nuevo la función de onda en un átomo localizado? La respuesta es la siguiente: cuando intentamos detectar su paradero. Cuando tiene lugar una medida de este tipo, la función de onda cuántica se desploma hasta una única posibilidad. De nuevo, esto es muy diferente de la situación del ladrón, en la que la incertidumbre sobre su paradero se desplomó de súbito hasta un único punto después de que la policía le echara el guante. En aquel caso, fue solo nuestra información sobre el paradero del ladrón lo que fue afectado por la detección. Siempre había estado en un único lugar en cualquier momento dado. No ocurre lo mismo con el átomo: en ausencia de alguna medida, el átomo se halla en realidad en todas partes.

Así pues, la función de onda cuántica calcula la probabilidad de detectar el átomo en una localización específica, si en aquel momento fuéramos a realizar una medida de su posición. Allí donde la función de onda es grande antes de la medición, la probabilidad resultante de encontrar el átomo allí será alta. Pero allí donde es pequeña, quizá debido a una interferencia ondulatoria destructiva, la probabilidad de encontrar el átomo allí cuando decidamos mirar será, en consecuencia, pequeña.

Podemos imaginar que seguimos a la función de onda que describe el átomo

solitario cuando abandona la fuente. Se comporta igual que una onda que fluye hacia las rendijas, de modo que, al nivel de la primera pantalla, tendrá la misma amplitud en cada rendija. Si colocamos un detector en una de las rendijas, entonces cabe esperar probabilidades iguales: el 50% del tiempo detectaremos el átomo en la rendija de la izquierda y el 50% del tiempo lo detectaremos en la rendija de la derecha. Pero (y este es el punto importante) si no intentamos detectar el átomo al nivel de la primera pantalla, la función de onda fluye a través de ambas rendijas sin desplomarse. A partir de entonces, y en términos cuánticos, podemos hablar de una función de onda que describe un átomo solitario que se encuentra en una superposición: que se halla en dos lugares al mismo tiempo, lo que corresponde a que su función de onda atraviesa simultáneamente las rendijas de la izquierda y de la derecha.

Al otro lado de las rendijas, cada fragmento separado de la función de onda, uno procedente de la rendija de la izquierda y el otro de la rendija de la derecha, se extiende de nuevo y ambos forman conjuntos de ondulaciones matemáticas que se superponen, y que en algunos puntos refuerzan y en otros puntos anulan la amplitud del otro. El efecto combinado es que la función de onda tiene ahora el patrón característico de otros fenómenos ondulatorios, como la luz. Pero téngase en cuenta que esta función de onda que ahora es complicada sigue describiendo un único átomo solitario.

En la segunda pantalla, donde finalmente tiene lugar una medición de la posición del átomo, la función de onda nos permite calcular la probabilidad de detectar la partícula en puntos diferentes a lo largo de la pantalla. Las manchas brillantes que hay sobre la pantalla corresponden a aquellas posiciones en las que las dos partes de la función de onda, procedentes de las dos rendijas, se refuerzan la una a la otra, y las manchas oscuras corresponden a aquellas posiciones en las que se anulan entre sí para generar una probabilidad cero de que los átomos sean detectados en estas posiciones.

Es importante recordar que este proceso de refuerzo y anulación (interferencia cuántica) tiene lugar incluso cuando se trata de una sola partícula. Recuérdese que hay regiones de la pantalla que los átomos, disparados de uno en uno, podrían alcanzar con solo una rendija abierta, pero que ya no eran alcanzables cuando se abrían ambas rendijas. Esto solo tiene sentido si cada átomo disparado por el cañón de átomos se describe mediante una función de onda que puede explorar simultáneamente ambas rutas. La función de onda combinada con sus regiones de interferencia constructiva y destructiva anula la probabilidad de que el átomo se encuentre en algunas posiciones de la pantalla que alcanzaría si

únicamente estuviera abierta una rendija.

Todas las entidades cuánticas, ya se trate de partículas fundamentales o de los átomos y moléculas compuestos por estas partículas, exhiben un comportamiento ondulatorio coherente, de manera que pueden interferir consigo mismas. En ese estado cuántico pueden mostrar todos los extraños comportamientos cuánticos, como hallarse en dos lugares al mismo tiempo, girar en dos direcciones a la vez, perforar barreras impenetrables o poseer conexiones enmarañadas cuánticas con un socio distante.

Pero, entonces, ¿cómo es que el lector y yo, que estamos compuestos en último término por partículas cuánticas, no podemos hallarnos en dos lugares a la vez, que es algo que, ciertamente, sería muy útil en un día atareado? La respuesta a un nivel superficial es muy sencilla: cuanto mayor y más pesado es un cuerpo, menor será su naturaleza ondulatoria, y algo que tenga el tamaño y la masa de un humano, o de hecho cualquier cosa que sea lo bastante grande para ser visible a simple vista, poseerá una longitud de onda cuántica tan minúscula que esta no tendrá ningún efecto medible. Pero, a un nivel más profundo, podemos pensar que cada átomo de nuestro cuerpo es observado, o medido, por todos los demás átomos que lo rodean, de manera que cualesquiera delicadas propiedades cuánticas que pudiera tener son destruidas con mucha rapidez.

¿Qué es, entonces, lo que queremos decir realmente con «medición»? Ya hemos explorado de forma breve esta cuestión en el capítulo 1, pero ahora debemos estudiarlo con más atención, puesto que es fundamental para la pregunta de cuánto de «cuántico» tiene la biología cuántica.

## MEDICIÓN CUÁNTICA

A pesar de todo su éxito, la mecánica cuántica no nos dice nada acerca de cómo dar el paso desde las ecuaciones que describen de qué manera un electrón, pongamos por caso, se mueve alrededor de un átomo, hasta lo que vemos cuando efectuamos una medida específica de dicho electrón. Por este motivo, los padres fundadores de la mecánica cuántica elaboraron un conjunto de normas a medida, que se convirtieron en un apéndice del formalismo matemático. Se conocen como los «postulados cuánticos», y proporcionan una especie de manual de instrucciones acerca de cómo traducir las predicciones matemáticas de las ecuaciones en propiedades tangibles que podemos observar, como por ejemplo la posición o la energía de un átomo en cualquier momento dado.

En cuanto al mismo proceso real por el que un átomo deja instantáneamente



de estar «aquí y allí» y tan solo se encuentra «aquí» cuando miramos, nadie sabe en realidad qué es lo que ocurre, y la mayoría de los físicos se contentan con adoptar la opinión pragmática de que «estas cosas pasan». El problema es que esto requiere que se haga una distinción arbitraria entre el mundo cuántico, donde ocurren cosas extrañas, y nuestro macromundo cotidiano, donde los objetos se comportan «con sensatez». Un dispositivo de medición que detecte un electrón debe formar parte de este macromundo. Pero los fundadores de la mecánica cuántica nunca aclararon ni cómo ni por qué ni cuándo tiene lugar este proceso de medición.

Durante las décadas de 1980 y 1990, los físicos llegaron a apreciar lo que debe de suceder cuando un sistema cuántico aislado, como un átomo solitario en el experimento de las dos rendijas, cuya función de onda existe en su superposición de hallarse en dos lugares a la vez, interactúa con un dispositivo de medición macroscópico, pongamos por caso que situado en la rendija de la izquierda. Resulta que detectar el átomo (y adviértase aquí que incluso no detectar el átomo ya se considera algo medible, pues ello significa que debió de atravesar la otra rendija) hace que la función de onda del átomo interactúe con todos los billones de átomos del dispositivo de medición. Esta interacción compleja hace que la delicada coherencia cuántica se pierda muy rápidamente en el ruido incoherente de su entorno. Este proceso se llama «decoherencia», y ya lo vimos en el capítulo 2.

Pero la decoherencia no necesita un dispositivo medidor para tener efecto. Tiene lugar todo el tiempo en el interior de todo objeto clásico individual mientras sus constituyentes cuánticos (los átomos y moléculas) experimentan vibraciones térmicas y todos los átomos y moléculas circundantes los zarandean de un lado para otro, de modo que se pierde su coherencia ondulatoria. De esta manera podemos pensar en la decoherencia como el medio por el que todo el entorno material de un átomo determinado, pongamos por caso (lo que se denomina su ambiente), está midiendo constantemente aquel átomo y obligándolo a que se comporte como una partícula clásica. De hecho, la decoherencia es uno de los procesos más rápidos y eficientes de toda la física. Y debido a esta eficiencia notable, la decoherencia eludió durante tanto tiempo su descubrimiento. Solo en fechas muy recientes han aprendido los físicos cómo controlarla y estudiarla.

Volviendo a nuestra analogía de las piedras lanzadas al agua, cuando las lanzamos a un estanque tranquilo era fácil ver que sus ondas superpuestas se interferían las unas a las otras. Pero intente el lector lanzar estas mismas piedras

a la base de las cataratas del Niágara. La naturaleza absolutamente compleja y caótica del agua elimina ahora por completo cualquier patrón de interferencia que los guijarros puedan generar. Esta agua turbulenta es el equivalente clásico del movimiento molecular aleatorio que rodea un sistema cuántico, lo que resulta en decoherencia instantánea. La mayoría de los ambientes son, a un nivel molecular, tan turbulentos como las aguas que hay en la base de las cataratas del Niágara. Las partículas del interior de los materiales son constantemente sacudidas y empujadas de un lado a otro por su ambiente: otros átomos, moléculas o fotones de luz.

Llegados a este punto, cabe aclarar parte de la terminología que empleamos en este libro. Decimos que los átomos se encuentran en dos lugares a la vez, que se comportan como ondas extendidas y que existen a la vez en una superposición de dos o más estados diferentes. Con el fin de hacerle las cosas más fáciles al lector, podemos acordar un único término que abarca todos estos conceptos: el de la «coherencia» cuántica. Así, cuando nos referimos a efectos «coherentes», queremos decir que algo se comporta de una manera mecánica cuántica, que muestra comportamiento ondulatorio o que hace más de una cosa al mismo tiempo. Así, la «decoherencia» es el proceso físico por el que se pierde la coherencia y lo cuántico se convierte en clásico.

Por lo general, cabe esperar que la coherencia cuántica sea de muy corta duración a menos que el sistema cuántico pueda ser aislado de su entorno (menos partículas que den empujones) o pueda enfriarse a una temperatura muy baja (muchos menos empujones) para conservar la delicada coherencia. En realidad, para demostrar patrones de interferencia con átomos únicos, los científicos extraen todo el aire del aparato y enfrían su equipamiento hasta quedarse muy cerca del cero absoluto. Solo si adoptan estos pasos extremos pueden mantener sus átomos en un estado cuántico coherente y tranquilo el tiempo suficiente para demostrar los patrones de interferencia.

La cuestión de la fragilidad de la coherencia cuántica (conseguir que la función de onda no se desplome) es, desde luego, el reto principal al que se enfrenta el grupo del MIT, a quienes conocimos en los primeros párrafos de este capítulo, y de sus colegas en todo el mundo, en su empeño de construir un ordenador cuántico; y por este motivo se mostraban tan escépticos acerca de la afirmación del *New York Times* de que las plantas eran ordenadores cuánticos. Los físicos encuentran toda suerte de estratagemas inteligentes y caras para aislar el mundo cuántico del interior de sus ordenadores del ambiente externo, que destruye la coherencia. De ahí que pareciera comprensible considerar

descabellada la idea de que podía mantenerse la coherencia cuántica en el ambiente cálido, húmedo y turbulento, desde el punto de vista molecular, del interior de una hoja de hierba.

Sin embargo, ahora sabemos que, en un plano molecular, muchos procesos biológicos importantes pueden ser realmente muy rápidos (del orden de billonésimas de segundo) y también pueden hallarse confinados a distancias atómicas cortas: justo el tipo de longitudes y de escalas de tiempo en el que unos procesos cuánticos como el efecto de túnel pueden producir efectos. Así, aunque la decoherencia no puede impedirse nunca de manera total, sí que puede mantenerse a raya el tiempo suficiente como para ser útil desde el punto de vista biológico.

#### VIAJE AL CENTRO DE LA FOTOSÍNTESIS

Si el lector levanta la vista al cielo durante un segundo, una columna de luz de trescientos mil kilómetros de longitud descenderá al interior de sus ojos. En este mismo segundo, las plantas y microbios fotosintéticos de la Tierra captan la columna de luz solar para fabricar unas dieciséis mil toneladas de nueva materia orgánica en forma de árboles, hierba, algas marinas, dientes de león, secuoyas gigantes y manzanos. Nuestro objetivo en este apartado es descubrir cómo funciona realmente este primer paso en la transformación de materia inanimada en casi toda la biomasa de nuestro planeta; y nuestra transformación ejemplar será la conversión del aire de Nueva Inglaterra en una de las manzanas del árbol de Newton.

Para ver este proceso en acción recurriremos de nuevo al submarino de nanotecnología que ya utilizamos para explorar la acción de los enzimas en el capítulo anterior. Una vez que hemos subido a bordo y accionado el interruptor de miniaturización, lanzamos la nave hacia el cielo, hacia el interior del follaje del árbol, donde aterrizamos sobre una de sus hojas, que se expande. La hoja continúa aumentando de tamaño hasta que sus bordes más alejados se pierden más allá del horizonte y su superficie, en apariencia lisa, se convierte en una plataforma irregular pavimentada con ladrillos rectangulares verdes cacarañados por bloques redondos más pálidos, cada uno de ellos perforado por un poro central. Los ladrillos verdes son las llamadas células epidérmicas, y los bloques redondos se denominan estomas: su tarea consiste en dejar que aire y agua (los sustratos de la fotosíntesis) pasen a través de la superficie de la hoja y hacia su interior. Guiamos la nave hasta el estoma más cercano y, cuando la nave tiene

solo una micra (una millonésima de metro) de longitud, inclinamos su proa para sumergirnos en el poro y emergemos en el interior verde y brillante de la hoja.

Una vez dentro, nos detenemos en el seno del espacio amplio y relativamente tranquilo del interior de la hoja, cuyo suelo está constituido por filas de células verdes de aspecto de losas y cuyo techo presenta gruesos cables cilíndricos. Los cables son las venas de la hoja, que o bien transportan agua desde las raíces hasta la hoja (vasos del xilema), o bien transportan azúcares acabados de producir desde la hoja hasta el resto de la planta (vasos del floema). A medida que nuestro tamaño se va reduciendo todavía más, la cara de las células de aspecto de losas se expande en todas direcciones hasta que parecen ser del tamaño de un campo de fútbol. A esta escala (nosotros medimos alrededor de diez nanómetros de altura, es decir, una cienmilésima de milímetro) podemos ver que su superficie está revestida mediante una malla fibrosa de cordones, algo así como una alfombra de yute. Este material con aspecto de cordones es la pared celular, que es una especie de exoesqueleto celular. Nuestro nanosubmarino está equipado con instrumentos que utilizamos para abrirnos camino a través de esta alfombra fibrosa, y al hacerlo se revela una capa cérea subyacente, la membrana celular, que es la última barrera impermeable al agua entre la célula y su ambiente externo. Una inspección más detenida revela que no es completamente lisa, sino que está perforada por agujeros llenos de agua. A estos canales de la membrana se los llama porinas y son las tuberías de la célula, que dejan que entren los nutrientes y que salgan los productos de desecho. Para entrar en la célula solo tenemos que esperar junto a una de las porinas, hasta que se expanda lo bastante como para que nos sumerjamos en el acuoso interior de la célula.

Una vez que hemos atravesado el canal de la porina, podemos ver de inmediato que el interior de una célula es muy diferente de su exterior. En lugar de columnas majestuosas y amplios espacios abiertos, este interior está atestado y algo desordenado. ¡Tiene asimismo el aspecto de un lugar muy atrafagado! El líquido acuoso que llena la célula, que se conoce como citoplasma, es denso y viscoso; en algunos lugares es más un gel que un líquido. Y suspendidos en el gel hay miles de objetos globulares irregulares que parecen hallarse en un estado de movimiento interno constante. Son los enzimas proteínicos, como los que encontramos en el capítulo anterior, responsables de llevar a cabo los procesos metabólicos de la célula, descomponer nutrientes y fabricar biomoléculas tales como carbohidratos, ADN, proteínas y grasas. Muchos de estos enzimas están apersogados a una red de cables (el citoesqueleto de la célula) que, de manera parecida a los cables de los telesillas, parecen estar llevando numerosos

cargamentos a distintos destinos del interior de la célula. Esta red de transporte parece emanar de varios centros, en los que los cables están fijados a grandes cápsulas de color verde. Estas cápsulas son los cloroplastos de la célula, en cuyo interior tiene lugar la acción central de la fotosíntesis.

Hacemos avanzar el submarino a través del viscoso citoplasma. El avance es lento, pero finalmente llegamos al cloroplasto más cercano. Se halla debajo de nosotros como un enorme globo verde. Podemos ver que, al igual que la célula que lo encierra, está limitado por una membrana transparente a través de la cual se ven grandes pilas de objetos verdes y con aspecto de monedas. Son los tilacoides y están repletos de moléculas de clorofila, el pigmento que hace que las plantas sean verdes. Los tilacoides son los motores de la fotosíntesis que, cuando reciben la energía de fotones de luz, pueden unir los átomos de carbono (absorbidos del dióxido de carbono del aire) para producir los azúcares que irán a nuestra manzana. Para obtener un mejor panorama de este primer paso de la fotosíntesis, dirigimos la nave a través de uno de los poros de la membrana del cloroplasto hacia la moneda verde superior de la pila de tilacoides. Al llegar a nuestro destino, detenemos el motor de la nave y dejamos que esta planee sobre esta fábrica de actividad fotosintética.

Debajo de nosotros se halla una de los billones de máquinas fotosintéticas que fabrican la biomasa del mundo. Desde nuestro lugar de observación privilegiado podemos ver que, como descubrimos al examinar la maquinaria enzimática en el capítulo anterior, aunque a nuestro alrededor hay muchas colisiones moleculares turbulentas al estilo de las bolas de billar, existe asimismo un grado impresionante de orden. La superficie membranosa del tilacoide está tachonada de abruptas islas verdes pobladas por bosques constituidos por estructuras parecidas a árboles que terminan en placas pentagonales que parecen antenas. Estas placas semejantes a las antenas son moléculas captadoras de luz llamadas cromóforos, de las que la clorofila es el ejemplo más famoso, y son ellas las que ejecutan el primer paso crucial de la fotosíntesis: la captación de luz.

La clorofila es probablemente la segunda molécula más importante de nuestro planeta (después del ADN), y merece que le echemos un vistazo más detenido (véase figura 4.5). Es una estructura bidimensional constituida por formaciones pentagonales de átomos que en su mayoría son de carbono (esferas grises) y nitrógeno (N) que circundan un átomo central de magnesio (M), con una larga cola de átomos de carbono, oxígeno (O) e hidrógeno (esferas blancas). El electrón más externo del átomo de magnesio se halla enlazado de manera laxa al resto del átomo y puede saltar a la jaula de carbono que lo rodea por la absorción

de un fotón de energía solar para dejar un hueco en lo que ahora es un átomo con carga positiva. Podemos pensar en este hueco, o agujero del electrón, de una manera relativamente abstracta, como una «cosa» en sí misma: un agujero con carga positiva. La idea es que consideremos que el resto del átomo de magnesio permanece neutro mientras que, mediante la absorción del fotón, hemos creado un sistema que consiste en el electrón negativo que escapó y el agujero positivo que dejó atrás. Este sistema binario se denomina «excitón» (véase figura 4.6), y puede considerarse como una minúscula batería con polos positivo y negativo, capaz de almacenar energía para su uso posterior.

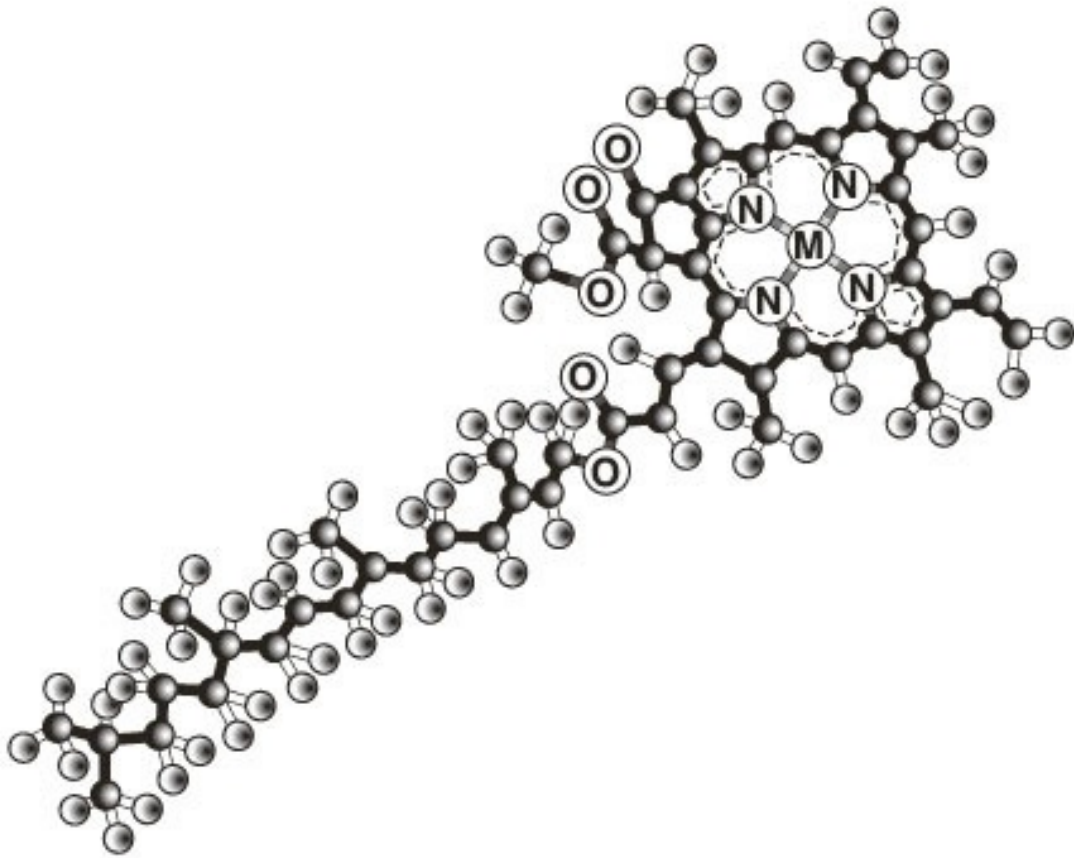


FIGURA 4.5. La molécula de clorofila.

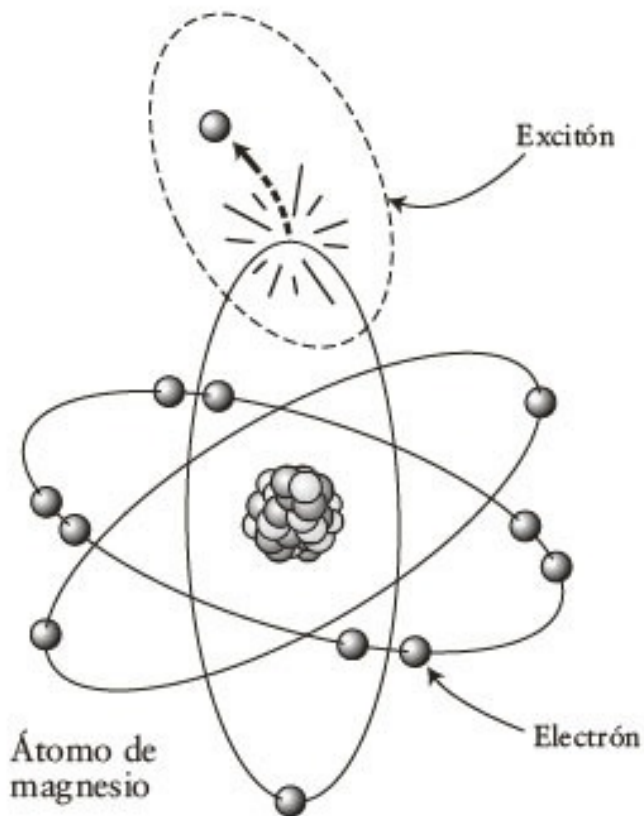


FIGURA 4.6. Un excitón consiste en un electrón que ha saltado de su órbita en un átomo, junto con el agujero que deja detrás.

Los excitones son inestables. El electrón y su agujero experimentan una fuerza electrostática atractiva que los atrae los unos a los otros. Si se recombinan, la energía solar del fotón original se pierde como calor residual. De modo que, si la planta ha de emplear la energía solar captada, tiene que transportar muy rápidamente el excitón hasta una unidad de fabricación molecular, conocida como «centro de reacción», donde tiene lugar un proceso llamado separación de cargas. En esencia, esto implica arrancar por completo un electrón energético de su átomo y transferirlo a una molécula vecina, algo así como la reacción enzimática que observamos en el capítulo precedente. Este proceso crea una batería química (llamada NADPH) más estable que un excitón, que es usada para guiar todas las reacciones químicas que son importantísimas para la fotosíntesis.

Pero los centros de reacción suelen ser bastante distantes, en términos moleculares (distancias nanométricas), de las moléculas excitadas de clorofila, de modo que la energía debe transferirse de una molécula antena a otra dentro del bosque de clorofila para que alcance el centro de reacción. Esto puede ocurrir

gracias a la estructura fuertemente empaquetada de la clorofila. Las moléculas que se hallan en las inmediaciones de la que ha absorbido el fotón pueden excitarse a su vez, y heredar de manera efectiva la energía de los electrones excitados en un primer momento, que después se transfiere a su propio electrón del átomo de magnesio.

El problema, desde luego, es qué ruta debe tomar esta transferencia de energía. Si se dirige en la dirección equivocada, saltando al azar de una molécula a la siguiente en el bosque de clorofila, acabará por perder su energía en lugar de transferirla al centro de reacción. ¿En qué dirección debe ir? No dispone de mucho tiempo para escoger su camino antes de que el excitón expire.

Hasta hace poco, se creía que este salto de energía de una molécula de clorofila a otra era fortuito, y que adoptaba esencialmente la estrategia de búsqueda de último recurso, conocida como paseo aleatorio. A veces se lo denomina «paseo del borracho» porque se parece al camino que toma un bebedor ebrio al salir de un bar, que se mueve en una y otra dirección hasta que al final encuentra el camino a casa. Pero los paseos aleatorios no son un medio muy eficiente para llegar a ninguna parte: si la casa del borracho está muy lejos, bien puede despertarse a la mañana siguiente bajo un arbusto en el otro extremo de la ciudad. Un objeto implicado en un paseo aleatorio tenderá a alejarse de su punto de partida en una distancia proporcional a la raíz cuadrada del tiempo empleado. Si al cabo de un minuto un borracho ha andado un metro, entonces pasados cuatro minutos habrá avanzado dos metros y, a los nueve minutos, solo tres metros. Dado este lento avance, no es sorprendente que animales y microbios rara vez utilicen un paseo aleatorio para encontrar alimento o una presa, y que solo recurran a esta estrategia si no hay otras opciones disponibles. Si se coloca una hormiga en un terreno desconocido, tan pronto como capte un olor abandonará un paseo aleatorio y seguirá su olfato.

Al no poseer olfato ni capacidades de navegación, se creía que la energía del excitón avanzaba a través del bosque de clorofila mediante la estrategia del borracho. Pero esta imagen no tenía mucho sentido, pues se sabe que este primer evento en la fotosíntesis es extraordinariamente eficiente. De hecho, la transferencia de energía fotónica captada desde una molécula de clorofila que es la antena hasta el centro de reacción presume de poseer la mayor eficiencia de cualquier reacción natural o artificial conocida: cercana al cien por cien. Bajo condiciones óptimas, casi cada paquete de energía absorbido por una molécula de clorofila alcanza el centro de reacción. Si el camino recorrido fuera tortuoso, casi todos ellos, ciertamente la mayoría de ellos, se perderían. Uno de los



mayores enigmas de la biología ha sido de qué manera esta energía fotosintética puede encontrar el camino hasta su destino mucho mejor que los borrachos, las hormigas o, de hecho, nuestra tecnología más eficiente desde el punto de vista energético.

#### LA PULSACIÓN CUÁNTICA

El autor principal del artículo de investigación [3](#) que desencadenó el artículo de diario que hizo reír a mandíbula batiente al club de revistas del MIT es un estadounidense nacionalizado, Graham Fleming. Nacido en Barrow, en el norte de Inglaterra en 1949, Fleming dirige ahora un grupo de la Universidad de Berkeley, en California, que está reconocido como uno de los principales equipos de investigación mundiales en este campo, y que emplea una técnica que tiene el impresionante título de «espectroscopia electrónica bidimensional transformada de Fourier» (2D-FTES). La 2D-FTES puede sondear la estructura interna y la dinámica de los sistemas moleculares más diminutos, al dirigirles pulsos de láser de corta duración y muy enfocados. El grupo ha realizado la mayor parte de su trabajo estudiando no plantas, sino un complejo fotosintético llamado proteína de Fenna-MatthewsOlson (FMO), que es producido por unos microbios fotosintéticos, las bacterias verdes del azufre, que se encuentran en las profundidades de masas de agua ricas en sulfuro, como el mar Negro. Para sondear la muestra de clorofila, los investigadores dispararon tres pulsos sucesivos de luz de láser a los complejos fotosintéticos. Estos pulsos depositan su energía en ráfagas muy rápidas y sincronizadas de manera precisa, y generan una señal de luz procedente de la muestra que es captada por detectores.

Greg Engel, el autor principal del artículo, pasó toda la noche uniendo los datos generados a partir de señales que cubrían un tiempo de 50 a 600 femtosegundos, \* para producir un gráfico de sus resultados. Lo que descubrió fue una señal que subía y bajaba y oscilaba durante al menos seiscientos femtosegundos (véase figura 4.7). Estas oscilaciones son equivalentes al patrón de interferencia de las franjas brillantes y oscuras del experimento de doble rendija; o el equivalente cuántico de las pulsaciones sonoras que se escuchan al afinar un instrumento musical. Esta «pulsación cuántica» demostraba que el excitón no tomaba una única ruta a través del laberinto de clorofila, sino que seguía múltiples rutas de manera simultánea (véase figura 4.8). Estas rutas alternativas actúan un poco como las notas pulsadas de una guitarra que casi está afinada: generan pulsaciones cuando son casi de la misma longitud.

Pero recuérdese que dicha coherencia cuántica es muy delicada y resulta extraordinariamente difícil de mantener. ¿Era de veras factible que un microbio o planta fuera capaz de vencer los heroicos esfuerzos de los mejores y más brillantes investigadores en computación cuántica del MIT para mantener a raya la decoherencia? Esta era, en realidad, la atrevida afirmación que se hacía en el artículo de Fleming, y era esta «tontería cuántica», tal como la había descrito Seth Lloyd, lo que les ponía los pelos de punta a los miembros del club de revistas del MIT. El grupo de Berkeley sugería que el complejo FMO actuaba como un ordenador cuántico para encontrar la ruta más célere hasta el centro de reacción, un desafiante problema de optimización, equivalente al famoso problema matemático del viajante de comercio que, para planes de viaje que impliquen más de unos pocos destinos, solo se puede resolver con un ordenador muy potente. \*

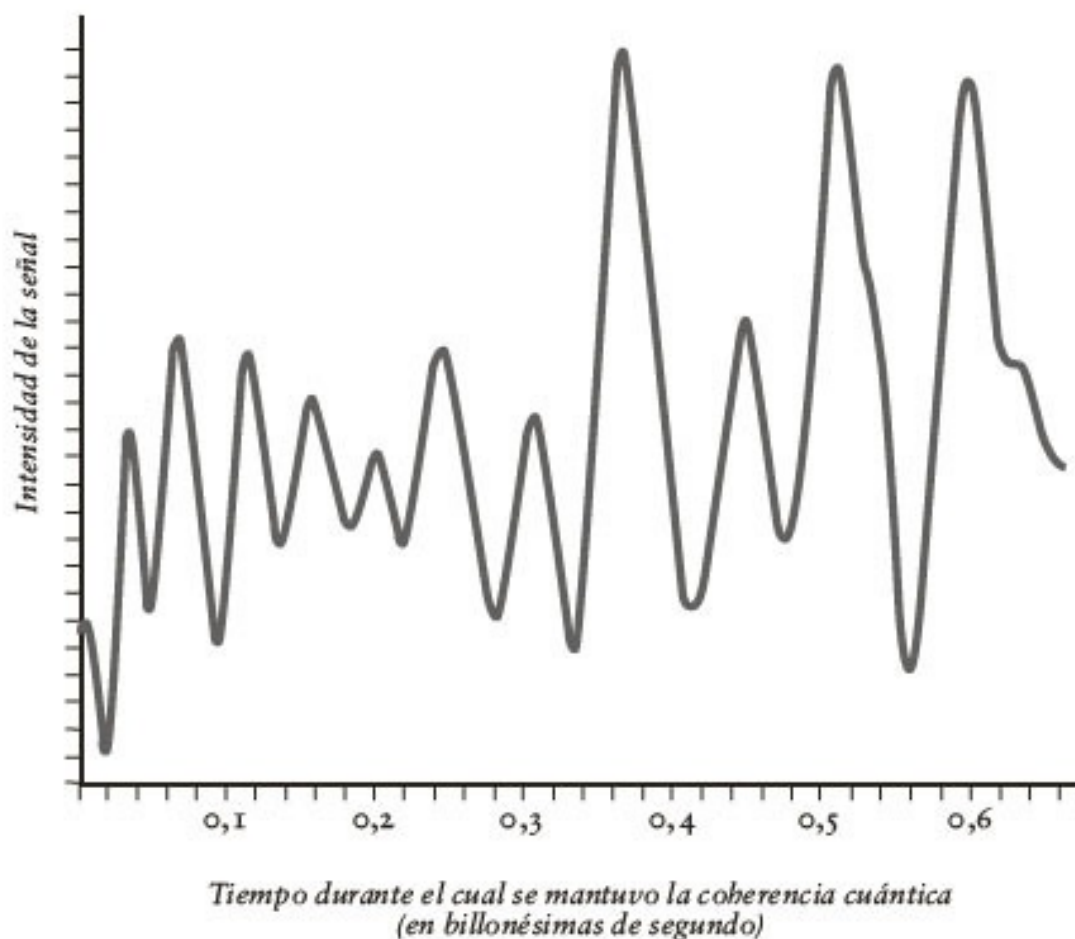


FIGURA 4.7. Los latidos cuánticos que Graham Fleming y sus colegas vieron en su experimento de 2007. Lo importante no es la forma irregular de las oscilaciones, sino el hecho de que haya oscilaciones.

A pesar de su escepticismo, el club de las revistas encargó a Seth Lloyd la tarea de investigar aquella afirmación. Para sorpresa de todo el mundo que trabajaba en el MIT, la conclusión del trabajo detectivesco de Lloyd fue que realmente las afirmaciones del grupo de California tenían entidad. Las pulsaciones que el grupo de Fleming había descubierto en el complejo FMO eran realmente una rúbrica de coherencia cuántica, y Lloyd llegaba a la conclusión de que las moléculas de clorofila operaban una nueva estrategia de búsqueda conocida como paseo cuántico.

Puede apreciarse la ventaja de un paseo cuántico sobre un paseo aleatorio clásico si volvemos a nuestro borracho de movimientos lentos e imaginamos que el bar del que acaba de salir tiene una fuga de agua y que esta sale por debajo de la puerta. A diferencia de nuestro bebedor ebrio, que debe elegir una única ruta, las ondas de agua que salen del bar avanzan en todas las direcciones posibles. Nuestro caminante borracho se verá pronto sobrepasado, pues la onda acuosa avanzará por las calles a una tasa simplemente proporcional al tiempo empleado, no a su raíz cuadrada. De modo que si al cabo de un segundo ha avanzado un metro, entonces a los dos segundos habrá recorrido dos metros, y a los tres segundos tres metros, y así sucesivamente. Y no solo eso, sino que, como el átomo superpuesto en el experimento de doble rendija, debido a que se desplaza de manera simultánea por todas las rutas posibles, alguna parte del frente de onda encontrará definitivamente la casa del borracho mucho antes que el propio beodo.

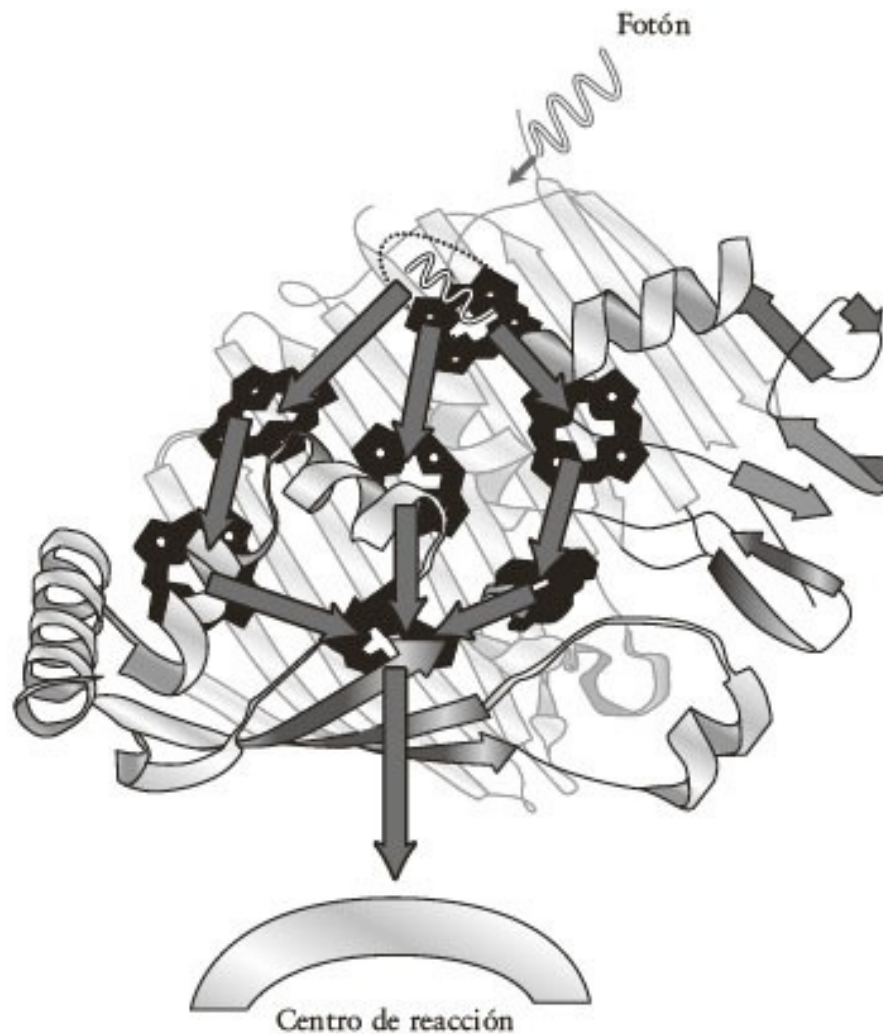


FIGURA 4.8. El excitón se desplaza a través de la proteína FMO siguiendo múltiples rutas al mismo tiempo.

El artículo de Fleming causó su propia oleada de sorpresa y consternación, que fue mucho más allá del club de las revistas del MIT. Pero algunos comentaristas no tardaron en señalar que los experimentos se realizaron con complejos de FMO aislados enfriados a 77 °K (una gélida temperatura de  $-196^{\circ}\text{C}$ ): evidentemente, mucho más fría que cualquier temperatura compatible con la fotosíntesis vegetal o incluso con la vida, pero lo bastante baja para mantener a raya aquella molesta decoherencia. ¿Qué relevancia podían tener estas bacterias congeladas para cualquiera de los procesos que tienen lugar en el cálido y desorganizado interior de las células vegetales?

Sin embargo, pronto resultó evidente que la coherencia cuántica no se limitaba a complejos de FMO fríos. En 2009, Ian Mercer, del University College de

Dublín, detectó pulsaciones cuánticas en otro sistema fotosintético (o fotosistema) bacteriano, denominado Complejo Captador de Luz II (LHC2, Light Harvesting Complex II), que es muy parecido a un fotosistema vegetal, pero a temperaturas ambiente comunes en las que plantas y microbios realizan normalmente la fotosíntesis. <sup>4</sup> Más tarde, en 2010, Greg Scholes, de la Universidad de Ontario, demostró que había pulsaciones cuánticas en el fotosistema de un grupo de algas acuáticas (que, a diferencia de las plantas superiores, carecen de raíces, tallos y hojas) llamadas criptófitos, que son extraordinariamente abundantes, hasta el punto de que eran las responsables de fijar tanto carbono atmosférico (es decir, de extraer dióxido de carbono atmosférico) como las plantas superiores. <sup>5</sup> Por la misma época, Greg Engel demostró pulsaciones cuánticas en el mismo complejo de FMO que había estudiado en el laboratorio de Graham Fleming, pero ahora a temperaturas muy superiores, capaces de sostener la vida. <sup>6</sup> Y por si acaso el lector puede pensar que este fenómeno notable se halla limitado a bacterias y algas, Tessa Calhoun y sus colegas del laboratorio de Fleming en Berkeley detectaron recientemente pulsaciones cuánticas en otro sistema LHC2, esta vez en las espinacas. <sup>7</sup> El LHC2 está presente en todas las plantas superiores y contiene el 50 % de toda la clorofila del planeta.

Antes de seguir adelante describiremos brevemente de qué manera se usa la energía del excitón derivada de la solar, tal como Feynman describió, para hacer saltar «el oxígeno del carbono... ¡y que deja el carbono, y el agua, para hacer la sustancia del árbol!»... o de la manzana. <sup>\*</sup>

Una vez que llega la suficiente energía al centro de reacción, provoca que una pareja especial de moléculas de clorofila (llamadas P680) expulsen electrones. Descubriremos algo más de lo que ocurre dentro del centro de reacción en el capítulo 10, pues se trata de un lugar fascinante que puede albergar otro proceso cuántico nuevo. El origen de estos electrones es el agua (que, recuerde el lector, es uno de los ingredientes en la descripción que Feynman hizo de la fotosíntesis). Tal como descubrimos en el capítulo anterior, la captación de electrones procedentes de cualquier sustancia se denomina oxidación, y es el mismo proceso que tiene lugar durante la combustión. Cuando la madera quema en el aire, por ejemplo, los átomos de oxígeno extraen electrones de los átomos de carbono. Los electrones de la órbita exterior del carbono están fijados de manera relativamente laxa, que es la razón por la que el carbono quema con facilidad. Sin embargo, en el agua se hallan sujetos de manera muy firme: los sistemas fotosintéticos son únicos porque son el único lugar en el mundo natural

en los que el agua se «quema» para ceder electrones. \*

Hasta aquí, todo correcto: ahora tenemos una cantidad de electrones libres gracias a la energía cedida por los excitones de la clorofila. A continuación, la planta necesita enviar estos electrones allí donde puedan hacerse trabajar. Primero son captados por el transportador de electrones específico de la célula, NADPH. \*\* En el capítulo anterior conocimos brevemente una molécula similar, NADH, donde estaba implicada en hacer llegar los electrones captados de los nutrientes, como los azúcares, a la cadena respiratoria de enzimas en los orgánulos energéticos de la célula, las mitocondrias. Si el lector recuerda, los electrones captados que eran cedidos a las mitocondrias por el NADH fluían después a lo largo de una cadena respiratoria de enzimas como una especie de corriente eléctrica que se usaba para bombear protones a través de una membrana, y el reflujo resultante de estos protones se utilizaba para producir el transportador de energía de la célula, el ATP. Un proceso muy parecido se emplea en los cloroplastos de las plantas para producir ATP. El NADPH cede los electrones que transporta a una cadena de enzimas que, de manera parecida, extrae protones de la membrana del cloroplasto. El reflujo de estos protones se usa para producir moléculas de ATP, que después pueden dedicarse a hacer funcionar los numerosos procesos ávidos de energía en la célula vegetal.

Pero el proceso real de fijación de carbono, la captación de átomos de carbono del dióxido de carbono en el aire y su uso para producir moléculas orgánicas ricas en energía como los azúcares, tiene lugar fuera del tilacoide, aunque todavía dentro del cloroplasto. Esto lo realiza un enzima grande y voluminoso llamado RuBisCO, \* que tal vez sea la proteína más abundante de la Tierra, pues ha de efectuar la mayor de las tareas: producir casi toda la biomasa del planeta. Dicho enzima fija el átomo de carbono extraído del dióxido de carbono a una molécula sencilla de azúcar de cinco carbonos, llamada ribulosa 1,5 bifosfato, para producir un azúcar de seis carbonos. Para lograr dicha hazaña utiliza los dos ingredientes que se le han suministrado: electrones (cedidos por el NADPH) y una fuente de energía (ATP). Ambos ingredientes son el producto de los procesos de la fotosíntesis impulsados por la luz.

El azúcar de seis carbonos producido por la RuBisCO se descompone rápidamente en dos azúcares de tres carbonos que después son unidos en gran cantidad de maneras diferentes para producir todas las biomoléculas que constituyen un manzano, incluidas sus manzanas. El aire y el agua inanimados de Nueva Inglaterra se han convertido, con ayuda de la luz y una pizca de mecánica cuántica, en el tejido vivo de un árbol de Nueva Inglaterra.

Si comparamos la fotosíntesis de las plantas con la respiración (la combustión de nuestro alimento) que tiene lugar en nuestras propias células, que se comentó en el capítulo anterior, el lector puede ver que, bajo la piel, animales y plantas no son tan diferentes. La distinción esencial reside en dónde obtenemos nosotros, y ellas, los constituyentes básicos y fundamentales de la vida. Ambos necesitamos carbono, pero las plantas lo obtienen del aire mientras que nosotros lo conseguimos de fuentes orgánicas, como las mismas plantas. Ambos necesitamos electrones para construir biomoléculas: nosotros quemamos moléculas orgánicas para captar sus electrones, mientras que las plantas utilizan la luz para quemar el agua y captar sus electrones. Y ambos necesitamos energía: nosotros la obtenemos de los electrones muy energéticos que conseguimos de nuestro alimento, haciéndolos descender por las laderas de energía respiratoria; las plantas captan la energía de los fotones solares. Cada uno de estos procesos implica el movimiento de partículas fundamentales que se rigen por reglas cuánticas. Parece que la vida emplea procesos cuánticos para que le echen una mano.

El descubrimiento de coherencia cuántica en sistemas cálidos, húmedos y turbulentos, como plantas y microbios, ha supuesto una gran conmoción para los físicos cuánticos, y en la actualidad gran cantidad de investigación se centra precisamente en descubrir de qué manera los sistemas vivos protegen, y utilizan, sus delicados estados cuánticos coherentes. Volveremos a este enigma en el capítulo 10, en el que examinaremos algunas respuestas posibles y muy sorprendentes que pueden incluso ayudar a los físicos, como aquellos teóricos cuánticos del MIT, a construir ordenadores cuánticos prácticos que puedan funcionar en nuestra mesa, en lugar de hacerlo en nuestro congelador. Asimismo, es probable que la investigación inspire una nueva generación de tecnologías fotosintéticas artificiales. Las células solares actuales se basan, en líneas generales, en principios fotosintéticos y ya compiten con los paneles solares por una parte del mercado de las energías limpias, pero su eficiencia se halla limitada por pérdidas durante el transporte de energía (en el mejor de los casos, la eficiencia es del 70%, comparado con casi el cien por cien de eficiencia de la fase de captación de la energía de los fotones en la fotosíntesis). Aportar la coherencia cuántica inspirada en la biología a las células solares tiene el potencial de aumentar mucho la eficiencia de la energía solar, y con ello producir un mundo más limpio.

Por último, permítasenos dedicar un momento en este capítulo a considerar la importancia de lo que hemos añadido a nuestros conocimientos de lo que es

especial acerca de la vida. Considere el lector de nuevo estas pulsaciones cuánticas que Greg Engel vio por primera vez en sus datos del complejo de FMO, que demuestran que dentro de las células las partículas se desplazan como ondas. Existe la tentación de pensar que estos fenómenos confinados al laboratorio no tienen importancia fuera de la experimentación bioquímica. Pero las investigaciones subsiguientes han demostrado que también existen en realidad en el mundo natural, dentro de las hojas, en algas y en microbios, y que desempeñan un papel, posiblemente un papel crucial, en la construcción de nuestra biosfera.

Aun así, el mundo cuántico nos parece muy extraño, y a menudo se afirma que esta extrañeza es un síntoma de una división fundamental entre el mundo que vemos a nuestro alrededor y sus cimientos cuánticos. Pero, en realidad, existe un único conjunto de leyes que rigen la manera en que el mundo se comporta: las leyes cuánticas. \* Las leyes estadísticas y las leyes newtonianas, tan familiares, son, en último término, leyes cuánticas que han sido filtradas a través de una lente de decoherencia que elimina el material raro (que es la razón por la que los fenómenos cuánticos nos parecen raros). Si cavamos a mayor profundidad, siempre encontraremos la mecánica cuántica acechando en el centro de nuestra realidad familiar.

Más todavía: determinados objetos macroscópicos son sensibles a los fenómenos cuánticos; y la mayoría de ellos son objetos vivos. En el capítulo anterior descubrimos que el efecto de túnel cuántico dentro de los enzimas puede suponer una diferencia para células enteras; y aquí hemos explorado de qué modo el acontecimiento inicial de captación de fotones responsable de introducir la mayor parte de la biomasa en el planeta parece depender de una delicada coherencia cuántica, que puede mantenerse durante períodos de tiempo biológicamente relevantes dentro del interior cálido, pero muy organizado, de una hoja o un microbio. De nuevo vemos el orden a partir del orden de Schrödinger capaz de captar acontecimientos cuánticos, y lo que Jordan denominó amplificación de los fenómenos cuánticos en el mundo macroscópico. La vida parece abarcar los mundos cuántico y clásico, posada sobre el límite cuántico.

Ahora dirigiremos nuestra atención a otro proceso esencial para nuestra biosfera. El manzano de Newton no habría podido producir ninguna manzana si sus flores no hubieran sido polinizadas primero por aves e insectos, en particular abejas. Pero las abejas tenían que encontrar las flores de manzano; y lo hicieron empleando otra capacidad que muchos creen que está accionada por la mecánica



cuántica: el sentido del olfato.

## BUSCANDO LA CASA DE NEMO

La nariz, por ejemplo, de la que ningún filósofo ha hablado nunca con veneración y gratitud [...] la nariz es, aunque sea provisionalmente, el instrumento más delicado que tenemos a nuestra disposición. Es un instrumento capaz de registrar los cambios más mínimos que escapan incluso a la detección espectroscópica.

FRIEDRICH NIETZSCHE,  
*El crepúsculo de los ídolos*, 1889

Parece que nos aportan un determinado mensaje procedente de una realidad material.

GASTON BACHELARD,  
*La formation de l'esprit scientifique, contribution à une psychoanalyse de la connaissance objective*, 1938

Acurrucado dentro de los brazos de una anémona marina letal, que se halla instalada en un arrecife coralino en aguas del litoral de Isla Verde, en las Filipinas, hay una pareja de pequeños peces listados de color anaranjado y blanco, conocidos como peces payaso, o de una manera más adecuadamente, peces de las anémonas, o de una manera más apropiada todavía, *Amphiprion ocellaris*. Uno de los componentes de la pareja, una hembra, ha llevado una vida más interesante que la mayoría de los vertebrados, porque no siempre ha sido hembra. Como todos los peces de las anémonas, empezó su vida como un macho más pequeño que había estado subordinado a la única hembra del grupo de peces que habitaban en esta anémona concreta. Los peces payaso tienen una estructura social rígida, y cuando era macho, este en concreto había competido con los demás machos hasta que consiguió convertirse en dominante y tuvo el honor de aparearse con la única hembra. Pero cuando a su pareja se la comió una morena que pasaba por allí, los ovarios, que habían permanecido latentes en su cuerpo durante varios años, maduraron, sus testículos dejaron de funcionar y el pez payaso macho se convirtió en la hembra reina, dispuesta a aparearse con el macho que la seguía en el orden jerárquico.

Los peces de las anémonas son habitantes comunes de los arrecifes de coral,

desde el océano Índico hasta el océano Pacífico occidental, y se alimentan de plantas, algas, plancton y animales tales como moluscos y pequeños crustáceos. Su pequeño tamaño, colores vivos y ausencia de espinas, aletas, pinchos o púas acerados los convierten en presas fáciles para las morenas, tiburones y otros depredadores que recorren el arrecife. Cuando se ven amenazados, su principal medio de defensa es introducirse rápidamente entre los tentáculos de su anémona patrón, de cuyos aguijones venenosos están protegidos por una gruesa capa de mucus que recubre sus escamas. A su vez, la anémona se beneficia de sus coloridos inquilinos, que ahuyentan a los intrusos inoportunos, como los peces mariposa, que son ramoneadores.

Fue en este escenario donde los peces de las anémonas se nos hicieron familiares en la película de animación *Buscando a Nemo*. \* El desafío al que se enfrentaba el padre de Nemo, Marlin, era encontrar a su hijo, al que habían secuestrado de su hogar en el Gran Arrecife Barrera para trasladarlo directamente a Sídney. Pero el desafío que persigue a los peces payaso reales es encontrar el camino de retorno a su hogar.

Cada anémona puede ser anfitriona de una colonia entera de peces payaso, que contiene un macho y una hembra dominantes junto a varios machos juveniles que rivalizan entre sí por el papel de consortes de la reina. La insólita capacidad del macho dominante de cambiar de sexo cuando la reina muere, una capacidad conocida como hermafroditismo proterándrico, puede ser una adaptación a la vida en el peligroso arrecife, pues permite que la colonia sobreviva a la pérdida de la única hembra reproductora sin tener que abandonar la protección de la anémona patrón. Pero aunque toda una colonia de peces puede permanecer residente en una única anémona durante muchos años, la progenie de dichos peces ha de abandonar la seguridad de su hogar. Y, por último, necesitarán encontrar su camino de vuelta.

La luna llena es la pista para que la mayoría de los peces del coral inicien la freza. \* Cuando la luna empieza a menguar sobre el océano, la hembra de la pareja se mantiene ocupada con la puesta de huevos que el macho dominante fecundará. A partir de ahí, su tarea ha terminado; vigilar los huevos y ahuyentar a los peces carnívoros del arrecife es tarea del macho del pez de las anémonas. Al cabo de más o menos una semana de custodia, los huevos hacen eclosión y cientos de larvas son lanzadas a las corrientes.

Las larvas de peces de las anémonas tienen solo unos pocos milímetros de longitud y son casi completamente transparentes. Durante una semana derivan a merced de las corrientes oceánicas, mientras se alimentan de zooplancton. Como

sabr  quien haya buceado en aguas de arrecifes de coral, derivar a merced de una corriente oceánica no tarda en llevarnos lejos del punto de partida; de modo que las larvas de peces de las  nemonas pueden verse apartadas muchos kilómetros de su arrecife natal. La mayoría son devoradas, pero algunas sobreviven; al cabo de más o menos una semana, estos pocos afortunados nadan hasta el fondo marino y, al cabo de un día, se metamorfosean (como nuestra rana del capítulo 3) en su forma juvenil, que es una versión más pequeña del pez adulto. Al carecer de la protección de la  nemona venenosa, el juvenil de brillantes colores es muy vulnerable frente a los depredadores que rondan por las aguas bentónicas. Si quiere sobrevivir, tiene que encontrar sin demora un arrecife coralino en el que pueda conseguir un santuario.

Se pensaba que las larvas de los peces arrecifales derivaban con las corrientes oceánicas y que se basaban en el puro azar para ser arrastradas cerca de un arrecife adecuado. Pero esta explicación no acababa de tener sentido, puesto que se sabía que la mayoría de las larvas son buenas nadadoras y que no tiene sentido nadar si no se sabe adónde se va a ir. En 2006, Gabriele Gerlach, una investigadora del famoso Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, en Massachusetts, realizó la identificación genética de peces que vivían en arrecifes separados entre tres y veintitrés kilómetros dentro del complejo que forma el Gran Arrecife Barrera de Australia. Descubrió que los peces que viven en el mismo arrecife est n emparentados entre sí de manera mucho más estrecha que con los que habitan en arrecifes más distantes. Puesto que todas las larvas de peces arrecifales se dispersan a lo largo de grandes distancias, el descubrimiento solo tiene sentido si la mayoría de los adultos regresan al arrecife en que nacieron. De alguna manera, cada larva de pez arrecifal debe de estar improntada con una rúbrica que identifica su área de freza.

Pero  c mo saben la larva o juvenil del pez de las  nemonas que han derivado tan lejos de su hogar en qué dirección han de nadar? El fondo marino no proporciona ninguna pista visual útil. Carece de puntos de referencia, de modo que tiene el mismo aspecto en todas direcciones: un desierto arenoso decorado con algunos guijarros y peñascos dispersos y el ocasional artrópodo errante. Es improbable que el distante arrecife coralino proporcione ninguna señal auditiva que pueda recorrer varios kilómetros. Las mismas corrientes son un problema adicional, pues la dirección del flujo varía con la profundidad y puede ser muy difícil determinar si la masa de agua se mueve o permanece estacionaria. No hay pruebas de que los peces de las  nemonas posean el tipo de brújula magnética que ayudó a guiar a nuestra hembra de petirrojo en su migración invernal. Así

pues, ¿cómo encuentran su camino?

Los peces poseen un agudo sentido del olfato. Se sabe que los tiburones, dos tercios de cuyos cerebros están dedicados a la olfacción, pueden oler una gota de sangre a más de un kilómetro de distancia. ¿Quizá los peces arrecifales huelen su camino de retorno al hogar? Para poner a prueba esta teoría, en 2007 Gabriele Gerlach diseñó un «test de dos canales de elección olfativa», en los que se situaban larvas de peces arrecifales aguas abajo de dos corrientes de agua de mar: una procedente del arrecife en el que habían eclosionado, y la otra, de un arrecife distante. Después, la investigadora midió qué corriente de agua preferían las larvas, la hogareña o la distante.

De manera invariable, las larvas de peces nadaron hacia la corriente de agua procedente del arrecife en el que habían salido del huevo. Podían discriminar con claridad entre las aguas del arrecife natal y las extrañas, presumiblemente porque no huelen igual. Michael Arvedlund, un investigador de la Universidad James Cook, de Queensland, en Australia, utilizó un dispositivo experimental parecido para demostrar que los peces de las anémonas pueden oler su especie de anémona anfitriona y distinguirla de otras que no colonizan. Más notable todavía, Daniella Dixon, también de la Universidad James Cook, descubrió que los peces payaso pueden distinguir entre el agua tomada de su hábitat preferido en los arrecifes, que se encuentran debajo de islas con vegetación, y el agua situada más allá del arrecife, menos preferida. A decir verdad, parece que Nemo y otros peces arrecifales huelen el camino de vuelta a casa.

La capacidad de los animales de navegar con su sentido del olfato es legendaria. Cada año, a lo largo de las costas de océanos de todo el mundo, millones de salmones se reúnen en grandes cardúmenes en las desembocaduras de los ríos antes de aventurarse tierra adentro y luchar contra el flujo de la corriente, los rápidos, las cascadas y los bancos de arena hasta alcanzar sus lugares de freza. Al igual que con los peces de las anémonas, se creía que la selección por parte de los salmones de un río conveniente era, en gran medida, cosa del azar. Pero en 1939, el canadiense Wilbert A. Clemens marcó 469.326 jóvenes salmones capturados en un afluente concreto del sistema del río Fraser. Años después, capturó a 10.958 de los que había marcado y que habían regresado al mismo afluente. No se capturó ni un solo salmón marcado en ningún otro afluente del río. Ninguno había errado el camino en su viaje desde el océano al tributario que era su hogar. \* La manera en que consiguen navegar a través del océano y de los ríos fue un misterio durante muchos años. Pero el profesor Arthur Hasler, de la Universidad de Wisconsin en Madison, sugirió que

los jóvenes salmones siguen un rastro oloroso, y puso a prueba su teoría en 1954 capturando varios cientos de peces que retornaban río arriba de un horcajo (confluencia de dos ríos) en el río Issaquah, cerca de Seattle, y transportándolos después río abajo, antes de la confluencia. De manera invariable, los salmones retornaban a la misma rama del horcajo en la que habían sido capturados. Pero cuando bloqueó sus orificios nasales con tapones de algodón antes de soltarlos, remontaron la confluencia en el río tomando un camino y otro, y no pudieron decidir si seguir hacia la derecha o hacia la izquierda.

El sentido olfativo es quizá más notable todavía en tierra porque el volumen de la atmósfera, en el que se diluyen los odorantes, es mucho mayor que el del océano. La atmósfera se halla sometida asimismo a un mayor grado de turbulencia, debido al tiempo atmosférico, de modo que las moléculas olorosas se dispersan más rápidamente en el aire que en el agua. Pero el sentido del olfato es vital para la supervivencia de la mayoría de los animales terrestres, y es utilizado no solo para encontrar el camino de regreso al hogar, sino también para capturar presas, escapar de los depredadores, encontrar pareja, proporcionar señales de alarma, marcar el territorio, desencadenar cambios fisiológicos y comunicarse. Todo este «paisaje oloroso» del olfato es mucho menos evidente para los humanos, que a menudo emplean los sentidos olfativos mucho más agudos de sus animales de compañía para detectar estas señales y signos. Es bien sabido, desde luego, que a los perros les interesa mucho olfatear, y que el sabueso, cuyo epitelio olfativo (del que se hablará más adelante) tiene un tamaño que es cuarenta veces el nuestro, es ciertamente famoso por su capacidad para seguir el rastro de olor de un único individuo. Todos hemos visto esas películas en las que aparece un perro que es buen rastreador y solo necesita olisquear rápidamente la camisa que se quitó un preso huido para poder rastrear al villano a través de páramos, bosques y ríos. Y aunque los relatos pueden ser de ficción, la capacidad del sabueso es totalmente real. Los perros pueden deducir a partir de una pista en qué dirección se desplaza una persona o animal, y pueden seguir una pista olorosa que se remonte a varios días.

El sorprendente poder del sentido del olfato de los animales puede apreciarse si reflexionamos sobre las hazañas que un sabueso o un pez de las anémonas realizan de manera habitual. Pensemos primero en el sabueso. Su sentido del olfato está ajustado para detectar cantidades minúsculas de sustancias químicas orgánicas, como el ácido butírico, que difunden los humanos y otros animales; y la sensibilidad de su nariz es extraordinaria. Si en una habitación se dejara evaporar un solo gramo de ácido butírico, los humanos seríamos apenas capaces

de detectar su olor dulce y rancio. Pero un perro podría detectar el mismo gramo de sustancia química si sus vapores se diluyeran para llenar el aire de toda una ciudad hasta una altura de cien metros. Y considere de nuevo el lector aquellos peces payaso o salmones que detectan el olor de su distante hogar, a kilómetros de distancia, diluido en la inmensidad del océano.

Pero el sentido animal del olfato no solo es notable por su sensibilidad. También nos interesa su elevado poder discriminatorio. De manera habitual, los funcionarios de aduanas emplean perros para detectar una amplia gama de odorantes, desde drogas como marihuana y cocaína hasta sustancias químicas en explosivos como el C-4, a menudo a través de un empaquetamiento denso y una maleta. También pueden distinguir entre los olores de individuos, incluso entre gemelos idénticos. Así pues, ¿cómo lo hacen? ¿No es cierto que el ácido butírico que emite uno de nosotros es el mismo ácido butírico que es liberado por todos nosotros? Desde luego que sí; pero, junto al ácido butírico, cada uno de nosotros emite un cóctel delicado y complejo de cientos de moléculas orgánicas que proporciona una rúbrica de nuestra presencia que es tan individual como nuestras huellas dactilares. «Ver» nuestra huella olfativa les resulta a los perros tan fácil como a nosotros ver el color de la camisa de una persona. Los peces payaso y los salmones han de reconocer de manera parecida el olor de su hogar, del mismo modo que nosotros podemos identificar nuestra calle o advertir el color de la puerta de entrada a nuestra casa.

Pero tanto los perros como los salmones o los peces payaso no son los atletas supremos de la olfacción. El sentido del olfato de un oso es más de siete veces más sensible que el de un sabueso, y puede oler un cadáver a veinte kilómetros de distancia. Una polilla puede oler a una pareja a una distancia de unos diez kilómetros; las ratas huelen en estéreo y las serpientes huelen con su lengua. Todas estas habilidades olfativas son esenciales para animales que han de buscar comida, encontrar pareja o evitar a los depredadores; han desarrollado por evolución una sensibilidad a pistas volátiles que delatan la proximidad de estos recursos o peligros, ya sea en el aire o el agua. El sentido del olfato es tan importante para la supervivencia de los animales que las respuestas de comportamiento a los olores parecen ser innatas en varias especies. Unos experimentos con topillos de las islas Orcadas demostraron que evitan las trampas en las que en el cebo se han colocado secreciones de arañas, que son sus depredadores, ¡aunque hace cinco mil años que los arañas están ausentes de las islas!

Se dice que los humanos poseen un sentido del olfato mucho más pobre que el

de nuestros parientes. Cuando, hace varios millones de años, *Homo erectus* levantó la parte superior de su cuerpo del suelo del bosque para andar erguido, levantó también la nariz del suelo y de su rica fuente de aromas. Más tarde, la vista y el oído, ambos sentidos más eficientes desde una perspectiva más elevada, se convirtieron en sus principales fuentes de información. De modo que el hocico humano se hizo más corto, los agujeros nasales se estrecharon y las mutaciones se acumularon en la mayoría del millar de genes ancestrales mamíferianos que codifican los receptores olfativos (se hablará más de ellos más adelante). También perdimos, quizá por desgracia, un sentido olfativo auxiliar que se encuentra en otros animales y que confiere el órgano vomeronasal (OVN) u órgano de Jacobson, cuyo papel es el de detectar feromonas sexuales.

Pero, a pesar de nuestro repertorio genético disminuido de solo unos trescientos genes de receptores olfativos y de nuestra anatomía alterada, hemos conservado un sentido del olfato sorprendentemente bueno. No podemos rastrear mediante el olfato a nuestra pareja o nuestra cena desde varios kilómetros de distancia, pero somos capaces de discriminar entre unos diez mil aromas diferentes y, tal como Nietzsche señaló, nuestra nariz puede superar «incluso a la detección espectroscópica» de sustancias químicas olorosas. Nuestra capacidad de apreciar aromas ha inspirado parte de nuestra mejor poesía («Una rosa por cualquier otro nombre olería igual de dulce») \* y desempeña un papel fundamental en nuestro sentido de bienestar y alegría.

Nuestro sentido del olfato ha desempeñado asimismo un papel sorprendentemente activo en la historia humana. Los textos más antiguos registran una reverencia por los aromas placenteros y una repugnancia de los malos olores. Los lugares de adoración y meditación solían estar perfumados con fragancias y especias. En la Biblia hebrea, Dios instruye a Moisés para construir un lugar de adoración y le dice: «Toma aromas: estacte, uña aromática, gálbano e incienso purísimo. Aromas e incienso entrarán por cantidades iguales, y harás con ellos el timiama, compuesto según el arte de la perfumería, salado, puro y santo». <sup>1</sup> Los antiguos egipcios tenían incluso un dios del perfume, Nefertum, que también era un dios de la sanación, una especie de aromaterapeuta mítico.

La asociación de la salud con aromas agradables y, al revés, la enfermedad y la putrefacción con los malos olores, hizo que mucha gente creyera que la dirección causal llevaba del olor a la salud o la enfermedad, y no al revés. Por ejemplo, el gran médico romano Galeno enseñaba que las sábanas, colchones y mantas malolientes podían acelerar la polución de los líquidos corporales. Se consideraba que las exudaciones nauseabundas (miasmas) procedentes de



cloacas, osarios, pozos negros y marismas eran el origen de muchas enfermedades fatales. Y al contrario, se pensaba que los aromas agradables repelían la enfermedad, de modo que, en la Europa medieval, los médicos insistían en que, antes de entrar en la casa de una víctima de la peste, aquella tenía que ser completamente aireada y perfumada encendiendo fuegos fragantes perfumados con incienso, mirra, rosas, clavo y otras hierbas aromáticas. De hecho, la profesión de perfumería se dedicó en un primer momento a la desinfección de casas, más que al acicalamiento personal.

La importancia del sentido del olfato no se limita, naturalmente, a detectar odorantes que inspiramos a través de nuestra nariz. Resulta notable que nuestro sentido del gusto se suele considerar, de manera general, que es olfato más o menos en un 90%. Cuando degustamos comida, los receptores del gusto de nuestra lengua y paladar detectan sustancias químicas disueltas en la saliva; pero los receptores se presentan solo en cinco variedades, capaces de identificar combinaciones de solo cinco gustos básicos: dulce, ácido, salado, amargo y umami (un término japonés que significa «gusto sabroso y agradable»). Pero los odorante volátiles que se evaporan de nuestra comida y nuestra bebida penetran en la cavidad nasal desde la parte posterior de nuestra garganta para activar combinaciones de cientos de diferentes receptores olfativos. Estos nos proporcionan una capacidad mucho mayor, en comparación con el gusto, para distinguir entre miles de aromas diferentes y para gozar de los ricos sabores (en su mayoría olores) de los vinos olorosos, la comida aromática, las especias, las hierbas o el café. Y aunque hemos perdido el sentido vomeronasal de que gozan la mayoría de nuestros colegas mamíferos, la enorme industria del perfume constituye una buena prueba del papel que el olor continúa desempeñando en el cortejo y el sexo humanos. Freud relacionó incluso la represión sexual y la sublimación del sentido del olfato en la mayoría de nosotros; no obstante, afirmó que «existen, incluso en Europa, \* personas que aprecian muchísimo el fuerte olor de los genitales». <sup>2</sup>

Así pues, ¿cómo detectan los humanos, los perros, osos, serpientes, polillas, tiburones, ratas o peces de las anémonas estos mensajes «procedentes de una realidad material»? ¿Cómo distinguimos entre una variedad tan amplia de odorantes?

## LA REALIDAD FÍSICA DE LOS OLORES

A diferencia de nuestros sentidos de la vista y el oído, que captan información de

manera indirecta, mediante ondas electromagnéticas u ondas sonoras transportadas hasta nosotros desde un objeto, tanto el gusto como el olfato reciben información directamente del contacto con el objeto detectado (una molécula), que aporta mensajes «procedentes de una realidad material». Ambos sentidos parecen funcionar mediante principios bastante similares. Las moléculas que detectan o bien están disueltas en saliva o bien flotan en el aire y después las captan los receptores que hay en la lengua (gusto) o en el epitelio olfativo del techo de nuestra cavidad nasal (olfato). Esta necesidad de volatilidad significa que la mayoría de los odorantes son moléculas relativamente pequeñas.

La nariz propiamente dicha no desempeña ningún papel directo en la olfacción, aparte de canalizar el aire hacia el epitelio olfativo, que se encuentra en la parte posterior de la nariz (véase figura 5.1). Este tejido es muy pequeño, pues mide solo tres centímetros cuadrados (el tamaño aproximado de un sello de correos) en los humanos, pero está revestido de glándulas secretoras de mucus y de millones de neuronas olfativas. Este tipo de célula nerviosa es al sentido del olfato lo que los bastones y conos retinianos del ojo son para el sentido de la vista. El extremo anterior de la neurona olfativa tiene una forma parecida a la de una escoba, con una cabeza con muchas puntas, en la que la membrana celular está replegada en muchos cilios piliformes. Esta escoba, con su pincel de cilios, sobresale de la capa celular donde puede captar las moléculas de olor que pasan. El extremo posterior de la célula es como el mango de la escoba, que forma el axón de la célula o nervio que se extiende y atraviesa un pequeño hueso en la parte posterior de la cavidad nasal para penetrar en el cerebro, donde conecta con una región llamada bulbo olfativo.

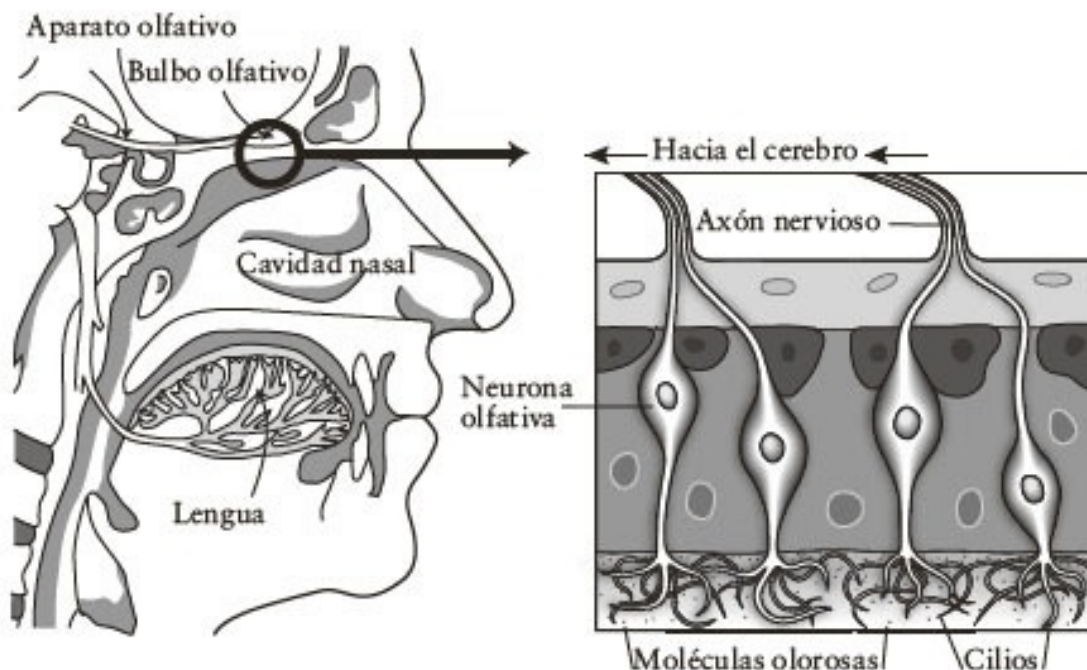


FIGURA 5.1. La anatomía del olfato.

Puede que sea mejor leer el resto de este capítulo con una naranja frente al lector, quizá cortada en gajos para que se liberen los aromas agrios y se desplacen a través de su nariz y alcancen el epitelio nasal. El lector puede incluso introducir uno de los gajos en la boca para permitir que sus odorantes volátiles encuentren su camino a través de la ruta retronasal hasta ese mismo tejido. Como todos los aromas naturales, el olor de una naranja es muy complejo y lo forman cientos de compuestos volátiles, pero uno de los más fragantes es el llamado limoneno, \* cuyo recorrido seguiremos ahora desde la molécula hasta la fragancia.

El limoneno, como implica su nombre, es abundante en los frutos de cítricos como las naranjas y los limones, y es responsable en gran parte de su aroma y sabor agrios. Esta sustancia química pertenece a una clase de compuestos conocidos como «terpenos», que son los constituyentes olorosos de los aceites esenciales de muchas plantas y flores, y que generan los ricos olores de los pinos, rosas, uvas y lúpulo. De modo que el lector tiene la libertad de cambiar la naranja por una copa de cerveza o de vino si lo prefiere. Esta sustancia química se produce en muchas partes de la planta cítrica, incluidas las hojas, pero es muy abundante en la piel de sus frutos, que se puede exprimir para obtener limoneno casi puro.

El limoneno es un líquido volátil que se evapora gradualmente a temperatura

ambiente, de modo que nuestra naranja liberará millones de moléculas de limoneno en el aire circundante. La mayoría de ellas flotarán en la habitación y saldrán de esta por la puerta y las ventanas, pero las corrientes de aire llevarán unas pocas a la nariz del lector. Su siguiente inhalación absorberá varios litros de este aire cargado del odorante, que pasará a través de los orificios nasales y del epitelio nasal del lector, que está tapizado con aproximadamente diez millones de neuronas olfativas.

Cuando las moléculas de limoneno flotan y pasan por los cepillos del epitelio olfativo, algunas son captadas por las neuronas olfativas. La captura de una única molécula de limoneno es suficiente para desencadenar la abertura de un minúsculo canal en la membrana celular de la neurona que permite que un flujo de iones calcio, cargados positivamente, entre en la célula procedente del exterior. Cuando se han capturado unas treinta y cinco moléculas de limoneno, el subsiguiente flujo de iones que entra en la célula supone una minúscula corriente eléctrica de alrededor de un picoampere \* en total. Este nivel de corriente actúa como un interruptor para emitir una señal eléctrica, llamada potencial de acción (descubriremos muchas más cosas sobre los potenciales de acción en el capítulo 8), a lo largo del mango de la célula en forma de cepillo, su axón. Esta señal se desplaza directamente hasta el bulbo olfativo en nuestro cerebro. Después de más procesamiento neural experimentamos este «mensaje procedente de una realidad material» como el aroma agrio de las naranjas.

El acontecimiento clave en todo este proceso es, desde luego, la captura de la molécula olorosa por la neurona olfativa. Así pues, ¿cómo funciona? Por analogía con la visión y las células fotosensibles del ojo, los conos y bastones (que también son tipos de neuronas), cabía esperar que el sentido del olfato lo confiriera algún tipo de receptores olfativos situados en la superficie. Pero, en la década de 1970, la naturaleza e identidad de los receptores olfativos eran totalmente desconocidas.

Richard Axel nació en Brooklyn, Nueva York, en 1946, y era el primer hijo de unos inmigrantes que habían huido de Polonia antes de la invasión nazi. Su infancia fue la típica de aquel barrio: hacía recados para su padre, un sastre, entre partidos de *stickball* (una especie de béisbol callejero, con tapas de alcantarilla como bases y un mango de escoba como bate) o de baloncesto en las calles o patios locales. Su primer empleo, a los once años de edad, fue como mensajero, repartiendo dientes falsos a los dentistas; a los doce colocaba alfombras, y a los trece servía cecina y *pastrami* en una charcutería local. El jefe de cocina era un ruso que solía recitar a Shakespeare mientras cortaba repollos, lo que

proporcionó al joven Richard su primera auténtica exposición al mundo cultural más allá de las charcuterías y de las canchas de béisbol y le inspiró un profundo y perdurable amor por la gran literatura. Un profesor de un instituto local advirtió los talentos intelectuales de Axel, y lo animó a solicitar una beca para estudiar literatura en la Universidad de Columbia, en Nueva York, y la obtuvo.

Como estudiante de primer curso, Axel se lanzó al torbellino intelectual de la vida universitaria en la década de 1960. Pero para poder pagar su estilo de vida, que implicaba asistir a fiestas, aceptó un trabajo lavando utillaje de vidrio en un laboratorio de genética molecular. Quedó fascinado por esta ciencia emergente, pero no tenía ninguna esperanza si seguía lavando vidrio, de modo que lo despidieron de ese trabajo y lo volvieron a contratar como ayudante de investigación. Dividido entre la literatura y la ciencia, acabó decidiendo inscribirse en un curso de grado de genética, pero después pasó a estudiar medicina para librarse de ser reclutado para la guerra de Vietnam. En apariencia, estudiar medicina se le daba tan mal como lavar vidrio. No podía oír un soplo cardíaco y nunca vio una retina; una vez, sus gafas cayeron dentro de una incisión abdominal, e incluso llegó a coser el dedo de un cirujano a su paciente. Al final lo permitieron graduarse a condición de que prometiera que nunca practicaría la medicina en pacientes vivos. Volvió a Columbia para estudiar patología, pero al cabo de un año el catedrático del departamento insistió en que tampoco debía practicar nunca en pacientes muertos.

Al darse cuenta de que la medicina se hallaba claramente más allá de su talento, Axel consiguió volver a investigar en la Universidad de Columbia. A partir de entonces hizo rápidos progresos e incluso inventó una técnica nueva para introducir ADN extraño dentro de células de mamífero, técnica que se convirtió en un soporte principal de la revolución en ingeniería genética y biotecnología de finales del siglo xx y que hizo ganar a la Universidad de Columbia cientos de millones de dólares de ingresos por convenios de patentes: un retorno generoso de su inversión en la beca.

En la década de 1980, Axel se planteó si la biología molecular podía ayudar a resolver el misterio de los misterios: cómo funciona el cerebro humano. Pasó de estudiar el comportamiento de los genes a estudiar los genes para el comportamiento, con el objetivo a largo plazo de «analizar minuciosamente de qué manera los centros superiores del cerebro generan una “percepción”, pongamos por caso, del olor de una lila, o del café, o de una mofeta». <sup>3</sup> Su primera incursión en las neurociencias consistió en investigar el comportamiento de ovoposición de un caracol marino. Por esta época una investigadora de

mucho talento, Linda Buck, se incorporó a su laboratorio. Buck se había formado como inmunóloga en la Universidad de Dallas antes de sentirse fascinada por el campo emergente de la neurociencia molecular y de desplazarse hasta el laboratorio de Axel para ponerse al frente de esa investigación. Juntos, Axel y Buck diseñaron una ingeniosa serie de experimentos para demostrar la base molecular del olfato. La primera cuestión que se plantearon fue la identidad de las moléculas receptoras que se presumía que existían en la superficie de las neuronas olfativas y que captaban e identificaban las diferentes moléculas de odorantes. Extrapolando a partir de lo que se sabía acerca de otras células sensoriales, conjeturaron que los receptores eran algún tipo de proteínas que sobresalían de la membrana celular, donde podían unirse a las moléculas olorosas que pasaran por allí; pero, en aquella época, nadie había aislado ninguno de estos receptores del olor, de modo que nadie tenía idea de qué aspecto presentaban ni de cómo operaban. Todo lo que el equipo sabía para empezar era la sospecha de que los escurridizos receptores podrían pertenecer a una familia de proteínas llamadas receptores acoplados a proteínas G, que se sabía que estaban implicadas en la detección de otros tipos de señales químicas, como las hormonas.

Linda Buck consiguió identificar una familia de genes totalmente nueva que codificaban este tipo de receptor y que tan solo quedaban expresadas \* en las neuronas de receptores olfativos. Y continuó demostrando que estos genes, en efecto, codifican los huidizos receptores que captan los olores. Análisis posteriores demostraron que el genoma de la rata codifica alrededor de un millar de estos receptores, que han sido identificados en fechas recientes, cada uno de los cuales es algo diferente de los demás, y cada uno de los cuales se presupone adaptado a detectar un único odorante. Los humanos poseen un número parecido de genes receptores olfativos, pero dos tercios de ellos han degenerado en lo que se denomina pseudogenes, que son una especie de genes fósiles que han acumulado tantas mutaciones que ya no son funcionales.

Pero ya haya trescientos o mil genes receptores, esta cifra queda muy lejos de la de diez mil olores diferentes que los humanos pueden identificar. Era evidente que no había una correspondencia de uno a uno entre los tipos de receptores de olores y los tipos de olores; de modo que seguía siendo un misterio de qué manera las señales recibidas por los receptores olfativos se transforman en olores. Tampoco quedaba claro de qué manera se repartía entre las diferentes células la tarea de detectar toda la variedad de moléculas olorosas. El genoma de cada célula tiene el conjunto completo de genes de receptores olfativos, de modo

que potencialmente podrían detectar todos los olores. ¿O acaso existe algún tipo de división del trabajo? Para responder a dichas preguntas, el equipo de la Universidad de Columbia diseñó un experimento todavía más ingenioso. Alteraron genéticamente ratones de manera que todas las neuronas olfativas que expresaban un olor concreto se tiñeron de azul. Si todas las células se hubieran teñido de azul, ello habría indicado que todas ellas expresaban aquel receptor. La respuesta fue clara cuando el equipo examinó las células olfativas de los ratones modificados genéticamente: más o menos una célula de cada mil se tiñó de azul. Parecía que cada neurona olfativa no era un generalista, sino un especialista.

No pasó mucho tiempo antes de que Linda Buck se marchara de Columbia para establecer su propio laboratorio en Harvard, y los dos grupos continuaron trabajando en paralelo para disecar muchos de los secretos de la olfacción todavía no resueltos. Pronto inventaron técnicas para aislar neuronas olfativas individuales y para sondear directamente su sensibilidad a determinados odorantes, como el limoneno de la naranja del lector. Descubrieron que cada sustancia química odorante activaba no solo una, sino varias neuronas; también, que neuronas individuales respondían a varios odorante diferentes. Estos hallazgos parecían resolver el enigma de cómo apenas trescientos receptores olfativos pueden identificar diez mil olores diferentes. De la misma manera que solo veintiséis letras pueden combinarse en muchísimas maneras distintas para escribir todas y cada una de las palabras de este libro, así unos pocos cientos de receptores olfativos pueden activarse en billones de combinaciones diferentes para proporcionar la enorme panoplia de aromas.

Richard Axel y Linda Buck recibieron el premio Nobel de 2004 por sus descubrimientos pioneros de «receptores de odorantes y de la organización del sistema olfativo».

#### DESCUBRIENDO LA CLAVE DEL OLOR

Ahora sabemos que el acontecimiento inicial en la detección de un olor, ya sea el de una naranja, un arrecife coralino, una pareja, un depredador o una presa, reside en la unión de una única molécula de odorante a un único receptor olfativo en la superficie del extremo de cepillo de una de aquellas neuronas olfativas en forma de escoba. Pero ¿cómo reconoce cada receptor su propio conjunto de moléculas odorantes, como el limoneno, y no capta y se une a cualquiera de los demás odorante posibles, de todo el océano químico, que podrían pasar flotando sobre el epitelio olfativo?

Este es el misterio fundamental del olfato.

La explicación convencional se basa en lo que se conoce como mecanismo de llave y cerradura. Se cree que las moléculas olorosas encajan en los receptores olfativos como una llave en una bocallave. Por ejemplo, se pensaba que la molécula de limoneno se deslizaba ajustadamente en un receptor olfativo especialista. De alguna manera, en un proceso que sigue sin estar claro, se pensaba que este acontecimiento de unión accionaba la cerradura del receptor y desencadenaba la liberación de una proteína, llamada proteína G, que suele estar ligada a la superficie interior del receptor, algo así como un torpedo se halla fijado a la quilla de un barco. Una vez que la proteína torpedo se dispara a la célula se abre camino hacia la membrana celular, donde abre un canal que permite que moléculas cargadas eléctricamente fluyan al interior de la célula. Esta corriente eléctrica que fluye a través de la membrana hace que la neurona dispare (se comentará más este aspecto en el capítulo 9) y envíe una señal nerviosa que recorre todo el camino desde el epitelio olfativo hasta el cerebro.

El mecanismo de llave y cerradura propone que las moléculas del receptor son complementarias en forma a las moléculas del olor, que encajan dentro de ellas. Una analogía sencilla es la de los rompecabezas de figuras que encajan, con los que juegan los niños pequeños, en los que un bloque cortado de una forma determinada (un círculo, un cuadrado o un triángulo, pongamos por caso) debe encajar en una tabla de madera en la que se ha recortado la forma complementaria. Podemos pensar en cada molécula olorosa como un bloque con una de las formas, de modo que, quizás, un odorante de naranja como el limoneno es un círculo, un odorante de manzana es un cuadrado, y un odorante de plátano, un triángulo. Después podemos imaginar que cada receptor olfativo posee una bolsa de fijación de un odorante que está moldeada en la forma ideal para que la molécula de olfactante encaje limpiamente en su interior.

Desde luego, las moléculas reales rara vez se presentan en estas formas netas, de modo que se presume que las proteínas receptoras reales tienen bolsas de fijación mucho más complejas para que en ellas encajen las formas más intrincadas de las moléculas de odorante reales. La mayoría tal vez sean figuras complejísimas similares a los lugares activos de los enzimas que, como el lector recordará del capítulo 3, se fijan a las moléculas de sustrato. En realidad, se cree que las moléculas de odorante interactúan con las bolsas de fijación de forma parecida a la manera en la que los sustratos de los enzimas están atados a los lugares activos de los enzimas (véase figura 3.4), o incluso a cómo los fármacos interactúan con los enzimas. De hecho, se ha argumentado que comprender el



papel que la mecánica cuántica desempeña en la interacción entre olfactantes y sus receptores podría terminar conduciendo a un diseño de fármacos más eficiente.

En cualquier caso, una predicción clara de la teoría de la forma es que tiene que existir algún tipo de correlación entre la forma molecular de un odorante y su olor: moléculas de odorantes de forma parecida tienen que oler igual, y moléculas de forma muy distinta es probable que tengan olores claramente diferentes.

Uno de los aromas más temidos de la historia humana fue el olor de mostaza o heno podrido en las trincheras de la Primera Guerra Mundial. Los gases invisibles flotaban a través de la tierra de nadie, y apenas el más débil olorillo de mostaza (gas mostaza) o de heno mohoso (fosgeno) podía ser suficiente para proporcionar a un soldado unos pocos segundos preciosos en los que colocarse la máscara antes de que la mortífera sustancia llenara sus pulmones. El químico Malcolm Dyson sobrevivió a un ataque con gas mostaza, y quizá fue su intuición acerca del valor de supervivencia de una nariz aguda lo que lo llevó a meditar sobre la naturaleza del aroma, porque después de la guerra se dedicó a sintetizar muchos compuestos industriales y a utilizar su nariz para oler los productos de sus reacciones sintéticas. Pero a Dyson le sorprendía la ausencia aparente de una relación obvia entre la forma de una molécula y su olor. Por ejemplo, muchas moléculas que poseen formas muy distintas, como los compuestos a-d de la figura 5.2, huelen igual; en este caso, todos ellos tienen un olor almizclado. \* Por el contrario, compuestos que poseen una estructura muy parecida (como los compuestos e y f en la misma figura) suelen tener olores muy diferentes; en este caso, el compuesto f huele como la orina, mientras que el e no huele en absoluto.

[4](#)

Esta conexión que no es en absoluto directa entre la forma de una molécula y su olor era, y sigue siendo, un problema importante para los fabricantes industriales de perfumes, aromas y fragancias. En lugar de poder diseñar un perfume igual que pueden diseñar la forma de la botella del perfume, los perfumistas se ven obligados a basarse en la síntesis química por fuerza bruta y los tests de olisqueo por prueba y error que realizan químicos como Dyson. Pero este advirtió que los grupos de olor (sustancias químicas que huelen igual) los integraban a menudo unos compuestos que incorporaban los mismos grupos químicos, por ejemplo, el átomo de oxígeno enlazado a un átomo de carbono por un doble enlace  $C = O$  en las sustancias químicas que huelen a almizcle en la figura 5.2. Estos grupos químicos son las partes componentes de cualquier

molécula grande y determinan muchas de sus propiedades, que aparentemente incluyen, como observó Dyson, su olor. Otro conjunto de compuestos con un olor parecido es el elevado número de sustancias químicas, con formas moleculares diversas, que poseen un grupo de sulfuro de hidrógeno (S – H), en el que el hidrógeno está enlazado a un átomo de azufre, y que poseen el característico olor a huevos podridos. Dyson acabó proponiendo que lo que la nariz detecta no es la forma de toda la molécula, sino una característica física diferente; a saber, la frecuencia a la que vibran los enlaces moleculares entre sus átomos.

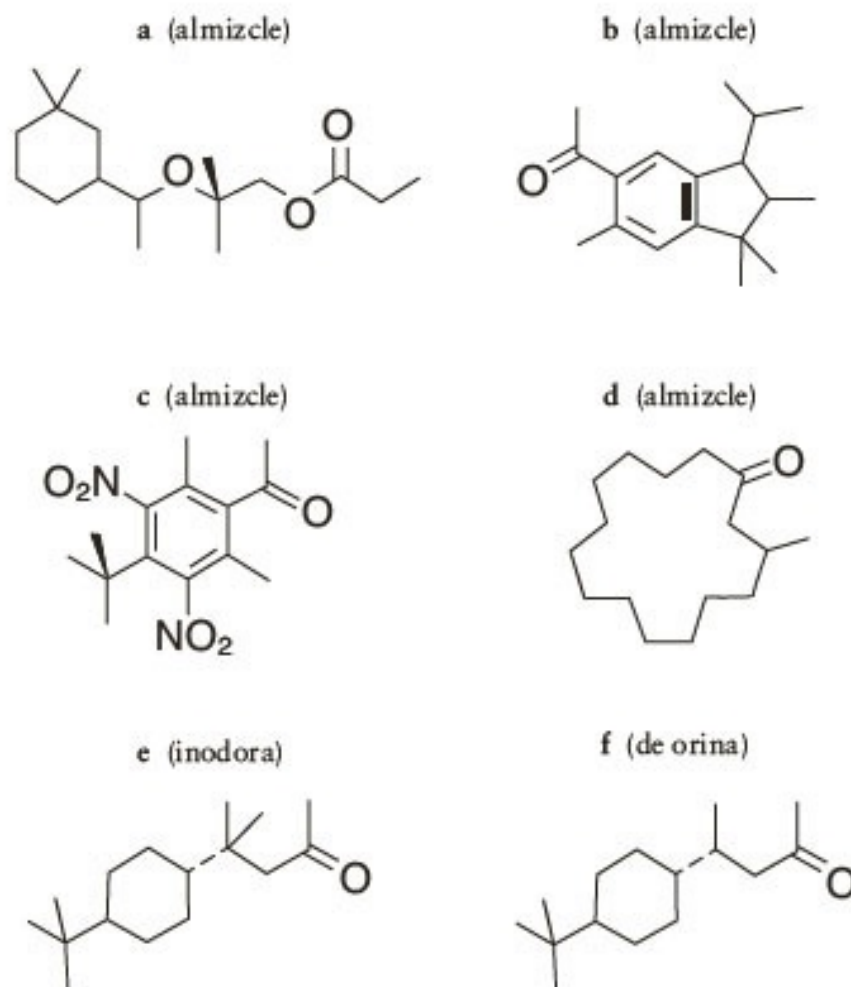


FIGURA 5.2. Las moléculas a-d tienen estructuras muy distintas, pero huelen de manera muy parecida. Las moléculas e y f poseen una estructura casi idéntica, pero tienen olores muy diferentes.

A finales de la década de 1920, cuando Dyson hizo por vez primera esta afirmación, nadie tenía idea alguna de cómo detectar las vibraciones

moleculares. Pero en un viaje a Europa en los primeros años de aquella década, el físico indio Chandrasekhara Venkata Raman quedó fascinado por «la maravillosa opalescencia azul del mar Mediterráneo», y especuló con que «el fenómeno debía su origen a la dispersión de la luz por las moléculas de agua». Por lo general, cuando la luz rebota de un átomo o molécula, lo hace «elásticamente», es decir, sin perder nada de energía, como una pelota de goma dura cuando rebota de una superficie rígida. Raman sugirió que en raras ocasiones la luz puede dispersarse «inelásticamente», como una pelota dura que golpea un bate de madera y transfiere algo de su energía al bate y al bateador. (Piense el lector en Bugs Bunny, que golpea tan fuerte una pelota de béisbol rápida que provoca que tanto el bate como Bunny vibren.) En la dispersión elástica, los fotones pierden energía de forma parecida en los enlaces moleculares sobre los que inciden, lo que hace que vibren; por lo tanto, la luz dispersa emerge con menos energía. Reducir la energía de la luz hace disminuir su frecuencia y vira su color hacia el extremo azul del espectro, lo que le proporcionaba a Raman su «maravillosa opalescencia azul».

Los químicos utilizan este principio para sondear la estructura molecular. En esencia, se emite luz sobre una muestra química, y la diferencia en color o frecuencia (y, por lo tanto, de energía) entre la luz que entra y la que sale se registra como un «espectro Raman» para una sustancia química determinada, lo que proporciona una especie de rúbrica de sus enlaces químicos. La técnica lleva el nombre de su inventor, espectroscopia Raman, y le valió un premio Nobel. Cuando Dyson se enteró del trabajo de Raman vio que era capaz de proporcionar un mecanismo por el que la nariz podría investigar las vibraciones moleculares de las moléculas olorosas. Propuso que la nariz «puede ser un espectroscopio» capaz de detectar las frecuencias distintivas a las que vibran diferentes enlaces químicos. Incluso identificó frecuencias comunes en los espectros Raman de compuestos que se correlacionaban con su olor. Por ejemplo, todos los mercaptanos (compuestos que contienen un enlace terminal azufre-hidrógeno) comparten un pico Raman determinado con frecuencia de 2.567-2.580. Y todos hieden a huevos podridos.

La teoría de Dyson explicaba al menos la naturaleza analítica de los olores, pero nadie tenía ni la más mínima idea de cómo podía nuestra nariz utilizar algo como la espectroscopia Raman para proporcionar el sentido del olfato. Después de todo, no solo era necesario que algún espectroscopio biológico captara y analizara la luz dispersada, sino que, para empezar, también era necesario que hubiera una fuente de luz.

Pero apareció una deficiencia más seria todavía en la teoría de Dyson cuando se descubrió que la nariz puede diferenciar con facilidad moléculas que tienen la misma estructura química y espectros Raman idénticos, pero que son imágenes mutuamente especulares. Por ejemplo, la molécula de limoneno, que es en gran parte responsable del olor de la naranja y que ya la hemos presentado al lector, puede describirse como una molécula diestra. Pero hay una molécula casi idéntica llamada dipenteno que es la imagen especular «siniestra». (Véase figura 5.3, en la que el área puntiaguda y sombreada en la zona inferior de cada molécula representa el enlace carbono-carbono que se dirige hacia la parte inferior [a] o superior [b] de la página.) El dipenteno tiene los mismos enlaces moleculares que el limoneno, y por lo tanto emite un espectro Raman idéntico, pero su olor es muy diferente: huele como la trementina. Se dice que las moléculas que se presentan en formas diestras y siniestras son quirales, <sup>\*</sup> y a menudo tienen olores muy diferentes. Otro compuesto quiral es el carvone, una sustancia química que se encuentra en semillas tales como el eneldo y la alcaravea o comino de prado, y que es responsable del aroma de la alcaravea; la molécula que es su imagen especular huele como la menta verde o hierbabuena. Un espectroscopista Raman sería incapaz de distinguir estos compuestos mediante un espectrómetro, pero un simple olisqueo lo consigue fácilmente. Es evidente que el olfato no puede basarse (al menos, no solo) en la detección de vibraciones moleculares.

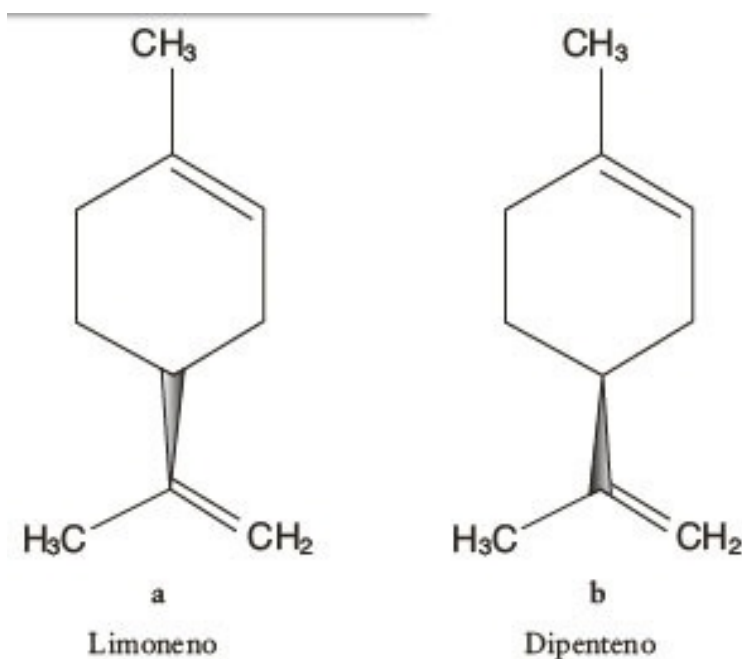


FIGURA 5.3. El limoneno (a) y el dipenteno (b) son moléculas cuyas estructuras son imágenes especulares la una de la otra, y que tienen olores muy diferentes. Las moléculas difieren solo en la orientación del grupo químico inferior, que se representa dirigido hacia la parte inferior de la página (enlace que apunta hacia abajo) en el limoneno, pero hacia la parte superior (enlace que apunta hacia arriba) en el dipenteno. Desde luego, podría hacerse que la molécula de dipenteno diera la vuelta, de manera que su grupo químico se dirigiera hacia la parte inferior de la página como el limoneno, pero entonces su doble enlace saltaría hacia la izquierda, y no hacia la derecha, de modo que seguiría siendo diferente. Las moléculas son como los guantes de la mano derecha y de la izquierda.

Estos defectos aparentemente fatales de la teoría vibratoria de la olfacción condujeron a que la teoría de llave y cerradura la eclipsara durante la mayor parte de la segunda mitad del siglo XX, a pesar de los grandes esfuerzos de unos pocos entusiastas de la vibración molecular, como el químico canadiense Robert H. Wright, quien proporcionó una solución potencial al problema de las moléculas diestras y siniestras que poseen los mismos enlaces pero tienen olores diferentes. Wright indicó que es probable que los mismos receptores sean quirales (que tengan formas diestras o siniestras), de modo que sostendrían una molécula de odorante de manera diestra o siniestra, con lo que presentaría sus enlaces de manera diferente al detector de las vibraciones. Para hacer una analogía musical, el zurdo Jimi Hendrix (que representa el receptor olfativo) sostenía generalmente su guitarra (la molécula quiral de odorante) con el mástil dirigido hacia la derecha; mientras que Eric Clapton, diestro, sostiene su guitarra (que representa la molécula de imagen especular) con el mástil dirigido hacia la izquierda. \* Ambos músicos podrían tocar el mismo *ostinato* (generar las mismas vibraciones) en guitarras que fueran imágenes especulares; pero el sonido captado por un micrófono fijo (que representa la parte del detector de vibraciones del receptor olfativo) situado, pongamos por caso, justo a la izquierda de cada músico, sería sutilmente diferente debido a que las cuerdas (los enlaces moleculares) se encuentran en lugares diferentes con relación al micrófono. Wright propuso que los receptores olfativos quirales detectan las frecuencias de vibración de los enlaces químicos, pero solo cuando los enlaces se encuentran en la posición correcta: afirmaba que los receptores tienen formas diestras o siniestras, justo como los guitarristas. Pero sin tener todavía idea de cómo el detector de vibraciones biológico podía funcionar en realidad, la teoría de la vibración siguió en la periferia de la ciencia del olfato.

Sin embargo, la teoría de la forma también tiene sus problemas. Tal como ya hemos comentado, presenta dificultades a la hora de explicar moléculas de odorante con formas muy distintas pero con el mismo olor, y viceversa. Para abordar estos problemas, Gordon Shepherd y Kensaku Mori propusieron en

1994 la teoría de la «forma débil» u odotopo. <sup>5</sup> La diferencia clave entre esta y la teoría clásica de la forma reside en la idea de Shepherd y Mori de que, en lugar de que los receptores olfativos reconozcan la forma de la molécula entera, estos solo necesitan identificar la forma de los grupos químicos componentes. Por ejemplo, como ya hemos indicado, todos los compuestos que huelen a almizcle de la figura 5.2 tienen un átomo de oxígeno ligado a uno de carbono por un doble enlace. La teoría del odotopo propone que es la forma de estas subestructuras químicas, y no la de toda la molécula, lo que reconocen los receptores olfativos. Esta teoría confiere más sentido a la naturaleza analítica del aroma, pero adolece de muchos de los mismos problemas de la teoría de la vibración cuando trata de moléculas que contienen los mismos grupos químicos, pero dispuestos de manera diferente. Así, ni la teoría del odotopo ni la de la vibración pueden explicar de qué manera pares de sustancias químicas pueden tener olores diferentes a pesar de poseer los mismos grupos químicos dispuestos de manera diferente en el mismo andamiaje molecular. Por ejemplo, tanto la vainillina (que integra el componente primario de la vainilla natural) como la isovainillina consisten en un anillo de seis átomos de carbono con tres grupos químicos idénticos fijados en posiciones diferentes (véase figura 5.4). Según la teoría del odotopo, los grupos químicos idénticos deberían oler igual. Pero la vainillina huele..., bueno, como vainilla, pero la isovainillina tiene un desagradable olor fenólico (medicinal y dulce).

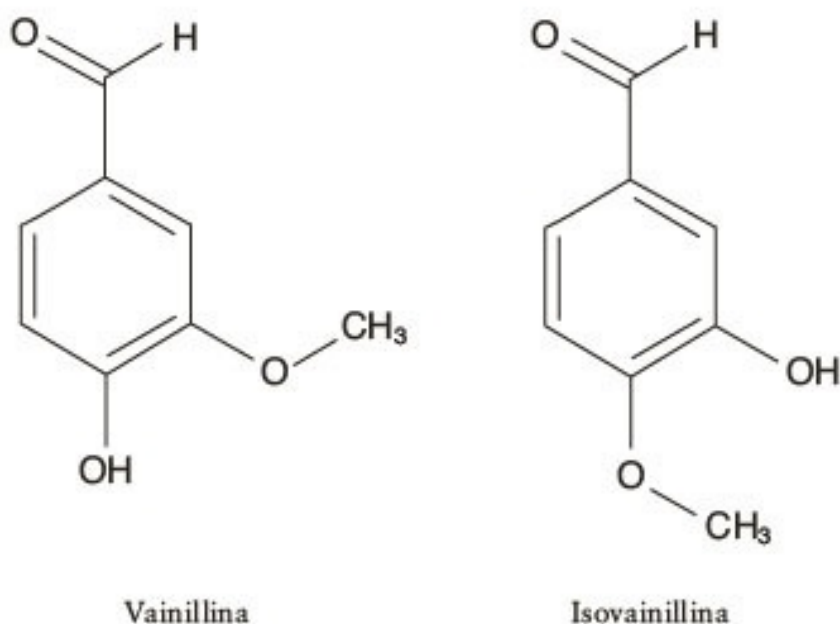


FIGURA 5.4. Moléculas que tienen las mismas partes químicas básicas, como la vainillina (o vainilla) y la

isovainillina (o isovanilina), que se muestran aquí, pueden tener, no obstante, olores muy diferentes.

Para resolver estos problemas, los defensores de la teoría de la forma suelen proponer una combinación de la teoría del odotopo y algún tipo de mecanismo de reconocimiento de la forma quiral general. No obstante, esto sigue sin poder explicar la situación igualmente común de moléculas que son imágenes especulares y que en realidad tienen el mismo olor. \* Ello sugiere que las reconoce el mismo receptor, que es el equivalente molecular de tener el tipo de mano que encajaría a la vez con un guante de la mano derecha y con uno de la mano izquierda. Esto no parece tener mucho sentido.

#### OLER CON UNA NARIZ CUÁNTICA

El reconocimiento de la forma es fácil de comprender de modo intuitivo: tratamos de manera habitual con la complementariedad de forma cada vez que nos calzamos un guante, introducimos una llave en una cerradura o usamos una llave para apretar una tuerca. Se sabe también que enzimas (que vimos en acción en el capítulo 3), anticuerpos, receptores hormonales y otras biomoléculas interactúan primariamente mediante la disposición geométrica de sus átomos y moléculas; por lo tanto, no es sorprendente que la teoría de la olfacción basada en la forma haya recibido un fuerte respaldo por parte de muchos biólogos, entre ellos los ganadores del premio Nobel por el receptor de la olfacción, Richard Axel y Linda Buck.

La comunicación basada en la vibración nos es mucho menos familiar, pese a que es fundamental al menos para dos de nuestros sentidos, la visión y el oído. Pero mientras que la física de cómo el ojo detecta la frecuencia de vibración de la luz y el oído registra la frecuencia de vibración del aire es muy bien conocida, nadie tenía la menor idea, hasta fechas recientes, de cómo la nariz podía detectar la frecuencia de una vibración molecular.

Luca Turin nació en el Líbano en 1953 y estudio fisiología en el University College de Londres. Una vez que se hubo graduado, se trasladó a Francia para trabajar en el Centre National pour la Recherche Scientifique, y fue en Niza donde experimentó una epifanía olfativa en una visita a las Galeries Lafayette. En medio de la sala de perfumes había un expositor montado por la compañía japonesa Shiseido para el nuevo perfume, Nombre Noir, que Turin describe así: «Estaba a medio camino entre una rosa y una violeta, pero sin traza alguna de la dulzura de ninguna de las dos, y en cambio el fondo era de unas notas austeras, casi santas, de cedro de caja de cigarros. Al mismo tiempo, no era seco, y

parecía relucir con una frescura líquida que hacía que sus colores profundos brillaran como una vidriera policromada». <sup>6</sup> El encuentro de Turin con el perfume japonés iba a inspirar una búsqueda, que duraría toda una vida, para descubrir el secreto de cómo las moléculas que flotan hacia el interior de nuestra nariz pueden crear experiencias tan evocadoras como aquellas.

Al igual que Dyson antes que él, Turin estaba convencido de que las correlaciones entre los espectros vibracionales y el aroma no podían ser una mera casualidad. La argumentación de Dyson lo había convencido de que los receptores olfativos tenían que detectar, de alguna manera, vibraciones moleculares. Pero, a diferencia de Dyson, Turin propuso un mecanismo molecular especulativo, pero plausible, por el que las biomoléculas podían detectar las vibraciones de los enlaces químicos mediante el efecto de túnel cuántico de los electrones. <sup>7</sup>

Como vimos en el capítulo 1, el efecto de túnel es la peculiar propiedad de mecánica cuántica que surge de la capacidad de partículas tales como electrones y protones de comportarse como ondas de probabilidad capaces de infiltrarse a través de barreras que son impenetrables utilizando cualquier ruta clásica. En el capítulo 3 descubrimos que el efecto de túnel desempeña un papel crucial en las reacciones de muchos enzimas. Mientras Turin le estaba dando vueltas al secreto del aroma, dio con un artículo que describía una nueva técnica de química analítica llamada espectroscopia de efecto de túnel inelástico de electrones (IETS, por sus siglas inglesas). En la IETS se colocan muy juntas dos placas de metal, separadas por un espacio minúsculo. Si se aplica un voltaje entre las placas, los electrones se acumularán en una placa, lo que la cargará negativamente (la donante) y experimentará una fuerza de atracción por parte de la otra placa, cargada positivamente (la aceptora). Considerados a la manera clásica, los electrones carecen de la energía para saltar a través del hueco aislante entre las placas; pero los electrones son objetos cuánticos y, si el hueco es lo bastante pequeño, pueden pasar de la placa donante a la aceptora mediante un efecto de túnel cuántico. A este proceso se le denomina efecto de túnel elástico porque los electrones no ganan ni pierden energía en el proceso.

Sin embargo, hay una condición adicional básica: un electrón puede efectuar un túnel elástico desde su lugar en la placa donante hasta el lugar de la aceptora solo si hay una rendija vacía a su disposición en la misma energía exacta. Si el hueco más cercano disponible en la aceptora se halla a una energía menor, entonces el electrón ha de perder parte de su energía para dar el salto. A este proceso se le denomina efecto de túnel inelástico. Pero la energía liberada tiene



que ir a algún sitio, de otro modo el electrón no puede producir el efecto de túnel. Si en el hueco entre las placas se coloca una sustancia química, entonces un electrón puede perforar a su través mientras sea capaz de ceder su exceso de energía a la sustancia, lo que puede hacer mientras las moléculas en el hueco tengan enlaces capaces de vibrar exactamente a la frecuencia correcta, que corresponde a la de la energía cedida. Después de haber cedido su energía sobrante de esta manera, estos electrones de efecto de túnel inelástico llegan a la placa aceptora con una energía ligeramente menor; así, analizando las diferencias de energía entre los electrones que abandonan el lugar donante y los que llegan al lugar aceptor, la espectroscopia de efecto de túnel inelástico de electrones explora la naturaleza de los enlaces moleculares de una sustancia química.

Volviendo a nuestra analogía musical, si el lector ha tocado alguna vez un instrumento de cuerda sabrá que es posible obtener una nota de una cuerda sin ni siquiera tocarla, por resonancia. De hecho, puede emplearse este truco para afinar una guitarra. Si se dobla un pedacito de papel muy fino sobre una de las cuerdas, y después se puntea la misma nota en una cuerda adyacente, puede hacerse que el pedacito de papel salte sin que se haya tocado en absoluto aquella cuerda. Esto se debe a que, una vez que se ha conseguido afinar la cuerda, la que ha sido punteada hace vibrar el aire, y el aire que vibra transmite la vibración a la cuerda no punteada, haciendo que esta vibre en resonancia con la cuerda pulsada. En la IETS, el electrón solo salta del lugar donante si la sustancia química entre las dos placas tiene un enlace afinado de manera parecida a la frecuencia exacta para que efectúe el salto. De hecho, el electrón implicado en el efecto de túnel pierde energía al puntear un enlace molecular en su desplazamiento cuántico entre las placas.

Turin propuso que los receptores olfativos funcionan de una manera parecida, pero en ellos una única molécula (el receptor olfativo) toma el lugar de las placas y el hueco en la IETS. Imaginó un electrón situado primero en un lugar donante en la molécula receptora. Como en la IETS, el electrón podría potencialmente horadar hasta un lugar aceptor en la misma molécula, pero, propuso, una discrepancia en la energía de los dos lugares le impide hacerlo. Sin embargo, si el receptor capta una molécula de odorante que posee un enlace afinado exactamente a la frecuencia de vibración correcta, entonces el electrón puede saltar del donante al aceptor mediante el efecto de túnel y, de manera simultánea, transferir la cantidad exacta de energía al odorante, con lo que pulsa efectivamente uno de sus enlaces moleculares. Turin sugirió que el electrón que

ha realizado el efecto de túnel, y que ahora se halla en el lugar aceptor, provoca la liberación del torpedo molecular que es la proteína G fijada, lo que causa que la neurona olfativa dispare y con ello envíe una señal hacia el cerebro, lo que nos permite «experimentar» el aroma de la naranja.

Turin consiguió reunir gran cantidad de pruebas circunstanciales para su teoría de vibración cuántica. Por ejemplo, como ya se ha mencionado, los compuestos de azufre-hidrógeno suelen tener un fuerte olor de huevos podridos, y todos poseen un enlace molecular de azufre-hidrógeno que vibra hacia los 76 terahercios (76 billones de oscilaciones por segundo). Su teoría hace una predicción robusta: cualquier otro compuesto asociado con un enlace cuya frecuencia de vibración sea de 76 terahercios tendrá asimismo un olor de huevos podridos, con independencia de su forma. Por desgracia, muy pocos compuestos tienen esta misma banda de vibración en sus espectros. Turin buscó entre la literatura de espectroscopia una molécula con la misma vibración. Al final descubrió que el terminal de los enlaces boro-hidrógeno en las sustancias químicas llamadas boranos tienen vibraciones centradas en 78 terahercios, que es una vibración muy próxima a la de 76 terahercios del enlace S-H. Pero ¿a qué olían los boranos? Dicha información no estaba disponible en la literatura de espectroscopia, y estos compuestos eran tan exóticos que no pudo conseguir ninguno para olisquearlo. Pero encontró un artículo antiguo que describía su olor como repulsivo, que es un término que se suele usar para describir un olor sulfuroso. De hecho, resulta que los boranos son las únicas moléculas «no» sulfurosas conocidas que emiten el mismo hedor a huevos podridos que el sulfuro de hidrógeno: por ejemplo, el decaborano, que está compuesto tan solo de átomos de boro e hidrógeno (de fórmula química  $B_{10}H_{14}$ ).

Este descubrimiento de que la única de entre los miles (literalmente) de sustancias químicas que han sido oliscadas que hiede como el sulfuro de hidrógeno es una molécula que comparte la misma frecuencia de vibración proporcionó un fuerte respaldo a la teoría vibratoria del olfato. Recuérdese que los perfumeros han intentado durante décadas desvelar la clave molecular del perfume. Turin había conseguido hacer lo que ninguno de sus químicos había logrado: predecir un olor tan solo a partir de la teoría. Era el equivalente químico de predecir el aroma de un perfume a partir de la forma de su frasco. La teoría de Turin proporcionaba asimismo un mecanismo cuántico biológicamente plausible que permitiría a una biomolécula detectar una vibración molecular. Pero un «mecanismo plausible» no es suficiente. ¿Era correcto?

## BATALLA DE NARICES

La teoría de la vibración había conseguido algunos éxitos prometedores, como en el caso del decaborano, pero aún adolecía de problemas parecidos a los de la teoría de la forma, como el hecho de que moléculas que eran imágenes mutuamente especulares (por ejemplo, el limoneno y el diterpeno) tuvieran aromas muy diferentes, pero espectros vibratorios idénticos. Turin decidió poner a prueba otra predicción de su teoría. El lector recordará que la teoría del efecto de túnel de la acción enzimática (véase capítulo 3) se comprobó sustituyendo la forma más común del hidrógeno con uno de sus isótopos más pesados, como el deuterio, con el fin de hacer uso del efecto isotópico cinético. Turin intentó un truco similar con un odorante llamado «acetofenona», del que se había descrito que tenía un «olor acre y dulce [...] parecido al del espinillo blanco o al de las flores de azahar del naranjo amargo». Compró un carísimo lote de la sustancia química en la que cada uno de los ocho átomos de hidrógeno en sus enlaces carbono-hidrógeno había sido sustituido por deuterio. Los átomos más pesados, como las cuerdas de guitarra más pesadas, vibrarán a frecuencias más bajas: un enlace carbono-hidrógeno normal vibra con una nota de frecuencia elevada, entre 85 y 93 terahercios, pero si el hidrógeno se sustituye por deuterio, entonces la frecuencia de vibración del enlace carbono-deuterio cae hasta unos 66 terahercios. Por lo tanto, la sustancia química «deuterada» posee un espectro vibratorio muy diferente al de la que tiene hidrógeno. Pero ¿acaso huele diferente? Turin cerró la puerta de su laboratorio antes de oliscar con cuidado ambos compuestos. Estaba convencido de que «olían de manera diferente, el deuterado menos dulce y más parecido a un solvente». <sup>8</sup> Incluso después de haber purificado detenidamente cada compuesto, estaba convencido de que la forma con hidrógeno y la deuterada olían de manera muy distinta. Su teoría, afirmó, estaba vindicada.

La investigación de Turin atrajo la atención de los inversores, que proporcionaron el respaldo financiero necesario para establecer una nueva compañía, Flexital, dedicada a la explotación de sus ideas de vibración cuántica para fabricar nuevas fragancias. El autor Chandler Burr incluso escribió un libro que describía la búsqueda de Turin de los mecanismos moleculares del olfato; <sup>9</sup> y la BBC filmó un documental acerca de su obsesión.

Pero eran muchos los que no estaban en absoluto convencidos, en particular los entusiastas de la teoría de la forma. Leslie Vosshall y Andreas Keller, de la Universidad Rockefeller, repitieron las pruebas con acetofenona normal y

deuterada, pero, en lugar de basarse en la afinadísima nariz de Turin, preguntaron a veinticuatro sujetos inexpertos si podían distinguir entre los compuestos. Los resultados fueron inequívocos: no había diferencia en el olor. Su artículo, publicado en *Nature Neuroscience* en 2004, [10](#) venía acompañado de un editorial en el que se afirmaba que la teoría vibratoria del olfato no tenía «crédito en los círculos científicos».

Pero, tal como podría confirmarnos cualquier investigador médico, las pruebas en humanos pueden verse frustradas por todo tipo de complicaciones, como las expectativas de los sujetos y sus experiencias previas al experimento. Para evitar estos problemas, un equipo dirigido por Efthimios Skoulakis, del Instituto Alexander Fleming, en Grecia, y que incluía investigadores del MIT, entre ellos Luca Turin, decidió centrarse en una especie cuyo comportamiento es mucho más educado: moscas del vinagre criadas en el laboratorio. El equipo diseñó el equivalente para la mosca del vinagre de un experimento de elección olfativa como el que Gabriele Gerlach había hecho con peces de arrecifes coralinos, que se ha descrito al inicio de este capítulo. Lo llamaron experimento de «laberinto en T para moscas». Se introducían las moscas en un laberinto en forma de T por la base y se las animaba a volar hasta la intersección, donde debían elegir entre seguir hacia la derecha o hacia la izquierda. En cada brazo de la T se bombeaba aire aromatizado, de modo que contando el número de moscas que iban en cada dirección los investigadores podían deducir si las moscas podían distinguir entre los odorantes cargados, respectivamente, en el flujo de aire de la izquierda y en el de la derecha.

El grupo investigó primero si las moscas podían oler la acetofenona. Y, en efecto, podían: solo una pizca de la sustancia química al final del brazo de la derecha del laberinto era suficiente para persuadir a casi todas las moscas para que volaran hacia su olor afrutado. A continuación, el grupo sustituyó los átomos de hidrógeno de la acetofenona con átomos de deuterio; pero, en un nuevo giro, sustituyeron tres, cinco o los ocho átomos de hidrógeno con deuterio y pusieron a prueba por separado cada versión de la sustancia química, colocando siempre el compuesto no deuterado en el otro brazo del laberinto. Sus resultados fueron notables. Con solo tres átomos de deuterio, las moscas perdieron su preferencia para girar hacia la derecha en la intersección, y fueron, de manera aleatoria, hacia la izquierda o hacia la derecha. Pero cuando los investigadores cargaron el brazo derecho con la sustancia química con cinco u ocho átomos sustituidos, las moscas se dirigieron de forma resuelta hacia la izquierda, lejos del odorante deuterado. Parecía que podían oler la diferencia entre la forma de acetofenona

normal y la fuertemente deuterada, y ahora no les gustaba lo que olían. El equipo puso a prueba dos odorantes adicionales y encontró que a las moscas les resultaba fácil distinguir entre las formas de octanol con hidrógeno y con deuterio, pero que no lo hacían con las formas correspondientes de benzaldehído. Para demostrar que las moscas empleaban su sentido del olfato para olisquear los enlaces con deuterio, los investigadores experimentaron también con una cepa mutante de la mosca que carece de receptores olfativos funcionales. Como cabía esperar, estos mutantes anósmicos <sup>\*</sup> eran completamente incapaces de distinguir entre los odorantes con hidrógeno y deuterados.

Utilizando un dispositivo condicionador pavloviano, los investigadores consiguieron incluso adiestrar a las moscas para que asociaran determinadas formas de sustancias químicas con castigo: una suave descarga eléctrica a sus patas. El equipo pudo entonces realizar un test todavía más notable de la teoría vibratoria. Primero adiestraron a moscas para que evitaran compuestos con el enlace de carbono-deuterio, con su vibración característica a 66 terahercios. Después quisieron descubrir si esta evitación se podía generalizar a compuestos muy distintos que resultaran poseer una vibración de enlace a la misma frecuencia. Y así fue. El equipo descubrió que las moscas adiestradas para evitar compuestos con el enlace carbono-deuterio también evitaban compuestos denominados nitrilos, cuyo enlace carbono-nitrógeno vibra a la misma frecuencia, pese a que son muy diferentes desde el punto de vista químico. El estudio proporcionó un fuerte respaldo para un componente vibratorio de la olfacción, por lo menos en las moscas, y se publicó en la prestigiosa revista científica *Proceedings of the National Academy of Science* en 2011. [11](#)

Al año siguiente, Skoulakis y Turin formaron equipo con investigadores del University College de Londres para volver a la delicada cuestión de si los humanos también pueden oler mediante vibraciones. En lugar de fiarse solo del sentido del olfato de Turin, muy sensible, el equipo reclutó a once sujetos oliscadores. Primero confirmaron el resultado de Vosshall y Keller: sus sujetos experimentales no podían oler los enlaces carbono-deuterio en la acetofenona. Pero el equipo supuso que con solo ocho enlaces carbono-deuterio, la señal procedente de la forma deuterada de la sustancia química podría ser relativamente débil y, por ello, indistinguible por parte de la nariz promedio; de modo que decidieron investigar moléculas más complejas, de olor almizclado (como las de la figura 5.2), que tienen hasta veintiocho átomos de hidrógeno, todos los cuales pueden ser sustituidos por deuterio. Esta vez, en contraste con la

prueba con acetofenona, todos los once sujetos experimentales pudieron distinguir con facilidad entre el almizcle normal y el totalmente deuterado. Quizá, después de todo, los humanos pueden realmente oliscar moléculas afinadas a diferentes frecuencias.

#### LOS FÍSICOS OLISQUEAN \*

Una de las críticas que se hacían a la teoría de la vibración cuántica defendía que su fundamento teórico era bastante vago. Este aspecto lo ha abordado en fechas recientes un equipo de físicos del University College de Londres que, en 2007, metió sus narices (si el lector nos perdona el retruécano) en el asunto y efectuó los cálculos cuánticos que hay detrás de la teoría del efecto de túnel, y llegó a la conclusión de que era «consistente tanto con la física subyacente como con las características observadas del olfato, siempre que el receptor posea determinadas propiedades generales». <sup>12</sup> Una de las componentes del grupo, Jenny Brookes, llegó incluso a proponer una solución al exasperante problema de las moléculas que son imagen especular de otras, como el limoneno y el dipenteno (véase figura 5.3), que tienen las mismas vibraciones pero olores muy diferentes.

En realidad, fue el supervisor y tutor de Jenny, el malogrado profesor Marshall Stoneham, el que primero dio con lo que a veces se denomina el modelo de pasar la tarjeta. Stoneham era uno de los principales físicos del Reino Unido de su generación, con intereses que iban desde la seguridad nuclear hasta la computación cuántica, la biología y, muy apropiado para este capítulo, la música: tocaba la trompa. Su teoría constituye una elaboración de mecánica cuántica de la idea de Robert Wright de que tanto la forma del receptor olfativo como las vibraciones de los enlaces de la molécula odorante desempeñan un papel en el olfato. Ellos propusieron que la bolsa de fijación del receptor olfativo funciona como una máquina lectora de tarjetas de banda magnética. Dichas tarjetas poseen una banda magnética que se lee para generar una corriente eléctrica en la máquina lectora de tarjetas. Pero no todo encaja en una lectora de tarjetas: la tarjeta ha de tener la forma y el grosor adecuados, y su banda magnética ha de estar en la posición correcta, antes de que podamos usarla siquiera y comprobar si la máquina la reconoce. Brookes y sus colegas sugirieron que los receptores olfativos funcionan de una manera parecida. Una molécula de odorante, postulaba el equipo, ha de encajar primero en una bolsa de fijación quiral diestra o siniestra, de manera similar a como una tarjeta de crédito encaja en un aparato lector. De modo que odorantes con los mismos

enlaces pero con formas distintas, como una versión diestra y siniestra de la misma molécula, serán captados por diferentes receptores. Solo después de que cada odorante haya encajado en su receptor complementario tiene el potencial para estimular el evento de efecto de túnel por parte del electrón inducido por la vibración, para hacer que la neurona receptora dispare; pero debido a que la molécula siniestra hará que dispare un receptor siniestro, olerá de manera distinta que una molécula diestra que haga disparar un receptor diestro.

Si volvemos una vez más a nuestra analogía musical, con la guitarra haciendo la función de la molécula de odorante y las cuerdas de guitarra como los enlaces moleculares que hay que pulsar, entonces los receptores se presentan en forma de Eric Clapton o de Jimi Hendrix. Ambos pueden tocar las mismas notas moleculares, pero las moléculas diestras o siniestras han de ser captadas por receptores diestros o siniestros, de la misma manera que las guitarras diestras han de ser tocadas por guitarristas diestros. De modo que aunque el limoneno y el dipenteno tienen las mismas vibraciones, han de ser captados por receptores olfativos siniestros o diestros. Los diferentes receptores estarán conectados a diferentes regiones del cerebro y, por ello, generarán olores distintos. Esta combinación de reconocimiento de la forma y de la vibración cuántica proporciona finalmente un modelo que encaja con casi todos los datos experimentales.

Desde luego, el hecho de que este modelo encaje con los datos no prueba por sí mismo que exista una base cuántica para la olfacción. Los datos experimentales proporcionan pruebas robustas para cualquier teoría de la olfacción que implique a la vez la forma y la vibración. Todavía no hay ningún experimento que haya comprobado directamente si el efecto de túnel cuántico está implicado en el olfato. Sin embargo, por lo menos hasta ahora, el efecto de túnel cuántico inelástico por parte de los electrones es el único mecanismo conocido que proporciona una explicación plausible de cómo las proteínas pueden detectar vibraciones en las moléculas del olor.

La pieza vital del rompecabezas de la olfacción que todavía falta es la estructura de los receptores olfativos. Conocerla facilitaría encontrar la respuesta a cuestiones clave como lo ajustadas que son las bolsas de fijación a cada molécula odorante, si las moléculas que son imágenes especulares se unen a los mismos receptores, y si las moléculas receptoras poseen lugares donantes y aceptores de electrones posicionados adecuadamente para promover el efecto de túnel inelástico de electrones. Pero a pesar de muchos años de esfuerzos por parte de algunos de los principales grupos de biología estructural de todo el

mundo, nadie ha conseguido todavía aislar moléculas receptoras susceptibles de ser estudiadas de la misma manera que permitió dilucidar mecanismos mecánicos cuánticos en los enzimas (véase capítulo 3) o en las proteínas que son pigmentos fotosintéticos (véase capítulo 5). El problema es que, en su estado natural, el receptor olfativo está embutido en la membrana celular, algo así como una medusa que flotara en la superficie del mar. Extraer la proteína receptora de la membrana es como sacar una medusa del océano: no hay modo de que conserve su forma. Y nadie ha encontrado todavía una manera de determinar la estructura de las proteínas mientras permanecen embutidas en las membranas celulares.

Así, aunque todavía existe una controversia considerable, la única teoría que proporciona una explicación de cómo moscas y humanos pueden distinguir los olores de compuestos normales y deuterados se basa en el mecanismo de mecánica cuántica del efecto de túnel inelástico de electrones. Algunos experimentos recientes han demostrado que, al igual que moscas y humanos, otros insectos e incluso peces son capaces de olisquear las diferencias entre los enlaces de hidrógeno y de deuterio. Si el olfato cuántico se encuentra en tal gama de animales, es probable que esté muy extendido. Es factible que los humanos, las moscas del vinagre, los peces payaso y una caterva de otros animales aprovechen la capacidad de un electrón de desaparecer de un punto del espacio y de materializarse al instante en otro, de modo que puedan captar este «mensaje procedente de una realidad material» y encontrar alimento, o una pareja... o el camino de vuelta a casa.



## LA MARIPOSA, LA MOSCA DEL VINAGRE Y EL PETIRROJO CUÁNTICO

Nacido en Toronto, en Canadá, en 1912, Fred Urquhart asistía a una escuela que limitaba con un marjal de espadañas. Ahí pasó incontables horas observando a los insectos, en particular a las mariposas, que poblaban los juncles. Su época favorita del año era a principios de verano, cuando el marjal veía la llegada de miles de monarcas (*Danaus plexippus*), estas emblemáticas mariposas estadounidenses con su patrón alar familiar de color anaranjado y negro. Las mariposas monarca permanecían allí todo el verano, alimentándose de los algodoncillos nativos, antes de marcharse volando de nuevo en otoño. Y la pregunta que intrigaba en particular a Fred era: ¿adónde van las mariposas?

Como se cuenta que dijo san Pablo, por lo general los adultos se distancian de sus asuntos infantiles. No así Fred, quien continuó preguntándose, a medida que crecía, dónde pasaban las monarcas el invierno. Después de estudiar zoología en la Universidad de Toronto y de acabar convirtiéndose en profesor de la materia, volvió a la pregunta de su infancia. Para entonces se había casado con Norah Patterson, una colega zoológica y amante de las mariposas.

Utilizando las técnicas clásicas de marcaje de animales, Fred y Norah intentaron entonces descubrir el secreto de la desaparición de las monarcas. No fue fácil. Mientras que las etiquetas atadas a las patas de petirrojos o clavadas en las aletas de ballenas funcionan bien, fijar un marbete a las delicadas alas membranosas de una mariposa presenta un reto completamente distinto. El equipo de marido y mujer experimentaron con marbetes adhesivos y pegaron etiquetas a las alas de los insectos; pero o bien las etiquetas caían, o las mariposas marcadas tenían dificultades para volar. Hasta 1940 no dieron con la solución: un pequeño marbete adhesivo similar a aquellos que son tan difíciles de arrancar de la cristalería acabada de adquirir. Armados con este dispositivo, empezaron a marcar y liberar cientos de mariposas monarca, cada una de ellas con un número identificativo y las instrucciones de que, si alguien la encontraba, esa persona debía «Enviar a Zoología, Universidad de Toronto».

Pero había millones de monarcas en América y solo dos Urquhart amantes de las mariposas. De modo que la pareja se dedicó a reclutar voluntarios, y en la

década de 1950 había reunido una red de miles de entusiastas de las mariposas que, a su vez, habían marcado, liberado, capturado y registrado cientos de miles de ellas. A medida que Fred y Norah actualizaban constantemente un mapa que seguía la pista de las localidades de captura y liberación, aparecía un patrón de manera gradual. Las mariposas que alzaban el vuelo desde la región de Toronto tendían a ser capturadas a lo largo de una ruta de vuelo diagonal que se dirigía hacia el sur y que cruzaba Estados Unidos del noreste al suroeste, atravesando Texas. Pero a pesar de numerosas salidas de campo, los Urquhart no pudieron identificar en los estados meridionales de Estados Unidos el destino final de estas mariposas invernantes.

Al final, los Urquhart dirigieron su mirada más hacia el sur, y en 1972 una frustrada Norah escribió acerca de su proyecto en periódicos mexicanos, solicitando voluntarios que informaran de cualquier avistamiento y que ayudaran en el marcaje. En febrero de 1973 les llegó una carta de un tal Kenneth C. Brugger, de Ciudad de México, que se ofrecía a ayudar. Con su perro, *Kola*, Ken se dispuso a emprender la búsqueda, conduciendo su autocaravana por la campiña mexicana en los atardeceres en busca de mariposas. Cerca de un año después, en abril de 1974, Ken informó de que había visto un gran número de mariposas monarca en la cordillera de Sierra Madre, en el centro de México. Después, más avanzado ese mismo año, informó de que había observado los cuerpos de muchas mariposas hechas jirones y muertas a lo largo de las carreteras de las sierras. Norah y Fred le respondieron que creían que las bandadas de aves tenían que haber estado alimentándose de los grandes enjambres de monarcas en vuelo.

La tarde del 9 de enero de 1975, Ken telefoneó emocionado a los Urquhart con la noticia de que «¡he encontrado la colonia! Millones de monarcas, en árboles de hoja perenne junto a un calvero en la montaña». Ken les dijo que había recibido un soplo de unos leñadores mexicanos que afirmaban haber visto enjambres de mariposas rojas mientras recorrían las montañas con sus burros cargados de madera. Con la ayuda de la Sociedad Geográfica Nacional, Norah y Fred organizaron entonces una expedición para encontrar y registrar el escurridizo hogar invernal de las monarcas, y llegaron a México en enero de 1976. Al día siguiente se dirigieron en automóvil hasta la aldea desde la que se disponían a emprender una excursión a la «montaña de las mariposas», un ascenso de tres mil metros. Una ascensión tan ardua no era una empresa trivial para una pareja que se encontraba entonces en sus años de madurez (Fred tenía sesenta y cuatro años), y estaban muy preocupados por si podrían llegar hasta la

cumbre. No obstante, con el corazón palpitante y con recuerdos de mariposas de brillantes colores revoloteando a la luz del sol de Toronto, llegaron a la cumbre, una meseta escasamente arbolada, con enebros y acebos. No había mariposas. Decepcionados y agotados, descendieron hasta un calvero repleto de oyameles (*Abies religiosa*), un tipo de abeto nativo de las montañas del centro de México..., y allí fue donde Fred y Norah encontraron por fin lo que habían buscado durante la mitad de sus vidas: «Masas de mariposas, por todas partes. En la tranquilidad de su estado semilátente, engalanaban las ramas de los árboles, envolvían los troncos de los oyameles, alfombraban el suelo con sus legiones tremendas». Mientras contemplaban boquiabiertos el espectáculo increíble, una rama de árbol se rompió y allí, entre los restos de mariposas desalojadas, Fred vio la familiar etiqueta blanca con su instrucción: «Enviar a Zoología, Universidad de Toronto». Un voluntario llamado Jim Gilbert había marcado esa mariposa en concreto en Chaska, en Minnesota, ¡a más de tres mil kilómetros de distancia! [1](#)

En la actualidad se reconoce que el viaje de las mariposas monarca es una de las grandes migraciones animales del mundo. Todos los años, entre septiembre y noviembre, millones de monarcas del sureste de Canadá se dirigen hacia el suroeste en un viaje de varios miles de kilómetros que las llevará a través de desiertos, praderas, campiñas y montañas, y en su camino pasarán a través del ojo de aguja geográfico que es la brecha de ochenta kilómetros de extensión que forman los frescos valles fluviales entre Eagle Pass y Del Río, en Texas, para posarse al fin en las cumbres de apenas una docena de altas montañas en el centro de México. Y después, una vez transcurrido el invierno en las frescas cumbres montañosas mexicanas, las monarcas emprenden en primavera el viaje en sentido contrario para volver a sus zonas de alimentación estivales. Lo más notable de todo es que no hay ni una sola mariposa que efectúe todo el viaje. Por el contrario, se reproducen en ruta, de manera que las mariposas que regresan a Toronto son las nietas de las monarcas que habían abandonado Canadá en su momento.

¿Cómo navegan estos insectos con la precisión necesaria para alcanzar un objetivo minúsculo situado a miles de kilómetros de un origen que solo sus antepasados habían visitado previamente? Este es otro de los enormes misterios de la naturaleza que solo ahora empieza a desvelarse. Como todos los animales migratorios, las mariposas emplean una variedad de sentidos que implican la vista y el olfato, y que incluyen una brújula solar que pueden corregir por la posición móvil del sol durante el día mediante su reloj circadiano, el proceso

bioquímico que existe en todas las plantas y animales, que oscila dentro de un período de veinticuatro horas y que sigue el ciclo día-noche.

Los relojes circadianos nos son familiares ya que explican, por ejemplo, por qué nos sentimos cansados por la noche y desvelados por la mañana, y por qué padecemos el desfase horario cuando los viajes aéreos de larga distancia perturban sus ritmos. Más o menos de dos décadas para acá, se han sucedido diversos descubrimientos fascinantes de cómo funcionan. Uno de los más sorprendentes es el hallazgo de que unos sujetos a quienes se mantiene aislados en condiciones de luz constantes todavía consiguen mantener un ciclo de unas veinticuatro horas de actividad y descanso, a pesar de no disponer de pistas externas. Parece que nuestro reloj corporal, nuestro reloj circadiano, está programado. Este reloj innato, el «marcapasos» corporal o sentido circadiano, se halla localizado en el hipotálamo, una glándula que está alojada en el cerebro. Pero aunque los sujetos a quienes se mantiene en condiciones de luz constantes todavía conservan un ciclo de más o menos veinticuatro horas, sus relojes circadianos se alejan de manera gradual de las horas reales del día, de manera que sus períodos de vigilia y sueño no están sincronizados con los de la gente que no participa en el estudio. Pero una vez expuesto a la luz natural, el reloj corporal del sujeto no tarda en recalibrarse al ciclo real de luz y oscuridad en un proceso conocido como arrastre o sincronización.

La brújula solar de la mariposa monarca funciona al comparar la altura del sol con la hora del día, una relación que varía con la latitud y la longitud. Debe de tener asimismo un reloj corporal que, como el nuestro, es arrastrado automáticamente de manera parecida por la luz, para compensar las horas cambiantes de la salida y la puesta del sol durante su larga migración. Pero ¿dónde aloja la monarca su sentido circadiano?

Tal como los Urquhart descubrieron, las mariposas no son los animales con los que resulta más simple trabajar. La mosca del vinagre, *Drosophila*, que conocimos en el capítulo anterior oliscando su camino a través de un laberinto, es un insecto de laboratorio mucho más conveniente, pues se reproduce de manera muy rápida y puede mutar fácilmente. Como nosotros, las moscas del vinagre ajustan sus ritmos circadianos a los ciclos de luz y oscuridad. En 1998, unos genetistas encontraron un mutante de mosca del vinagre cuyo ritmo circadiano no se afectaba por la exposición a la luz. <sup>2</sup> Descubrieron que la mutación estaba en un gen que codificaba una proteína ocular llamada criptocromo. De manera parecida a los andamios proteínicos de los complejos fotosintéticos que mantienen juntas las moléculas de clorofila (como vimos en el

capítulo 4), la proteína del criptocromo se enrolla alrededor de una molécula de pigmento denominado FAD (flavín adenín dinucleótido) que absorbe la luz azul. Al igual que en la fotosíntesis, la absorción hace saltar un electrón del pigmento, lo que conduce a la generación de una señal que viaja hasta el cerebro de la mosca para mantener su reloj corporal en sintonía con el ciclo diario de luz-oscuridad. Las moscas mutantes descubiertas en 1998 habían perdido esta proteína, de modo que sus relojes corporales ya no se ajustaban al cambio cíclico entre la luz y la oscuridad: habían perdido su sentido circadiano.

Más tarde se encontraron pigmentos de criptocromo similares en los ojos de otros muchos animales, entre ellos los humanos, e incluso en plantas y microbios fotosintéticos, en los que ayudan a predecir el momento del día más adecuado para la fotosíntesis. Pueden representar un sentido muy antiguo de detección de la luz que evolucionó en microbios hace miles de millones de años para sincronizar las actividades celulares con los ritmos diurnos.

El criptocromo se encuentra asimismo en las antenas de las mariposas monarca. Al principio, esto era un misterio: ¿qué estaba haciendo un pigmento ocular en las antenas? Pero las antenas de los insectos son órganos realmente asombrosos que alojan múltiples sentidos, entre ellos los del olfato y el oído, la detección de la presión del aire e incluso de la gravedad. ¿Acaso podían también albergar el sentido circadiano del insecto? Para comprobar dicha hipótesis, los científicos pintaron de negro las antenas de algunas mariposas, con lo que impidieron que recibieran señales luminosas. Lo que descubrieron era que las mariposas con antenas ennegrecidas ya no podían sincronizar su brújula solar con el ciclo de noche y día: habían perdido su sentido circadiano. De modo que parecía que las antenas de la mariposa alojaban su reloj biológico. Resultaba notable que el reloj de las antenas de la mariposa podía ser arrastrado por la luz incluso cuando se separaba del resto del cuerpo del insecto.

¿Era el criptocromo responsable de la sincronización a la luz de la mariposa monarca? Por desgracia no es tan fácil hacer mutar los genes de mariposa como los de la mosca del vinagre, de modo que en 2008 Steven Reppert y sus colegas, de la Universidad de Massachusetts, hicieron lo más parecido que se les ocurrió. El equipo sustituyó el gen defectuoso del criptocromo en moscas del vinagre mutantes con el gen «sano» de mariposas monarca y demostraron que este restablecía la capacidad de las moscas de sincronizar sus ritmos circadianos con la luz. <sup>3</sup> Si el criptocromo de la mariposa conseguía que las moscas del vinagre fueran puntuales, entonces era muy probable que realizara la tarea de poner en hora el importantísimo reloj corporal de la monarca, de modo que pudiera volar

directamente de Toronto a México sin perderse.

Pero ¿qué tiene todo esto que ver con la mecánica cuántica? La respuesta está relacionada con otro aspecto de la migración animal, a saber, el sentido que llamamos «magnetocepción»: la capacidad de detectar el campo magnético de la Tierra. Tal como vimos en el capítulo 1, ya hace algún tiempo que se sabe que muchos animales, entre ellos las moscas del vinagre y algunas mariposas, poseen esta capacidad, y la magnetocepción, en especial la de los petirrojos, se ha convertido en el ejemplo modélico de la biología cuántica. En 2008 ya era evidente que el sentido magnético del petirrojo implicaba a la luz (cosa que comentaremos más adelante), pero la naturaleza del receptor de la luz era esquiva. Steven Reppert se preguntaba si el citocromo que proporcionaba a las moscas la sensibilidad a la luz que contribuía a sincronizar sus ritmos circadianos podría estar asimismo implicado en su sentido de magnetocepción. Para poner a prueba la teoría, realizó el tipo de experimento de elección de corriente que Gabriele Gerlach había usado para demostrar la navegación mediante el olfato en los peces de las anémonas (véase capítulo 5), en el que al animal que se pone a prueba se le obliga a utilizar pistas sensoriales para elegir entre dos rutas hasta su comida.

Los investigadores encontraron que se podía adiestrar a las moscas a asociar una recompensa azucarada con la presencia de un campo magnético. Cuando se les daba la opción de volar a lo largo del brazo magnetizado o del no magnetizado de un laberinto (sin comida; es decir, sin pistas olfativas), elegían la ruta magnetizada. Las moscas deben de notar el campo magnético. ¿Estaba pues implicado el criptocromo? Los investigadores encontraron que las moscas del vinagre mutantes y alteradas genéticamente para que carecieran de criptocromo tenían la misma probabilidad de volar a lo largo de cualquiera de los dos brazos del laberinto, con lo que se demostraba que el criptocromo era esencial para su sentido magnético.

En su artículo de 2010, el grupo de Reppert demostró también que las moscas conservaban su sentido magnético cuando su gen para el criptocromo era sustituido por el gen que codifica el criptocromo en las mariposas monarca, [4](#) lo que probaba que la mariposa monarca bien puede usar asimismo el criptocromo para detectar el campo magnético de la Tierra. En realidad, un artículo de 2014 del mismo grupo demostraba que, como el petirrojo europeo que conocimos en el capítulo 1, la mariposa monarca posee una brújula de inclinación dependiente de la luz, que emplea para encontrar su ruta desde los Grandes Lagos hasta una cumbre montañosa mexicana; y, como cabía esperar, esta parece estar alojada en

sus antenas. <sup>5</sup>

Pero ¿cómo hace un fotopigmento para detectar también un campo magnético invisible? Para responder a esta pregunta debemos volver a nuestro amigo el petirrojo.

#### LA BRÚJULA AVIAR

Tal como indicamos en el capítulo 1, nuestro planeta es un imán gigantesco, con un campo magnético de influencia que se extiende desde su núcleo central hasta miles de kilómetros en el espacio. Esta burbuja magnetizada, la «magnetosfera», protege a toda la vida en la Tierra, porque sin ella haría ya tiempo que el viento solar (la corriente de partículas energéticas emitida desde el Sol) habría deteriorado nuestra atmósfera. Y, a diferencia del magnetismo de una típica barra imantada, el campo de la Tierra cambia a lo largo del tiempo, porque tiene sus orígenes en el interior del núcleo de hierro fundido de la Tierra. El origen preciso de este magnetismo es complicado, pero se cree que se debe al fenómeno conocido como efecto de la geodinamo, por el que la circulación de metales líquidos en el núcleo terrestre genera corrientes eléctricas, que a su vez generan un campo magnético.

Así, la vida en la Tierra debe su existencia a este escudo magnético protector. Pero su utilidad para los seres vivos no termina aquí. Hace más de un siglo que los científicos saben que muchas especies han desarrollado por evolución maneras ingeniosas de utilizarlo. De la misma manera que los marinos humanos han usado el campo magnético de la Tierra durante miles de años para navegar por los océanos, muchos otros animales, entre los que se cuentan especies marinas y terrestres de mamíferos, aves (como nuestro petirrojo) e insectos, han desarrollado a lo largo de millones de años un sentido que detecta el campo magnético de la Tierra y lo usa para navegar.

Las primeras pruebas de esta capacidad las proporcionó un zoólogo ruso, Aleksandr von Middendorf (1815-1894), que registró las localidades y fechas de llegada de varias especies de aves migratorias. Basándose en estos datos, dibujó varias curvas sobre un mapa, a las que se refería como «isopiptesas» (líneas de llegada simultánea). A partir de ellas, que reflejaban las direcciones de llegada de las aves, dedujo que había «una convergencia general en dirección al norte», hacia el polo norte magnético. Cuando publicó sus hallazgos en la década de 1850, propuso que las aves migratorias se orientan mediante el campo magnético de la Tierra, y se refería a ellas como «marineros del aire» que pueden navegar

«a pesar del viento, el tiempo atmosférico, la noche o las nubes». [6](#)

La mayoría de los zoólogos del siglo XIX se mostraron escépticos. Resulta paradójico que incluso aquellos científicos que estaban preparados para aceptar las ideas pseudocientíficas más peregrinas, como la actividad paranormal (y, a finales del siglo XIX, muchos científicos prominentes lo hacían), eran incapaces de creer que los campos magnéticos pudieran influir sobre la vida. Joseph Jastrow, por ejemplo, un psicólogo e investigador psíquico estadounidense, publicó en julio de 1886 una carta en la revista *Science* titulada «La existencia de un sentido magnético». Describía algunos experimentos que había realizado para comprobar si los humanos podían verse afectados de alguna manera por un campo magnético, pero tuvo que informar de que no había encontrado ningún tipo de sensibilidad.

Pero si pasamos rápidamente de Jastrow al siglo XX encontramos la obra de Henry Yeagley, un físico estadounidense que hizo investigaciones para el Cuerpo de Señales del Ejército de Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. La navegación de las aves era interesante para los militares porque todavía se empleaban palomas mensajeras para transportar mensajes, y los ingenieros aeronáuticos esperaban aprender de sus capacidades de navegación. Pero la manera en que las aves conseguían encontrar el camino de vuelta a casa de manera tan infalible seguía siendo un misterio. Yeagley desarrolló la teoría de que las palomas mensajeras podían sentir tanto la rotación de la Tierra como su campo magnético. Esto, afirmaba, crearía una «retícula de navegación» en el cerebro del ave que le proporcionaría coordenadas de longitud y latitud. Incluso puso a prueba su teoría fijando pequeños imanes a las alas de diez palomas y tiras de cobre no magnéticas del mismo peso a otras diez. Ocho de las diez palomas con tiras de cobre fijadas a sus alas encontraron el camino de vuelta al palomar, pero solo una de las diez palomas con imanes fijados a las alas consiguió llegar a su nido. Yeagley llegó a la conclusión de que las aves utilizan un sentido de navegación magnética para navegar que las tiras magnéticas podían perturbar. [7](#)

Aunque los resultados experimentales de Yeagley fueron rechazados por inverosímiles en un primer momento, desde entonces varios investigadores han establecido, más allá de toda duda razonable, que una amplia gama de animales poseen una sensibilidad inherente al campo magnético de la Tierra, lo que les confiere un agudo sentido de la dirección. Las tortugas marinas, por ejemplo, pueden regresar a la misma playa de cría, a miles de kilómetros de distancia de sus zonas de alimentación oceánicas, sin que posean ningún punto de referencia



visual; y los investigadores han demostrado que su sentido de la navegación se ve alterado si se fijan a su cabeza imanes potentes. En 1997, un equipo de la Universidad de Auckland, en Nueva Zelanda, publicó unas investigaciones en *Nature* que sugerían que la trucha arcoíris emplea células magnetorreceptoras localizadas en su nariz. [8](#) Si resulta ser correcto, ¡este sería el primer ejemplo de una especie que es capaz de «oler» la dirección del campo magnético de la Tierra! Hay microbios que utilizan el campo magnético de la Tierra para poder navegar a través de agua turbia; e incluso algunos organismos que no migran, como las plantas, parecen conservar un sentido de magnetorrecepción.

La capacidad de los animales de detectar el campo magnético de la Tierra ya no se pone en duda. El misterio es cómo lo hacen, y ello sobre todo porque el campo magnético de la Tierra es extraordinariamente débil y por lo general no cabría esperar que influyera sobre ninguna reacción química en el cuerpo. Hay dos teorías principales, y es probable que ambas se hallen implicadas en diferentes especies animales. La primera es que este sentido funciona como una brújula magnética convencional, mientras que la segunda es que la magnetorrecepción la confiere una brújula química.

La primera idea, que una forma de mecanismo de brújula convencional reside en algún lugar del cuerpo del animal, la reforzó el descubrimiento de minúsculos cristales de magnetita, el mineral magnético de óxido de hierro que se encuentra en la naturaleza, en muchos de los animales y microbios que parecían poseer un sentido magnético. Por ejemplo, las bacterias que utilizan un sentido magnético para orientarse en sedimentos marinos fangosos suelen estar llenas de cristales de magnetita en forma de bala.

A finales de la década de 1970 se había detectado magnetita en el cuerpo de varias especies de animales que se sabía que navegaban con ayuda del campo magnético de la Tierra. De manera notable, parecía haberse encontrado en el interior de neuronas situadas en el pico superior de los navegadores aviares más famosos, las palomas mensajeras, [9](#) lo que sugería que sus neuronas respondían a señales magnéticas captadas por los cristales de magnetita y que después emitían una señal al cerebro del animal. Investigaciones más recientes demostraron que las palomas se desorientaban y perdían su capacidad de seguir el campo geomagnético cuando se fijaban pequeños imanes a su pico superior, donde en apariencia se hallaban situadas estas neuronas llenas de magnetita. [10](#) Parecía que al fin se había localizado el origen de un sentido magnetorreceptivo.

Sin embargo, la cosa empezó de nuevo desde cero en 2012 cuando en *Nature* se publicó otro artículo que describía un estudio tridimensional detallado del

pico de las palomas utilizando un escáner de MRI. El estudio concluía que, casi con toda seguridad, estas células que contenían magnetita en el pico de las palomas no tenían nada que ver con la magnetocepción, sino que en realidad eran células llamadas macrófagos, ricas en hierro, que están implicadas en la inmunidad frente a patógenos, y no, hasta donde se sabe, en la percepción sensorial. [11](#)

Llegados a este punto hemos de hacer correr el reloj hacia atrás y volver a aquel notable ornitólogo alemán, Wolfgang Wiltschko, a quien conocimos por primera vez en el capítulo 1. El interés de Wiltschko en la navegación de las aves empezó en 1958, cuando se incorporó a un grupo de investigación con sede en Fráncfort y que dirigía el ornitólogo Fritz Merkel. Por aquel entonces, Merkel era uno de los pocos científicos que estudiaban el sentido magnético de los animales. Uno de sus estudiantes, Hans Fromme, ya había demostrado que algunas aves podían orientarse en el interior de habitaciones cerradas y sin rasgos distintivos, lo que demostraba que su capacidad de navegación no se basaba en señales visuales. Fromme había propuesto dos mecanismos posibles: o bien las aves recibían algún tipo de señales de radio procedentes de las estrellas, o bien podían sentir el campo magnético de la Tierra. Wolfgang Wiltschko sospechaba que era este segundo mecanismo el que funcionaba.

En el otoño de 1963, Wiltschko empezó a realizar experimentos con petirrojos, que, como el lector recordará, suelen migrar entre Europa septentrional y África del Norte. Colocó petirrojos, capturados en plena migración, dentro de cámaras aisladas magnéticamente y después expuso las aves a un campo magnético débil, artificial y estático generado por un dispositivo llamado bobina de Helmholtz, que puede imitar el campo magnético de la Tierra pero cuya intensidad y orientación pueden cambiarse. Lo que encontró fue que estos pájaros capturados durante la migración en el otoño o la primavera se mostraban inquietos y se apiñaban en el lugar de la habitación que coincidía con su dirección de migración en relación al campo artificial. Al cabo de dos años de duros esfuerzos, en 1965 Wiltschko publicó sus hallazgos, que demostraban que las aves eran sensibles a la dirección del campo aplicado y así, suponía, podían detectar de manera similar el campo magnético de la Tierra.

Estos experimentos confirieron un grado de respetabilidad a la idea de la magnetocepción aviar y alentaron otras investigaciones. Pero, en aquella época, nadie tenía ni la menor idea de cómo funcionaba este sentido: cómo el campo magnético de la Tierra, extremadamente débil, podía influir de verdad sobre los cuerpos de los animales. Los científicos ni siquiera podían ponerse de acuerdo

sobre el lugar del cuerpo del animal en el que estaba situado el órgano sensorial de la magnetocepción. Incluso después de que se encontraran cristales de magnetita en varias especies animales, lo que implicaba un mecanismo de brújula magnética convencional, la capacidad de navegación del petirrojo seguía siendo un misterio porque no podía detectarse magnetita en el cuerpo del animal. El sentido del petirrojo mostraba asimismo algunas características enigmáticas que no encajaban con una brújula magnética, en especial porque los pájaros perdían su capacidad cuando se les tapaban los ojos, lo que indicaba que necesitaban «ver» el campo magnético de la Tierra. Pero ¿cómo ve un animal un campo magnético?

En 1972, los Wiltschko (por aquel entonces Wolfgang formaba equipo con su esposa Roswitha) descubrieron que la brújula del petirrojo era distinta de cualquiera de las que se habían estudiado con anterioridad. Una brújula normal tiene una aguja magnetizada, uno de cuyos extremos (su polo sur) es atraído hacia el polo norte magnético de la Tierra, mientras que el otro señala hacia el polo sur. Pero existe un tipo de brújula distinto que no discrimina entre los polos magnéticos. Este tipo, como el lector recordará del capítulo 1, se denomina brújula de inclinación, y señala hacia el polo que se halle más cerca, de modo que solo puede indicar si uno se dirige hacia dicho polo o si se aleja de él, sea cual sea dicho polo. Una manera de proporcionar este tipo de información es medir el ángulo de las líneas del campo magnético de la Tierra con respecto a la superficie del planeta (véase figura 6.1). Este ángulo de inclinación (y de ahí el nombre para este tipo de brújula) es casi vertical (dirigido hacia el suelo) cerca de los polos, pero es paralelo al suelo en el ecuador. Entre el ecuador y los polos, las líneas del campo magnético penetran en la Tierra en un ángulo de menos de  $90^\circ$ , y dicho ángulo señala hacia el polo más cercano. De modo que cualquier dispositivo que mida dicho ángulo puede funcionar como una brújula de inclinación y proporcionar información acerca de la dirección.

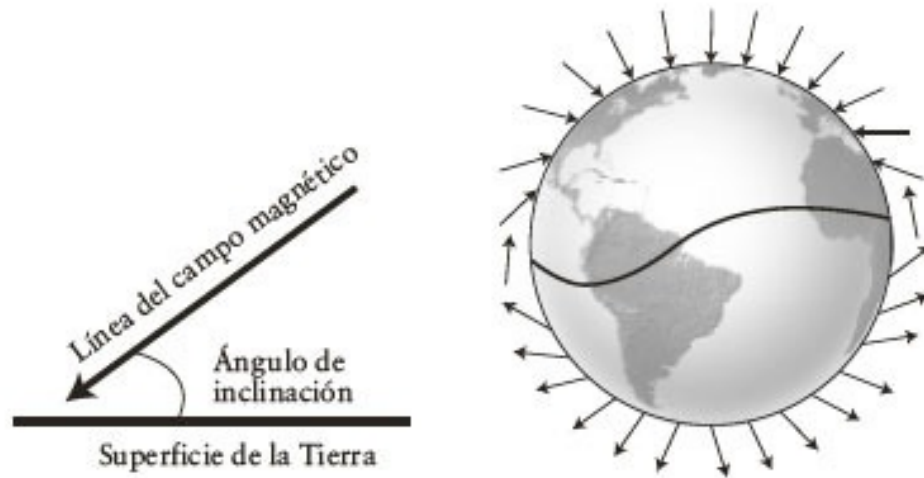


FIGURA 6.1. Las líneas del campo magnético de la Tierra y el ángulo de inclinación.

En sus experimentos de 1972, los Wiltschko colocaron a los pájaros que iban a poner a prueba en una cámara aislada y los sometieron a un campo magnético artificial. De manera crucial, invertir la polaridad del campo, haciendo girar  $180^\circ$  el imán, no tenía ningún efecto sobre su comportamiento: los pájaros se orientaban con relación al polo magnético más cercano, fuera cual fuere este; de modo que no poseían una brújula magnética convencional. Aquel artículo de 1972 estableció que el magnetoreceptor de los petirrojos era, en efecto, una brújula de inclinación. Pero seguía siendo un misterio cómo funcionaba.

Después, en 1974, el experto estadounidense en migración aviar, Steve Emlen, invitó a Wolfgang y Roswitha a la Universidad de Cornell, en Estados Unidos. En la década de 1960, Emlen había desarrollado con su padre John, otro ornitólogo muy respetado, una cámara especial para aves que se conocía como embudo de Emlen. En forma de un cono invertido, este embudo tiene una almohadilla entintada en el fondo y papel secante en los lados inclinados del interior (véase figura 6.2). Cuando un pájaro salta o revolotea sobre dichas paredes inclinadas deja huellas reveladoras que dan información acerca de la dirección preferida en la que volaría si pudiera escapar. La especie de pájaro que los Wiltschko estudiaron en la Universidad de Cornell era el azulejo o colorín azul (*Passerina cyanea*), un pequeño pájaro cantor estadounidense que, como el petirrojo europeo, migra utilizando algún tipo de brújula interna. En 1976 se publicó su estudio, [12](#) que duró un año, del comportamiento de este pájaro dentro del embudo de Emlen, y estableció sin ningún género de duda que el azulejo, al igual que el petirrojo, podía detectar el campo geomagnético. Wolfgang Wiltschko considera que la publicación de este primer artículo basado en Cornell

fue el momento culminante del equipo, porque estableció de manera indudable que las aves migratorias poseen una brújula magnética interna y captó la atención de muchos de los principales ornitólogos mundiales.

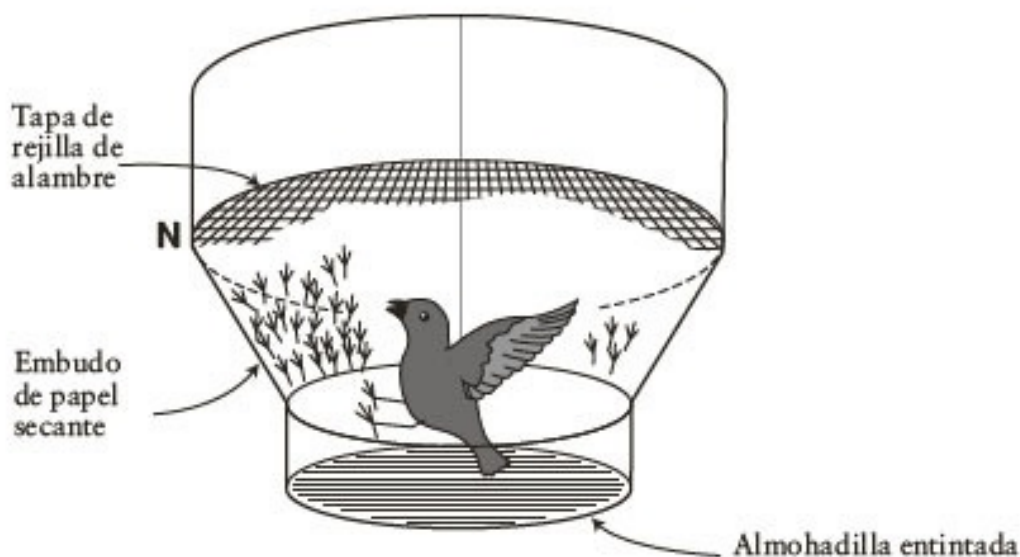


FIGURA 6.2. La cámara de embudo de Emlen.

Desde luego, nadie a mediados de la década de 1970 tenía pista alguna acerca de cómo podía funcionar una brújula magnética biológica. Sin embargo, como vimos en el capítulo 1, en el mismo año en que los Wiltschko y Stephen Emlen publicaron su trabajo, el químico alemán Klaus Schulten proponía un mecanismo químico que relaciona la luz con la magnetorecepción. Schulten acababa de graduarse en Harvard con una tesis en física química y había vuelto a Europa, donde obtuvo un puesto en el Instituto Max Planck de Química Biofísica, de Gotinga. Allí se interesó por la posibilidad de que los electrones generados en la reacción rápida del triplete por exposición a la luz pudieran estar enmarañados cuánticamente. Sus cálculos sugerían que si realmente el enmarañamiento se hallaba implicado en las reacciones químicas, entonces la velocidad de dichas reacciones se vería afectada por un campo magnético externo, y propuso una manera de demostrar su teoría.

Mientras defendía su idea sin reservas, Schulten se labró una reputación en el Instituto Max Planck, donde se lo consideraba algo chiflado. Su problema estribaba en que él no era químico, sino un físico teórico que trabajaba con papel, lápiz y ordenadores. Lo cierto es que no era un químico experimental capaz de ponerse una bata de laboratorio y realizar el tipo de experimento que

demostrara sus ideas. De modo que se encontraba en la posición de muchos teóricos que se topan con una idea clara, pero que entonces deben de dar con algún experimentalista amigo que acceda a dedicar tiempo de su atareada agenda de laboratorio para comprobar una teoría que, con demasiada frecuencia, resulta ser errónea. Schulten no consiguió convencer a ninguno de sus colegas químicos para que comprobaran su idea, porque ninguno de ellos creía que el experimento que proponía tuviera alguna posibilidad de éxito.

Schulten descubrió que el origen de todo este escepticismo era el gestor del laboratorio del instituto, Hubert Staerk. Al final, Schulten reunió el coraje para enfrentarse a Staerk en su despacho, donde se enteró de la razón de su obcecado escepticismo: Staerk ya había realizado el experimento y no había encontrado efecto alguno de campos magnéticos. Schulten estaba atónito. Parecía que su hipótesis iba a padecer la suerte que el biólogo evolutivo Thomas Huxley había descrito como simplemente otra «bella teoría asesinada por un hecho feo».

Después de darle las gracias a Staerk por haber realizado el experimento, el alicaído Schulten estaba a punto de abandonar su despacho, pero entonces se dio la vuelta y le pidió ver esos datos decepcionantes. Cuando Staerk le mostró el archivo, el estado de ánimo de Schulten se elevó de repente. Advirtió algo que Staerk había pasado por alto: una señal pequeña pero significativa en los datos, que él había predicho a la perfección. Schulten recuerda que fue «exactamente lo que yo había esperado, de modo que cuando lo vi me sentí muy feliz. Un desastre se convirtió en un momento feliz, porque yo sabía qué buscar. Él no». <sup>13</sup>

Schulten se puso inmediatamente a escribir lo que estaba seguro que sería un artículo científico sensacional... pero pronto habría de sufrir otro mazazo. Mientras compartía una copa en un congreso con una colega, Maria-Elisabeth Michel-Beyerle, de la Universidad Técnica de Múnich, descubrió que Michel-Beyerle había realizado justo el mismo experimento. Esto le planteó a Schulten un dilema ético. O bien podía revelar su descubrimiento, y con ello dar pie potencialmente a Michel-Beyerle para que se apresurara a volver a Múnich para escribir su propio artículo, lo que podría vaciar de contenido su texto; o bien podía excusarse y salir pitando de vuelta a Gotinga para redactar sus propios resultados. Pero si se marchaba sin decir palabra y después publicaba primero, Michel-Beyerle podría acusarlo más tarde de haberle robado su idea. Schulten recuerda lo que pensaba: «Si ahora no le digo lo que sé, ella podrá pensar que volví a casa para realizar el experimento». <sup>14</sup> Al final, Schulten confesó y le reconoció a Michel-Beyerle que él había hecho un trabajo parecido. Ambos científicos se quedaron durante el resto del congreso y después volvieron a sus

hogares respectivos para escribir sus propios artículos (el de Schulten apareció un poco antes que el de Michel-Beyerle), en los que describían el descubrimiento de que la extraña propiedad del enmarañamiento cuántico puede influir en realidad en las reacciones químicas.

El texto de Schulten, de 1976, [15](#) proponía que el enmarañamiento cuántico era responsable de la velocidad de las exóticas reacciones de triplete rápido estudiadas en el laboratorio del Instituto Max Planck. Pero su revolucionario artículo presentaba también los datos experimentales de Staerk, que demostraban claramente que la reacción química era sensible a los campos magnéticos. Con dos grandes resultados «en el saco», muchos científicos se habrían sentido satisfechos; pero Schulten, que no tenía treinta años, poseía la osadía de la juventud y estaba preparado para arriesgarse todavía más. Conocedor del trabajo de los Wiltschko con la migración del petirrojo y del problema de encontrar un mecanismo químico plausible para una brújula biológica, se dio cuenta de que sus electrones giratorios podían proporcionar dicho mecanismo; y en un artículo de 1978 sugirió que la brújula de las aves dependía de un mecanismo de un par radical enmarañado cuánticamente.

En aquel entonces, prácticamente nadie se tomó en serio su idea. Los colegas de Schulten en el Instituto Max Planck consideraban que no era más que otra de sus teorías alocadas, y los editores de *Science*, la revista científica más importante, a la que envió primero su artículo, quedaron asimismo muy poco impresionados, y escribieron: «Un científico menos atrevido habría destinado esta idea a la papelería». [16](#) Schulten describe su respuesta: «Me rasqué la cabeza y pensé: “Esto es una gran idea, o una idea totalmente estúpida”. ¡Decidí que era una gran idea y la publiqué a toda prisa en una revista alemana!». [17](#) Pero a esas alturas, la mayoría de los científicos que estaban al tanto de la teoría especulativa de Schulten, la archivaban junto a las explicaciones pseudocientíficas y paranormales de la magnetocepción.

Antes de analizar en qué medida los trabajos de Schulten y de los Wiltschko arrojan luz sobre la manera en que las aves encuentran su camino alrededor del globo, necesitamos volver al misterioso mundo cuántico y observar detenidamente el fenómeno del enmarañamiento o entrelazamiento, que describimos de forma breve en el primer capítulo del libro. El lector recordará que el enmarañamiento es tan extraño que incluso Einstein insistía en que no podía ser correcto. Sin embargo, antes debemos presentarle al lector otra propiedad peculiar del mundo cuántico: el «espín».



Muchos libros divulgativos de ciencia sobre mecánica cuántica \* emplean el concepto de espín cuántico para destacar el carácter extraño del mundo subatómico. Hemos decidido no hacerlo aquí, por la sencilla razón de que con seguridad es la idea más alejada de algo que podamos conceptualizar empleando el lenguaje cotidiano. Pero no podemos dejar de lado la tarea por más tiempo, de modo que allá vamos.

De la misma manera que la Tierra gira sobre su eje al tiempo que orbita alrededor del Sol, así los electrones y otras partículas subatómicas poseen una propiedad llamada espín \* que es diferente de su movimiento normal. Pero, como intuimos en el capítulo 1, este «espín cuántico» es distinto de cualquier cosa que podamos visualizar sobre la base de nuestra experiencia cotidiana de objetos que giran como pelotas de tenis o planetas. Para empezar, en realidad no tiene sentido hablar de la velocidad de un electrón que gira, pues su espín solo puede tomar uno de dos valores distintos: está cuantizado, de la misma manera que la energía está cuantizada al nivel cuántico. Los electrones solo pueden (en un sentido impreciso) girar en el sentido de las agujas del reloj o en el sentido contrario, lo que corresponde a lo que generalmente se denomina estados de espín «arriba» y de espín «abajo». Y puesto que este es el mundo cuántico, un electrón puede, cuando no se lo observa, girar en ambas direcciones al mismo tiempo. Decimos que su estado de espín es una superposición (es decir, combinación o mezcla) de espínarriba y espín-abajo. En cierto sentido, esto puede parecer incluso más extraño que decir que un electrón puede hallarse en dos lugares al mismo tiempo, porque ¿cómo puede un único electrón girar a la vez en el sentido de las agujas del reloj y en el sentido contrario?

Y solo para insistir en lo contraria a la lógica que es esta idea del espín cuántico, lo que consideramos una rotación de  $360^\circ$  no devolverá a un electrón a su estado original; para hacerlo, necesita efectuar dos rotaciones completas. Esto parece extraño porque todavía tendemos a pensar en el electrón como una esfera minúscula, quizás algo parecido a una pelota de tenis muy pequeña. Pero las pelotas de tenis son habitantes del mundo macroscópico, y los electrones viven en el mundo subatómico cuántico en el que las reglas son diferentes. De hecho, los electrones no solo no son esferas diminutas, sino que ni siquiera puede decirse que tengan tamaño. Así, mientras que el espín cuántico es tan real como la rotación de una pelota de tenis, no tiene equivalente en el mundo cotidiano familiar y no puede representarse.



Sin embargo, de ello no se debe inferir que solo es un concepto matemático abstracto cuya existencia se limita a los libros de texto y las abstrusas conferencias de física. Cada electrón de nuestro cuerpo, y de todo lo demás que hay en el universo, gira de esta manera peculiar. En realidad, si no lo hiciera, el mundo tal como lo conocemos, nosotros incluidos, simplemente no podría existir, porque el espín cuántico desempeña un papel clave en una de las ideas más importantes en ciencia, a saber, el principio de exclusión de Pauli, que es el fundamento de toda la química.

Una de las consecuencias del principio de exclusión de Pauli es que si dos electrones están emparejados en un átomo o molécula y poseen la misma energía (recuérdese del capítulo 3 que los enlaces químicos que mantienen unidas a las moléculas están constituidos por electrones que se comparten entre los átomos), entonces deben tener un espín opuesto. Podemos pensar, por lo tanto, que sus espines se anulan entre ellos, y nos referimos a ellos diciendo que se encuentran en un estado singlete de espín, puesto que solo pueden habitar un único estado. Este es el estado normal de los pares de electrones en los átomos y la mayoría de las moléculas. Sin embargo, cuando no están emparejados juntos al mismo nivel de energía, dos electrones pueden girar en la misma dirección, y a esto se le llama un estado triplete de espín, \* como en la reacción que Schulten estudió. \*\*

El lector puede estar familiarizado con aseveraciones muy dudosas de que los gemelos idénticos pueden notar los estados emocionales mutuos aunque estén separados por enormes distancias. De alguna manera, dice la idea, los gemelos están unidos a un nivel psíquico que la ciencia no comprende todavía. Se han hecho afirmaciones similares para explicar de qué manera un perro nota cuando su dueño vuelve a casa. Cabe aclarar que ninguno de estos ejemplos tiene ningún mérito científico, aunque hay quienes han intentado adscribirlos, de manera errónea, a una base de mecánica cuántica. Sin embargo, aunque esta «acción instantánea a distancia» (como se la suele describir) no se encuentra en nuestro mundo cotidiano clásico, es una característica clave del ámbito cuántico. Su nombre técnico es no localidad, o enmarañamiento, y se refiere a la idea de que algo que ocurre «aquí» puede tener un efecto instantáneo «allí», con independencia de lo lejos que se halle ese «allí».

Pensemos en un par de dados. Es fácil calcular la probabilidad matemática de sacar una pareja al lanzarlos. Para cada número concreto que salga en un dado, hay una probabilidad entre seis de que en el otro dado aparezca el mismo número. Por ejemplo, la probabilidad de que en el primer dado salga un cuatro es  $1/6$ , y la probabilidad de obtener un segundo cuatro es de una entre treinta y seis

(puesto que  $1/6 \times 1/6 = 1/36$ ). De modo que la probabilidad de obtener cualquier par de números, una pareja, es desde luego de una entre seis. Y multiplicando  $1/6$  por  $1/6$  diez veces, es bastante directo calcular que la probabilidad de obtener una pareja diez veces seguidas (con independencia de qué pareja se trate, por ejemplo, un doble cuatro, después un doble uno, y así de manera sucesiva) es de, aproximadamente, ¡una entre sesenta millones! Ello significa que si todos los habitantes del Reino Unido lanzaran un par de dados diez veces seguidas, entonces, por pura estadística, solo alrededor de una persona obtendría dobles cada vez.

Pero imagine el lector que se le ofrece un par de dados que siempre producen una pareja cuando se lanzan juntos. El número concreto que sale cada vez parece ser aleatorio, por lo general cambia a cada lanzada, pero ambos dados terminan siempre mostrando el mismo número. Es evidente que el lector sospecharía que hay algún truco. ¿No será que estos dados poseen algún mecanismo interno complejo que controla su movimiento, de manera que siempre muestran parejas de números en una secuencia programada idéntica? Para poner a prueba esta teoría, el lector empieza por sostener uno de los dados mientras lanza el otro, pero después vuelve a lanzarlos de dos en dos. Ahora cualquier serie preprogramada quedará desfasada, de modo que el truco no funcionará. Pero a pesar de esta estratagema, los dados persisten en mostrar el mismo número cuando son lanzados.

Otra posible explicación es que, de alguna manera, los dados han de ser capaces de resincronizarse antes de cada lanzamiento mediante el intercambio de una señal remota. Aunque un mecanismo de este tipo parece muy sofisticado, al menos es posible imaginarlo en principio. Sin embargo, cualquier mecanismo de este tipo estaría sujeto a una limitación impuesta por la teoría de la relatividad de Einstein, según la cual ninguna señal puede desplazarse más rápidamente que la velocidad de la luz. Esto nos proporciona un medio de comprobar si hay alguna señal que pasa entre los dados: todo lo que tenemos que hacer es asegurar que los dados están lo bastante separados como para que no haya tiempo suficiente para que exista un intercambio de señal sincronizada entre lanzamientos. Así pues, imaginemos que intentamos el mismo truco de antes, pero de alguna manera disponemos que un dado se lance en la Tierra y que el otro se lance de manera simultánea en Marte. Incluso a su distancia más cercana a la Tierra, la luz tarda cuatro minutos en desplazarse entre los dos planetas, por lo que sabemos que cualquier señal de sincronización tiene que sufrir el mismo retraso. Para superarlo, tan solo disponemos que ambos dados se lancen a intervalos más

frecuentes que dicho retraso. Esto tendría que impedir que cualquier señal sincronizara los datos entre lanzamientos. Si continúan mostrando números iguales, entonces parecería que entre los datos hay una conexión íntima que hace caso omiso de la famosa limitación de Einstein.

Aunque el experimento indicado no se ha realizado con datos interplanetarios, sí que se han llevado a cabo experimentos análogos con partículas entrelazadas cuánticamente en la Tierra, y los resultados muestran que las partículas separadas pueden ejecutar el mismo tipo de truco que imaginamos para nuestros datos: su estado puede permanecer correlacionado con independencia de la distancia entre ellas. Esta extraña característica del mundo cuántico parece no respetar el límite de la velocidad cósmica de Einstein, porque una partícula en un lugar puede influir instantáneamente sobre otra, por alejadas que estén entre sí. El término «enmarañamiento» con el que se describe este fenómeno lo acuñó Schrödinger, quien, al igual que Einstein, no era un fanático de lo que este calificaba de «acción fantasmal a distancia». A pesar de su escepticismo, muchos experimentos han demostrado el enmarañamiento o entrelazamiento cuántico, que es una de las ideas más fundamentales en la mecánica cuántica, y además tiene muchas aplicaciones y ejemplos en los campos de la física, la química y, como veremos, posiblemente también la biología.

Para comprender de qué manera el enmarañamiento cuántico se enmaraña con la biología debemos combinar dos ideas. La primera es la conexión instantánea entre dos partículas a través del espacio: el enmarañamiento. La segunda es la capacidad de una única partícula cuántica de hallarse en una superposición de dos o más estados diferentes a la vez; por ejemplo, un electrón podría estar girando en ambos sentidos a la vez, de modo que diríamos que se encuentra en una superposición de estados de «espín-arriba» y «espín-abajo». Combinamos estas dos ideas y tenemos dos electrones enmarañados en un átomo, cada uno de ellos en una superposición de sus dos estados de espín. Aunque ninguno tiene una dirección de espín definida, lo que sea que esté haciendo influye en el espín de su pareja y es influido por este. Pero recuérdese que los pares de electrones en el mismo átomo se encuentran siempre en un estado de singlete, lo que significa que debe tener en todo momento espines opuestos: uno tiene que ser espín-arriba, y el otro, espín-abajo. De este modo, aunque ambos electrones se hallen en una superposición de ser ambos arriba y abajo al mismo tiempo, de un modo peculiar cuántica deben tener, en todo momento, espín opuesto.

Separemos ahora los dos electrones entrelazados de manera que ya no estén en el mismo átomo. Si entonces decidimos medir el estado de espín de un electrón,

lo obligaremos a «elegir» en qué dirección gira. Pongamos que encontramos que, después de medirlo, es de espín-arriba. Puesto que los electrones se hallaban en un estado de singlete de espín enmarañado, esto significa que el otro electrón debe de ser ahora de espín-abajo. Pero recuérdese que, antes de la medición, ambos se encontraban en una superposición de giro arriba y abajo. Después de la medición, ambos tienen estados distintos: uno de ellos es arriba y el otro es abajo. De modo que el segundo electrón ha cambiado su estado físico, de manera instantánea y remota, desde hallarse en una superposición de espín en ambas direcciones a la vez a ser de espín-abajo... sin que se le haya tocado. Todo lo que hemos hecho es medir el estado de su pareja. Y en principio no importa lo alejado que este segundo electrón se halle: podría estar en el otro extremo del universo y el efecto sería el mismo: medir solo uno de la pareja enmarañada desploma inmediatamente la superposición del otro, con independencia de la distancia a la que se halle.

He aquí una analogía útil que puede ayudar al lector (¡solo un poco!). Imagine un par de guantes, cada uno en una caja cerrada, pero separadas por muchos kilómetros. El lector tiene en su poder una de las cajas y, antes de abrirla, no sabe si su guante es de la mano derecha o de la izquierda. Una vez que abre la caja y descubre el guante de la mano derecha, el lector «sabe» al instante que el otro guante de la caja que no se ha abierto es de la mano izquierda, no importa lo lejos que se halle dicha segunda caja. Sin embargo, lo que resulta decisivo aquí es que todo lo que ha cambiado es el conocimiento del lector. La caja alejada siempre ha contenido el guante de la mano izquierda, sin importar si el lector decidió abrir su caja o no.

El enmarañamiento cuántico es diferente. Antes de la medida, ningún electrón tiene una dirección de espín definida. Es solo el acto de medir (una u otra de las partículas enmarañadas) lo que obliga a ambos electrones a cambiar su estado: de hallarse cada uno en una superposición cuántica a la vez de arriba «y» abajo pasan a hallarse en un estado definido de arriba «o» abajo. Con los guantes era solo nuestra ignorancia del estado definido preexistente de los guantes lo que se disipaba. No solo la medida cuántica de un electrón lo obliga a «elegir» que su espín sea arriba o abajo; dicha elección obliga instantáneamente a su gemelo a adoptar el estado complementario, sin importar lo alejado que esté.

Todavía es necesario añadir otra sutileza. Tal como ya hemos comentado, dos electrones se hallan en un estado de singlete combinado cuando están emparejados y giran en direcciones opuestas, y en un estado de triplete cuando giran en la misma dirección. Si un electrón de una pareja de singlete situado en

el mismo átomo salta hasta un átomo vecino, su espín puede virar, de manera que ahora gira en la misma dirección que el electrón gemelo que dejó atrás, con lo que crea un estado de triplete de espín. Sin embargo, a pesar de hallarse ahora en átomos diferentes, la pareja puede mantener todavía su delicado estado enmarañado en el que permanecen emparejados desde el punto de vista de la mecánica cuántica.

Pero este es el mundo cuántico, y el solo hecho de que el electrón que saltó del átomo pueda ahora cambiar su espín no significa que lo haya hecho de manera definitiva. Cada uno de los dos electrones seguirá hallándose en una superposición al girar en las dos direcciones a la vez, y el par como tal existirá en una superposición al estar simultáneamente en un estado de singlete «y» en uno de triplete: ¡girarán al mismo tiempo en la misma dirección y en direcciones opuestas!

De modo que ahora que el lector ya ha sido adecuadamente preparado, y probablemente confundido, es hora de presentarle la idea más extraña, pero también más célebre, en el campo de la biología cuántica.

#### UN SENTIDO RADICAL DE DIRECCIÓN

Al principio de este capítulo discutimos el problema de cómo algo tan débil como el campo magnético de la Tierra puede proporcionar energía suficiente para alterar el resultado de una reacción química y, por lo tanto, generar una señal biológica que, por ejemplo, le dirá a un petirrojo en qué dirección necesita volar. Peter Hore, un químico que trabaja en Oxford, tiene una analogía muy interesante de cómo puede ser posible una sensibilidad tan extrema:

Supongamos que tenemos un bloque de granito que pesa un kilogramo y preguntamos si una mosca podría hacerlo caer. El sentido común nos dice que la respuesta es, a buen seguro, que no. Pero supongamos que yo colocara el bloque sobre una de sus aristas. Es evidente que en esta posición no sería estable y tendería a caer a la izquierda o a la derecha por su propia cuenta. Supongamos ahora que mientras el bloque se halla en este equilibrio inestable, una mosca se posa en su lado derecho. Aunque la energía impartida por la mosca sería minúscula, bastaría para hacer que el bloque cayera hacia la derecha en lugar de hacerlo hacia la izquierda. [18](#)

La moraleja es que energías minúsculas pueden tener efectos importantes, pero solo si el sistema en el que operan está muy finamente equilibrado entre dos resultados diferentes. Así, para detectar el impacto del campo magnético de la Tierra, muy débil, necesitamos el equivalente químico de un bloque de granito en un estado finamente equilibrado, de manera que pueda ser afectado de forma espectacular por la más leve influencia externa, como un campo magnético

débil.

Y ahora volvemos a la reacción rápida del triplete de Schulten. El lector recordará que los enlaces electrónicos entre los átomos a menudo están formados por un par de electrones que se comparten. Este par de electrones está siempre entrelazado y casi siempre en un estado de singlete de espín; es decir, los electrones tienen espines opuestos. Sin embargo, y de manera notable, ambos electrones pueden permanecer enmarañados incluso después de haberse roto el enlace entre los átomos. Los átomos separados, que ahora se denominan «radicales libres», pueden apartarse uno de otro, y es posible que el espín de uno de los electrones cambie de modo que los electrones enmarañados (ahora en átomos diferentes) se encuentren en una superposición de estados de singlete y de triplete, como en la reacción rápida del triplete de Schulten.

Un rasgo importante de esta superposición cuántica es que no necesariamente está equilibrada de manera equitativa: las probabilidades de que captemos al par enmarañado de electrones en el estado de singlete o de triplete no son iguales. Y, lo que es fundamental, el equilibrio entre estas dos probabilidades es sensible a cualquier campo magnético externo. En realidad, el ángulo del campo magnético con relación a la orientación del par separado influye mucho sobre la probabilidad de captarlo en un estado de singlete o de triplete.

Los pares radicales tienden a ser muy inestables, de modo que sus electrones se recombinarán a menudo para formar los productos de la reacción química. Pero la naturaleza química precisa de los productos dependerá entonces de este equilibrio singlete-triplete, con toda su sensibilidad a campos magnéticos. Para comprender cómo funciona, podemos pensar en la fase intermedia del estado de reacción del radical libre como si fuera el bloque de granito metafórico en equilibrio. En dicho estado, la reacción se halla en un equilibrio tan delicado que incluso un campo magnético débil (que aquí toma el lugar de la mosca) de menos de cien microtesla, como el de la Tierra, es suficiente para influir en la manera en que el lanzamiento de la moneda del estado singlete/triplete «cae» para generar los productos de la reacción química. <sup>19</sup> Para concluir, aquí teníamos un mecanismo por el que los campos magnéticos pueden influir sobre las reacciones químicas y, por lo tanto, afirmaba Schulten, pueden proporcionar una brújula magnética para las aves.

Pero Schulten no tenía ni idea de en qué parte del cuerpo de las aves ocurría esta reacción propuesta de pares radicales; lo presumible era suponer que estuviera localizada en el cerebro. Pero, para que funcionara, había que crear el par radical al principio, de la misma manera que el bloque de granito debe

colocarse en equilibrio sobre su arista. En 1978 Schulten presentó su trabajo en Harvard. En él describía los experimentos que había realizado su grupo en Gotinga, en los que se usó un pulso de láser para crear un par radical de electrones enmarañados. Entre el público había un eminente científico llamado Dudley Herschbach, que más tarde ganaría un premio Nobel de Química. Al final de la comunicación, Herschbach preguntó, en tono amistoso pero burlón: «Pero, Klaus, ¿dónde está el láser en el pájaro?». Bajo la presión de tener que proporcionar una respuesta racional a este destacado profesor eminente, Schulten sugirió que si realmente se necesitaba luz para activar el par radical, entonces quizás el proceso tuviera lugar dentro del ojo del ave.

En 1977, un año antes del artículo de Schulten sobre el par radical, un físico de Oxford llamado Mike Leask había especulado en otro artículo, publicado en *Nature*, con que, en efecto, el origen del sentido magnético podría hallarse dentro de fotorreceptores del ojo. [20](#) Había sugerido incluso que la responsable era la molécula del pigmento ocular, la rodopsina. Cuando Wolfgang Wiltschko leyó el artículo de Leask quedó intrigado, aunque no tenía pruebas experimentales que sugirieran que la luz desempeñaba un papel relevante en la magnetocepción de las aves. De modo que se dispuso a probar la veracidad de la idea de Leask.

Por aquel entonces, Wiltschko había estado realizando experimentos con palomas mensajeras para ver si reunían información de navegación magnética en su viaje de ida que después usaran para encontrar el camino de vuelta al palomar. Había descubierto que, si sometía a las palomas a un campo magnético perturbador mientras las transportaba lejos de su hogar, confundía su capacidad de encontrar el camino de vuelta cuando se las soltaba. Inspirado por la teoría de Leask, decidió efectuar el experimento de nuevo, esta vez sin la perturbación del campo magnético. En cambio, transportó las palomas en total oscuridad en una caja sobre el techo de su furgoneta Volkswagen. A las palomas les resultó entonces difícil encontrar el camino de vuelta a casa, lo que demostraba que necesitaban luz que contribuyera a que trazaran un mapa magnético de su viaje de ida, que después emplearían para seguir el camino de vuelta al palomar.

Los Wiltschko conocieron finalmente a Klaus Schulten en un congreso celebrado en los Alpes franceses en 1986. Para entonces ya estaban convencidos de que la magnetocepción del petirrojo dependía de la luz que entraba en sus ojos, pero como casi todos los que estaban interesados en los efectos bioquímicos de los campos magnéticos, todavía no estaban seguros de que la hipótesis del par radical fuera correcta. En realidad, nadie sabía en qué lugar del

ojo podía formarse el par radical. Entonces, en 1998, se descubrió la proteína criptocromo, que es un pigmento, en los ojos de las moscas del vinagre y, como ya hemos descrito en este mismo capítulo, se demostró que era responsable del arrastre promovido por la luz de sus ritmos circadianos. Resultó crucial que se supiera que el criptocromo era el tipo de proteína capaz de formar radicales libres durante su interacción con la luz. Esto lo aprovecharon Schulten y sus colaboradores para proponer que el criptocromo era el escurridizo receptor de la brújula química de las aves. Su trabajo se publicó en 2000 y habría de convertirse en uno de los artículos clásicos de la biología cuántica. <sup>21</sup> El autor principal de dicho artículo era, desde luego, Thorsten Ritz, a quien también conocimos en el capítulo 1 y que en este punto estaba trabajando en su tesis doctoral con Klaus Schulten. Thorsten, que en la actualidad trabaja en el Departamento de Física de la Universidad de California, en Irvine, está considerado uno de los principales expertos mundiales en magnetocepción.

El artículo del año 2000 es importante por dos razones. La primera, porque propuso que el criptocromo era la molécula candidata para la brújula química; y la segunda, porque describía con magnífico detalle (aunque se limitaba a especular) cómo la orientación del ave en el campo magnético de la Tierra podría afectar lo que ve.

El primer paso de su propuesta es la absorción de un fotón de luz azul por parte de la molécula pigmentaria fotosensible, el FAD, que se encuentra dentro de la proteína que es el criptocromo, y que ya hemos visto en este capítulo. Tal como describimos, la energía de este fotón se usa para hacer saltar un electrón de uno de los átomos dentro de la molécula del FAD, lo que deja un hueco de electrón vacante. Este puede ocuparlo otro electrón cedido por un par de electrones enmarañados en un aminoácido llamado triptófano en el criptocromo. Sin embargo, un hecho decisivo es que el electrón cedido puede permanecer entrelazado con su pareja. La pareja de electrones enmarañados puede formar entonces una superposición de estados de singlete/triplete, que es el sistema químico que Klaus Schulten descubrió que era tan exquisitamente sensible ante un campo magnético. De nuevo, el delicado equilibrio entre los estados de singlete/triplete es muy sensible a la intensidad y al ángulo del campo magnético de la Tierra, de modo que la dirección en la que el ave vuela implica una diferencia en la composición de los productos químicos finales generados por la reacción química.

De alguna manera, en un mecanismo que ni siquiera ahora tenemos en absoluto claro, esta diferencia (de qué lado cae el bloque de granito) genera una



señal que se envía al cerebro del ave para decirle dónde se encuentra el polo magnético más cercano.

Este mecanismo del par radical que propusieron Ritz y Schulten era ciertamente muy elegante; pero ¿era real? En aquella época no había siquiera ninguna prueba de que el criptocromo puede generar radicales libres cuando se expone a la luz. Sin embargo, en 2007, otro grupo alemán, esta vez con base en la Universidad de Oldenburg y dirigido por Henrik Mouritsen, pudo aislar moléculas de criptocromo de la retina de la curruca mosquitera (*Sylvia borin*) y demostrar que ciertamente producían pares radicales de vida larga cuando se exponían a la luz azul. [22](#)

No tenemos ni idea de qué es lo que esta «visión» magnética les parece a las aves, pero puesto que el criptocromo es un pigmento ocular que potencialmente realiza una tarea similar a la de los pigmentos opsina y rodopsina, que proporcionan la visión del color, quizá la visión que el ave tiene del cielo está teñida con un color adicional, invisible para el resto de nosotros (de la misma manera que algunos insectos pueden ver la radiación ultravioleta), que cartografía el campo magnético de la Tierra.

Cuando Thorsten Ritz propuso su teoría en 2000 no había pruebas de que el criptocromo estuviera implicado en la magnetocepción; pero ahora, gracias al trabajo de Steve Reppert y colegas, se sabe que el mismo pigmento está implicado en la detección de los campos magnéticos externos que realizan las moscas del vinagre y las mariposas monarca. En 2004 unos investigadores encontraron tres tipos de moléculas de criptocromo en los ojos de los petirrojos; y después, en 2013, un artículo de los Wiltschko (tan activos como siempre, aunque Wolfgang está en la actualidad jubilado) demostró que criptocromo extraído de los ojos de pollos \* absorbía luz a las mismas frecuencias que las que ellos descubrieron que eran importantes para la magnetocepción. [23](#)

Pero ¿de veras no caben dudas de que el proceso se basa en la mecánica cuántica? En 2004, Thorsten Ritz fue a trabajar con los Wiltschko para intentar diferenciar entre una brújula de magnetita convencional y una brújula química basada en su mecanismo de los radicales libres. Desde luego, las brújulas pueden verse alteradas por cualquier elemento magnético: si se mantiene una brújula cerca de un imán, este señalará al polo norte del imán y no al de la Tierra. Una barra imantada estándar produce lo que se llama un campo magnético estático, lo que significa que no cambia con el tiempo. Sin embargo, también es posible generar un campo magnético oscilante (por ejemplo, haciendo girar una barra imantada), y ahí es donde las cosas se ponen interesantes. Una brújula

convencional puede verse alterada por un campo magnético oscilante, pero solo si las oscilaciones son lo suficientemente lentas como para que la aguja de la brújula las siga. Si las oscilaciones tienen lugar de manera muy rápida, pongamos que centenares de veces por segundo, entonces la aguja de la brújula ya no las puede seguir, y su influencia es cero de promedio. De modo que una brújula convencional puede ser alterada por campos magnéticos que oscilan a frecuencias bajas, pero no a frecuencias altas.

Pero una brújula química presentará una respuesta muy distinta. El lector recordará que se propuso que la brújula química dependía de pares radicales que se hallaban en una superposición de estados de singlete y triplete. Debido a que los dos estados difieren en su energía y la energía está relacionada con la frecuencia, el sistema estará asociado con una frecuencia que, considerando las energías implicadas, cabría esperar que estuviera en la gama de los millones de oscilaciones por segundo. Una manera clásica de pensar en lo que ocurre que puede ser más fácil de imaginar (aunque no es estrictamente correcta) es que el par entrelazado de electrones pasa de un estado de singlete a uno de triplete y viceversa muchos millones de veces por segundo. En dicho estado, el sistema puede interactuar con un campo magnético oscilante mediante el proceso de resonancia, pero solo si el campo oscila a la misma frecuencia que el par radical: solo si, por emplear una analogía musical previa, están «entonados». Entonces la resonancia bombeará energía al sistema, lo que cambiará aquel equilibrio crítico entre estados de singlete y de doblete del que depende la brújula química; en lo esencial, haciendo caer aquel bloque de granito de la metáfora antes de que tenga tiempo de detectar el campo magnético de la Tierra. De modo que, en contraste con un campo magnético convencional, una brújula de par radical será alterada por campos magnéticos que oscilan a frecuencias muy altas.

El equipo Ritz-Wiltschko preparó un experimento para comprobar esta clara predicción de la teoría del par radical utilizando el petirrojo europeo: ¿sería sensible su brújula a campos magnéticos de oscilaciones bajas o altas? Aguardaron hasta el otoño, cuando los pájaros empezaban a mostrarse impacientes por migrar hacia el sur, y entonces los colocaron dentro de cámaras en embudo de Emlen. Aplicaron campos oscilantes desde varias direcciones y a distintas frecuencias y esperaron a ver si los campos podían desbaratar la capacidad natural de los pájaros para orientarse.

Los resultados fueron sorprendentes: un campo magnético afinado a 1,3 MHz (es decir, que oscilaba a 1,3 millones de ciclos por segundo), miles de veces más débil incluso que el campo de la Tierra, podía no obstante alterar la capacidad de

orientación de las aves. Pero aumentar o reducir la frecuencia del campo lo hacía menos efectivo. De modo que parecía que el campo resonaba con algo que vibraba a frecuencias muy altas en la brújula aviar: estaba claro que no era una brújula convencional basada en la magnetita, sino algo consistente con un par radical enmarañado en una superposición de estados de singlete y triplete. Este resultado intrigante [24](#) demuestra también que, si acaso existe, el par radical ha de ser capaz de sobrevivir frente a la decoherencia al menos durante un microsegundo (una millonésima de segundo), porque de otro modo su vida sería demasiado corta como para experimentar los altibajos del campo magnético oscilante que se aplicaba.

Sin embargo, en fechas recientes se ha puesto en cuestión la importancia de este resultado. El grupo de Henrik Mouritsen, de la Universidad de Oldemburgo, demostró que el ruido electromagnético artificial, procedente de una amplia variedad de dispositivos electrónicos, que se filtraba a través de las paredes de madera no aisladas de las cabañas que albergaban a los pájaros en el campus de la universidad, desbarataba su orientación mediante brújula magnética. Pero la capacidad retornaba una vez que se los colocaba en cabañas tapizadas de aluminio, que impedía el paso de alrededor del 99% del ruido electromagnético urbano. Básicamente, estos resultados sugieren que, después de todo, el efecto desbaratador de los campos electromagnéticos de radiofrecuencia quizá no esté confinado a una banda estrecha de frecuencias. [25](#)

De modo que todavía hay aspectos del sistema que siguen siendo misteriosos; por ejemplo, por qué la brújula del petirrojo tiene que ser tan hipersensible a campos magnéticos oscilantes, y cómo los radicales libres pueden permanecer enmarañados un tiempo lo suficientemente prolongado para que ello suponga una diferencia biológica. Pero en 2011, un artículo surgido del laboratorio de Vlatko Vedral, de Oxford, presentó cálculos cuánticos teóricos de la brújula propuesta de par radical y demostró que la superposición y el entrelazamiento tenían que mantenerse durante, al menos, decenas de microsegundos, lo que superaba con mucho las duraciones conseguidas en muchos sistemas moleculares artificiales comparables; y en potencia era lo bastante prolongado para indicarle al petirrojo en qué dirección tenía que volar. [26](#)

Estos estudios notables han generado una explosión de interés por la magnetocepción, que ahora se ha demostrado en un amplio abanico de especies, entre ellas multitud de especies de aves, langostas marinas, pastinacas, tiburones, rorcuales, delfines, abejas e incluso microbios. En la mayoría de los casos todavía no se han investigado los mecanismos implicados, pero hoy en día se ha

descubierto la magnetoecepción asociada al criptocromo en toda una serie de animales, desde nuestro valiente petirrojo hasta los pollos y las moscas del vinagre que ya hemos mencionado, y otros organismos diversos, entre ellos plantas. <sup>27</sup> Un estudio publicado por un grupo checo en 2009 demostró magnetoecepción en la cucaracha americana y que, como en el caso del petirrojo, esta era alterada por campos magnéticos oscilantes de alta frecuencia. <sup>28</sup> Un estudio posterior presentado en un congreso en 2011 demostraba que la brújula de la cucaracha necesitaba un criptocromo funcional.

El descubrimiento de una capacidad y de un mecanismo compartido tan ampliamente distribuido en la naturaleza sugiere que se ha heredado de un antepasado común. Pero el antepasado común de pollos, petirrojos, moscas del vinagre, plantas y cucarachas vivió hace mucho mucho tiempo: hace más de quinientos millones de años. De modo que las brújulas cuánticas son quizás antiguas, y es probable que proporcionaran capacidades de navegación a los reptiles y dinosaurios que deambulaban por las ciénagas del Cretáceo junto al *T. rex* que encontramos en el capítulo 3 (recuerde el lector que las aves modernas, como los petirrojos, descienden de los dinosaurios), a los peces que nadaban en los mares del Pérmico, a los antiguos artrópodos que se arrastraban bajo los océanos del Cámbrico o excavaban en sus fondos, y quizás a los microbios del Precámbrico que fueron los antepasados de toda la vida celular. Parece que la acción fantasmal a distancia de Einstein pudo haber estado ayudando a los seres vivos a encontrar su camino alrededor del globo durante la mayor parte de la historia de nuestro planeta.

## GENES CUÁNTICOS

El lugar más frío de la Tierra no es, como el lector podría imaginar, el polo Sur, sino un lugar en el centro del casquete de hielo de la Antártida oriental, a cerca de mil trescientos kilómetros del polo. Allí, las temperaturas invernales caen de forma habitual a muchas decenas de grados Celsius por debajo de cero. La temperatura más baja que se ha registrado en la Tierra,  $-89,2^{\circ}\text{C}$ , se alcanzó allí el 21 de julio de 1983, lo que le valió a la región el título de «polo Sur del frío». A temperaturas tan bajas, el acero se hace añicos y hay que cortar el gasoil con una motosierra.

El frío extremo congela la poca humedad que hay en el aire, lo que, junto a los fuertes vientos que soplan de manera incesante a través de las llanuras heladas, hace probablemente que la Antártida oriental sea el lugar más inhóspito del planeta.

Pero no siempre fue un lugar tan hostil. La masa continental que forma la Antártida fue, en sus tiempos, parte del supercontinente conocido como Gondwana y se hallaba situada, de hecho, cerca del ecuador. La cubría una densa vegetación de helechos con semillas, ginkgos y cicadas \* que a su vez ramoneaban los dinosaurios y reptiles herbívoros, como los *Lystrosaurus*, que tenían aspecto de rinoceronte.

Pero hace unos ochenta millones de años, la masa continental comenzó a dividirse y un fragmento derivó hacia el sur, y acabó por instalarse sobre el polo Sur para convertirse en la Antártida. Más tarde, hace unos sesenta y cinco millones de años, un enorme asteroide chocó con la Tierra y aniquiló a todos los dinosaurios y grandes reptiles, con lo que quedó espacio ecológico para que los mamíferos de sangre caliente se hicieran dominantes. A pesar de hallarse muy lejos del lugar del impacto, la fauna y flora de la Antártida resultaron alteradas de forma radical cuando los bosques dedicuos sustituyeron a los helechos y las cicadas. En ellos habitaban marsupiales, reptiles y aves, entre ellas pájaros bobos gigantes, todos los cuales están extinguidos en la actualidad. Ríos de aguas rápidas y lagos profundos que bullían de peces óseos y artrópodos ocupaban los valles.

Pero cuando los niveles de los gases de efecto invernadero disminuyeron, la

temperatura en la Antártida hizo otro tanto. Las corrientes oceánicas circulantes promovieron un enfriamiento adicional, y hace unos treinta y cuatro millones de años las aguas superficiales de los ríos y los lagos del interior empezaron a congelarse en invierno. Después, hace unos quince millones de años, el hielo de invierno dejó de fundirse en verano, con lo que encerró lagos y ríos bajo un techo de sólido hielo. A medida que nuestro planeta seguía enfriándose, glaciares enormes se extendieron por toda la Antártida, extinguiendo a todos sus mamíferos, reptiles y anfibios terrestres, y enterrando la tierra, los lagos y los ríos bajo gigantescas capas de hielo de varios kilómetros de espesor. Desde entonces, la Antártida ha permanecido encerrada en un ultracongelador.

Ya en el siglo XIX, el capitán John Davis, un cazador de focas estadounidense, fue el primer humano conocido que desembarcó en el continente. Solo en el siglo XX empezaron los asentamientos permanentes, cuando varios países entablaron reclamaciones territoriales mediante la construcción de estaciones de investigación en el continente. La primera base antártica soviética, Mirny, <sup>\*</sup> se estableció cerca de la costa el 13 de febrero de 1956. Desde allí partió, dos años más tarde, una expedición hacia el interior del continente con el objetivo de establecer una base en su polo geomagnético. La expedición se vio acosada por tormentas de nieve, nieve suelta, frío extremo (−55 °C) y falta de oxígeno, pero al final llegó al polo sur geomagnético el 16 de diciembre, durante el verano del hemisferio austral, y estableció la estación Vostok. <sup>\*\*</sup>

Desde entonces, esta base de investigación ha estado ocupada de manera casi permanente por un equipo de entre doce y veinticinco científicos e ingenieros que efectúan mediciones geomagnéticas y atmosféricas. Uno de los principales objetivos de la base es perforar el glaciar sobre el que se encuentra para obtener un registro congelado de los climas del pasado. En la década de 1970, los ingenieros perforaron un conjunto de testigos hasta los 952 metros de profundidad, y llegaron hasta el hielo que se había depositado en la última edad del hielo, decenas de miles de años atrás. En la década de 1980 llegaron a la base nuevas torres de perforación, lo que permitió a los investigadores alcanzar una profundidad de 2.202 metros. En 1996 habían conseguido perforar hasta los 3.263 metros: un agujero en el hielo de más de tres kilómetros de profundidad hasta el nivel en que se había depositado como hielo de superficie hace cuatrocientos veinte mil años.

Pero entonces la perforación se interrumpió, porque no mucho más abajo del fondo del orificio donde se había perforado se detectó algo extraño. De hecho, el descubrimiento de que bajo la estación Vostok había algo raro ocurrió un par de

décadas antes, en 1974, cuando un sondeo sísmico británico de la región había revelado lecturas anómalas para una zona extensa que cubría diez mil kilómetros cuadrados y que se hallaba a unos cuatro kilómetros bajo el hielo. El geógrafo ruso Andréi Petrovich Kapitsa sugirió que la anomalía de radar era causada por un lago enorme atrapado bajo el hielo y que se mantenía lo bastante caliente para permanecer líquido por la presión extrema y por la energía geotérmica subyacente. La propuesta de Kapitsa se vio confirmada finalmente mediante mediciones del área desde un satélite en 1996, que revelaban un lago subglacial de hasta quinientos metros de profundidad (desde la parte superior de su superficie líquida hasta el fondo) y del tamaño del lago Ontario. El equipo lo bautizó como lago Vostok.

Con un lago antiguo enterrado bajo el hielo, las operaciones de perforación adoptaron una importancia completamente diferente, pues el pozo de perforación se acercaba a un ambiente único. El lago Vostok había estado aislado de la superficie de la Tierra durante cientos de miles de años, por no decir millones: \* un mundo perdido. ¿Qué les había ocurrido a todos aquellos animales, plantas, algas y microbios que medraban en el lago antes de que quedara aislado, atrapando a cualesquiera organismos que hubieran sobrevivido en la oscuridad y el frío absolutos? ¿Se había extinguido la vida, o algunos organismos habrían sobrevivido e incluso se habrían adaptado a vivir a varios kilómetros bajo la superficie del glaciar? Tales organismos resistentes tendrían que haberse enfrentado a un ambiente extremo: implacablemente frío y totalmente oscuro, en agua comprimida por el peso de la gruesa capa de hielo hasta más de trescientas veces la presión de cualquier lago superficial. Sin embargo, una sorprendente diversidad de seres vivos consigue subsistir a duras penas en otros lugares improbables, como los bordes abrasadores y sulfurosos de los volcanes, los lagos ácidos e incluso las oscuras fosas submarinas situadas a miles de metros bajo la superficie del océano. Quizás el lago Vostok también podía mantener su propio ecosistema de extremófilos. \*

El descubrimiento de un lago bajo una gruesa capa de hielo adquirió una importancia todavía mayor gracias a otro descubrimiento efectuado a casi ochocientos mil millones de kilómetros de distancia en 1980, cuando la nave espacial *Voyager 2* fotografió la superficie de Europa, el satélite de Júpiter, y reveló una superficie de hielo con señales que indicaban que había un océano líquido debajo de ella. Si la vida podía sobrevivir durante cientos de miles de años en aguas enterradas a varios kilómetros bajo un glaciar antártico, quizá los océanos sumergidos de Europa podían sostener vida extraterrestre. La búsqueda



de vida en el seno del lago Vostok se convirtió en un ensayo para la caza todavía más emocionante de vida más allá de nuestro planeta.

La perforación se detuvo en 1996, justo a cien metros sobre la superficie del lago, para impedir que sus aguas prístinas entraran en contacto con la punta de la perforadora, que estaba saturada de queroseno y potencialmente contaminada con plantas, animales, microbios y sustancias químicas procedentes de la superficie. Sin embargo, el agua del lago Vostok ya se había estudiado a partir de testigos de hielo extraídos previamente. Las aguas del lago son recorridas por corrientes térmicas, de modo que justo por debajo de su techo helado experimenta un ciclo continuo de congelación y deshielo. Este proceso ha proseguido desde que el lago quedó aislado, de modo que su techo está constituido no por hielo del glaciar, sino por agua del lago helada (lo que se conoce como «hielo de acreción») que se extiende por decenas de metros por encima de la superficie líquida del lago. Los testigos de hielo extraídos de operaciones de perforación anteriores habían penetrado hasta este nivel de hielo y, en 2013, se publicó el primer estudio detallado de los testigos de hielo de acreción del lago Vostok. <sup>1</sup> La conclusión del trabajo es que el lago encerrado en el hielo contiene una compleja red de organismos, entre ellos bacterias, hongos y protozoos, todos ellos unicelulares, junto con animales más complejos como moluscos, gusanos, anémonas e incluso artrópodos. Los científicos han conseguido identificar incluso qué tipo de metabolismo empleaban estos organismos, así como sus hábitats probables y su ecología.

En este capítulo no queremos centrarnos en la (indudablemente fascinante) biología del Vostok, sino en los medios por los que cualquier ecosistema puede sobrevivir, aislado, durante miles o incluso millones de años. De hecho, puede considerarse que el lago Vostok es una especie de microcosmos de la propia Tierra, que se ha visto prácticamente aislada de entradas, aparte de los fotones solares, <sup>\*</sup> durante cuatro mil millones de años, y aun así ha mantenido un ecosistema rico y diverso frente a los desafíos procedentes de erupciones volcánicas generalizadas, impactos de asteroides y cambios en el clima. ¿Cómo consigue la vasta complejidad de la vida medrar y resistir a lo largo de cambios extremos en su ambiente durante miles o incluso millones de años?

Puede encontrarse una pista en parte del material que estudió el equipo de biología del Vostok: unos pocos microgramos de una sustancia química extraída del agua congelada del lago. Esta sustancia química es fundamental para la continuidad y la diversidad de toda la vida en nuestro planeta y contiene la molécula más extraordinaria en todo el universo conocido. La llamamos ADN.



El grupo que realizó el estudio del ADN del lago Vostok está radicado en la Universidad Estatal de Bowling Green, en Estados Unidos. Para leer la secuencia de millones de fragmentos de moléculas de ADN del Vostok recuperadas del agua del lago, utilizaron el tipo de tecnología de secuenciación de ADN que previamente se había empleado para descifrar el genoma humano. Después compararon el ADN del Vostok con bases de datos repletas de secuencias génicas leídas a partir de los genomas de miles de organismos recolectados de todo el globo. Lo que descubrieron fue que muchas de las secuencias del lago Vostok eran idénticas o muy parecidas a las de genes procedentes de bacterias, hongos, artrópodos y otros animales que viven sobre el hielo, en particular los propios de lagos fríos y de fosas marinas profundas y oscuras, ambientes que probablemente son un poco como el lago Vostok. Estas semejanzas génicas les permitieron emitir hipótesis fundamentadas acerca de la naturaleza y los hábitats probables de los tipos de organismos que habían dejado sus rúbricas de ADN bajo el hielo.

Pero recuérdese que los organismos del lago Vostok han permanecido encerrados bajo el hielo durante muchos cientos de miles de años. La semejanza de sus secuencias de ADN con las de organismos que viven encima del hielo es, por lo tanto, una consecuencia de una alcurnia compartida a partir de organismos que tuvieron que haber vivido entre la flora y la fauna de la Antártida antes de que el lago y sus habitantes quedaran encerrados bajo el hielo. Las secuencias génicas de estos organismos ancestrales se copiaron después, de manera independiente, tanto por encima como por debajo del hielo, durante miles de generaciones. Pero a pesar de esta larga cadena de acontecimientos de copia, las versiones gemelas de los mismos genes han permanecido casi idénticas. De alguna manera, la compleja información genética que determina la forma, las características y la función de los organismos que viven tanto por encima como por debajo del hielo se ha transmitido fielmente, con apenas algunos errores, a lo largo de cientos de miles de años.

Esta capacidad que la información genética tiene de replicarse fielmente de una generación a la siguiente (lo que llamamos herencia) es, desde luego, básica para la vida. Los genes, escritos en el ADN, codifican los enzimas y las proteínas que, a través del metabolismo, fabrican todas y cada una de las biomoléculas de cada célula viva, desde los pigmentos fotosintéticos de las plantas y microbios hasta los receptores olfativos de los animales o las misteriosas brújulas magnéticas de las aves, y de hecho todas las características de todos los organismos vivos. Muchos biólogos afirmarían, en efecto, que la

autorreplicación es el rasgo definitorio de la vida. Pero los seres vivos no podrían replicarse a menos que fueran capaces, en primer lugar, de replicar las instrucciones para hacerse. De modo que el proceso de la herencia (copia en alta fidelidad de la información genética) hace posible la vida. El lector recordará del capítulo 2 que el misterio de la herencia (la manera en que la información genética puede transmitirse tan fielmente de una generación a la siguiente) fue el enigma que convenció a Erwin Schrödinger de que los genes eran entidades mecánicas cuánticas. Pero ¿estaba en lo cierto? ¿Necesitamos la mecánica cuántica para explicar la herencia? Esta es la cuestión a la que ahora volveremos.

## FIDELIDAD

Solemos dar por sentada la capacidad de los organismos vivos de replicar fielmente su genoma, pero en realidad este es uno de los aspectos más notables y esenciales de la vida. La tasa de errores de copia en la replicación del ADN, lo que denominamos mutaciones, es por lo general de menos de uno entre cien mil millones. Para hacerse una idea de este extraordinario nivel de precisión, considere el lector el millón, aproximadamente, de letras, signos de puntuación y espacios en este libro. Piense ahora en mil libros de tamaño similar en una biblioteca e imagine que tiene la tarea de copiar fielmente todos y cada uno de los caracteres y espacios. ¿Cuántos errores cree el lector que cometería? Esta era precisamente la tarea que realizaban los amanuenses medievales, que se esmeraban para copiar a mano textos antes de la invención de la imprenta. Sus esfuerzos estaban repletos de errores, lo que no es sorprendente, como demuestra la gran variedad de copias divergentes de textos medievales. Desde luego, los ordenadores pueden copiar información con un alto grado de fidelidad, pero lo hacen con la intensidad de la moderna tecnología electrónica digital. Imagine el lector la construcción de una máquina copiadora a partir de material húmedo y blando. ¿Cuántos errores cree que haría al leer y escribir su información copiada? Pero cuando este material húmedo y blando es una de las células de nuestro cuerpo y la información está codificada en ADN, entonces el número de errores es de menos de uno entre cien mil millones.

La copia en alta fidelidad es crucial para la vida porque la extraordinaria complejidad del tejido vivo requiere un conjunto de instrucciones igualmente complejo, en el que un solo error puede ser fatal. El genoma en nuestras células consiste en alrededor de trescientos mil millones de letras genéticas que codifican unos quince mil genes, pero incluso el genoma de los más sencillos

microbios autorreplicantes, como los que viven bajo el hielo de Vostok, consiste en varios miles de genes escritos en varios millones de letras genéticas. Aunque la mayoría de los organismos toleran unas cuantas mutaciones en cada generación, permitir que más de unas pocas pasen a la siguiente generación puede conducir a problemas graves, que nosotros los humanos experimentamos como enfermedades genéticas, o incluso como descendientes no viables. Asimismo, siempre que las células de nuestro cuerpo (sanguíneas o epidérmicas, por ejemplo) se replican, deben replicar asimismo su ADN para insertarlo en las células hijas. Los errores en este proceso conducen al cáncer. \*

Pero para comprender de qué manera la mecánica cuántica es básica para la herencia, primero debemos visitar Cambridge el 28 de febrero de 1953, fecha en que Francis Crick irrumpió en el pub *Eagle* y declaró que él y James Watson habían «descubierto el secreto de la vida». Más avanzado el año publicaron su artículo de referencia, [2](#) que desvelaba una estructura y describía un conjunto de reglas sencillas que proporcionaban las respuestas a dos de los misterios fundamentales de la vida: cómo se codifica la información biológica y cómo se hereda.

Puede decirse que aquello que se acostumbra a destacar en muchos relatos del descubrimiento del código genético es una característica de importancia secundaria: que el ADN adopta una estructura en doble hélice. En efecto, esto es notable, y la elegante estructura del ADN se ha convertido con razón en una de las imágenes icónicas de la ciencia, reproducida en camisetas y páginas web e incluso en arquitectura. Pero la doble hélice es, en esencia, solo un andamiaje. El secreto real del ADN reside en lo que la hélice sostiene.

Tal como señalamos brevemente en el capítulo 2, la estructura helicoidal de ADN (véase figura 7.1) la proporciona un espinazo de azúcar-fosfato que porta el mensaje real del ADN: las ristas de bases de ácidos nucleicos, guanina (G), citosina (C), timina (T) y adenina (A). Watson y Crick reconocieron que esta secuencia lineal formaba un código; y este, propusieron, era el código genético.

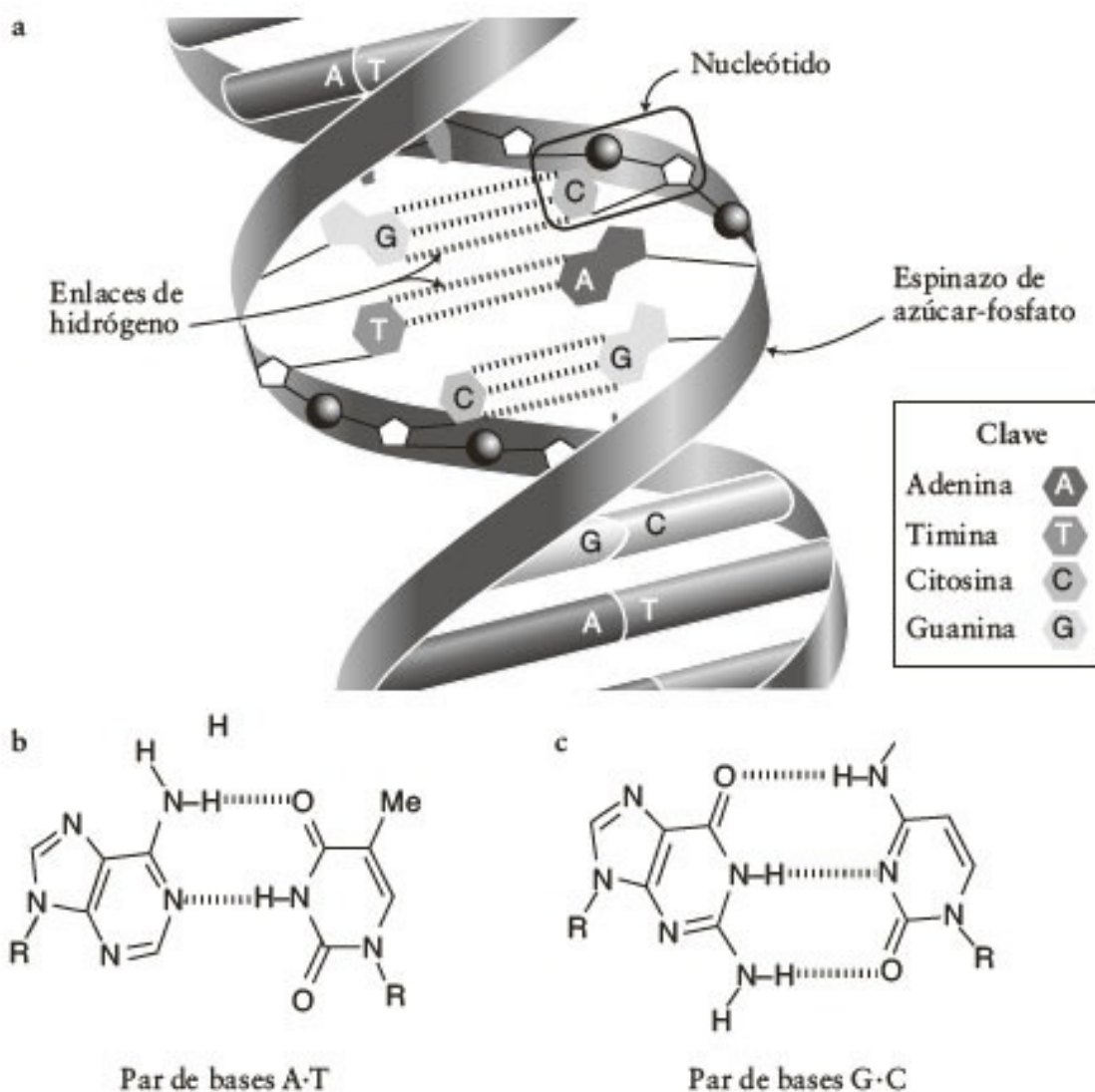


FIGURA 7.1. La estructura del ADN: a) muestra la doble hélice de Watson y Crick; b) presenta un detalle de las letras genéticas emparejadas A y T; c) muestra un detalle de las letras genéticas emparejadas G y C. En ambos casos, los enlaces o puentes de hidrógeno (protones compartidos) que unen las dos bases se indican como líneas de puntos. En este emparejamiento estándar (canónico) de las bases, según Watson y Crick, estas se indican en su forma normal, no tautómera.

En la última línea de su histórico artículo, Watson y Crick sugerían que la estructura del ADN proporcionaba asimismo una solución al segundo de los grandes misterios de la vida: «No se nos ha escapado que el emparejamiento de bases que hemos postulado sugiere inmediatamente un posible mecanismo de

copia del material genético». Lo que no les había pasado inadvertido era una característica crucial de la doble hélice: que la información de una de sus hebras (su secuencia de bases) se halla también presente como una copia inversa en la otra hebra: una A de una hebra está siempre emparejada con una T en la otra, y una G está siempre emparejada con una C. El emparejamiento específico entre las bases de hebras opuestas (un par A:T o un par G:C) lo proporcionan, en realidad, enlaces químicos débiles, llamados puentes de hidrógeno. Este «pegamento» que mantiene unidas dos moléculas es en esencia un protón compartido, y es fundamental para nuestro relato, de modo que no tardaremos en analizar su naturaleza con más detalle. Pero la debilidad del enlace entre las hebras emparejadas de ADN sugería de inmediato un mecanismo de copia: las hebras podían separarse, y cada una podía actuar como una plantilla sobre la que construir su pareja complementaria para hacer dos copias de la doble hebra original. Esto es precisamente lo que ocurre cuando se copian los genes durante la división celular. Las dos hebras de la doble hélice con su información complementaria se separan para permitir que un enzima llamado polimerasa del ADN acceda a cada hebra separada. Después el enzima se fija a una hebra y se desliza a lo largo de la cadena de nucleótidos, leyendo cada letra genética y, con una precisión que casi no admite error, inserta una base complementaria en la hebra que va creciendo: allí donde ve una A, inserta una T; allí donde ve una G, inserta una C, y así sucesivamente hasta que ha producido una copia complementaria completa. El mismo proceso se repite en la otra hebra, lo que da lugar a dos copias de la doble hélice original: una para cada célula hija.

Este proceso engañosamente simple es la base de la propagación de toda la vida en nuestro planeta. Pero cuando Schrödinger insistía en 1944 en que el grado extraordinariamente grande de fidelidad de la herencia no podía explicarse mediante las leyes clásicas (los genes, insistía, eran simplemente demasiado pequeños para que su regularidad se basara en las reglas del «orden a partir del desorden»), sugirió que los genes debían de ser, en cambio, algún tipo de «cristal aperiódico». ¿Son los genes cristales aperiódicos?

Los cristales, como los granos de sal, tienden a adoptar formas distintivas. Los cristales de cloruro sódico (la sal común) son cubos, mientras que las moléculas de agua en el hielo configuran prismas hexagonales que crecen para producir las formas maravillosamente diversas de los copos de nieve. Estas son una consecuencia de las maneras en que las moléculas pueden empaquetarse dentro del cristal, de modo que, en último término, las determinan las leyes cuánticas que rigen la forma de las moléculas. Pero los cristales estándar, aunque están

muy ordenados, no codifican mucha información porque cada unidad repetida es la misma que todas las demás (algo así como un papel pintado teselado), de modo que una regla sencilla puede describir todo el cristal. Schrödinger sugirió que los genes eran lo que él denominaba cristales aperiódicos; es decir, cristales con una estructura molecular repetida similar a la de los cristales estándar, pero modulada de alguna manera, por ejemplo con intervalos o períodos diferentes (y de aquí el término «aperiódicos») entre las repeticiones o con estructuras diferentes en las repeticiones. O sea, más parecidos a un tapiz complejo que a un papel pintado. Según él, estas estructuras moduladas y repetidas codifican información genética y, como los cristales, su orden estaría codificado al nivel cuántico. Recuérdesse que esto ocurría una década antes de Watson y Crick; es decir, años antes de que se conociera la estructura de un gen, o incluso de qué estaban hechos los genes.

¿Estaba Schrödinger en lo cierto? El primer punto evidente es que el código del ADN está hecho en realidad de una estructura repetida (las bases del ADN) que es aperiódica en el sentido de que cada unidad que se repite puede estar ocupada por una base de entre cuatro diferentes. Los genes son realmente cristales aperiódicos, tal como Schrödinger predijo. Pero los cristales aperiódicos no tienen por qué codificar información al nivel cuántico: los granos irregulares en una placa fotográfica están hechos de cristales de sal de plata, y no son cuánticos. Para ver si Schrödinger estaba también en lo cierto acerca de que los genes son entidades cuánticas, necesitamos observar con mayor detenimiento la estructura de las bases de ADN, y en particular la naturaleza del enlace de los pares de bases complementarios, T con A y C con G.

El emparejamiento de ADN que contiene el código genético está basado en los enlaces químicos que mantienen unidas las bases complementarias. Tal como ya hemos mencionado, estos enlaces, llamados puentes de hidrógeno, están formados por protones unitarios, esencialmente núcleos de átomos de hidrógeno, que son compartidos entre dos átomos, uno en cada una de las bases complementarias en hebras opuestas: son estos puentes los que mantienen unidas las bases emparejadas (véase figura 7.1). La base A debe emparejarse con la base T porque cada A presenta protones en las posiciones precisamente adecuadas para formar puentes de hidrógeno con una T. Una base A no puede emparejarse con una C porque los protones no se hallarían en los lugares adecuados para producir los enlaces.

Este emparejamiento de las bases nucleotídicas mediado por los protones es el código genético que se replica y se transmite en cada generación. Y no se trata

de una simple transferencia de información de encendido y apagado, como un mensaje codificado escrito en una nota de «una única vez» y que se destruye después de usarla. El código genético debe leerse continuamente a lo largo de toda la vida de la célula para dirigir la maquinaria productora de proteínas, que fabrique los motores de la vida, los enzimas, y de este modo orqueste todas las demás actividades de la célula. Este proceso lo realiza un enzima denominado polimerasa del ARN que, como la polimerasa del ADN, lee las posiciones de estos protones codificadores a lo largo de la cadena del ADN. De la misma manera que el significado de un mensaje o el argumento de un libro están escritos en la posición de las letras de una página, así las posiciones de los protones en la doble hélice determinan el relato de la vida.

El físico sueco Per-Olov Löwdin fue el primero en señalar lo que, visto en retrospectiva, parece evidente: que la posición de los protones está determinada por leyes cuánticas, no por leyes clásicas. De modo que el código genético que hace posible la vida es inevitablemente un código cuántico. Schrödinger tenía razón: los genes están escritos en letras cuánticas, y la fidelidad de la herencia la proporcionan leyes cuánticas, no clásicas, de modo que la forma de nuestra nariz, el color de nuestros ojos y los aspectos de nuestro carácter están determinados por leyes cuánticas que operan dentro de la estructura de una única molécula de ADN que heredamos de uno u otro de nuestros progenitores. Tal como Schrödinger predijo, la vida opera mediante un orden que va desde la estructura y comportamiento de organismos enteros hasta la posición de los protones a lo largo de sus hebras de ADN (orden a partir del orden), y es este orden el responsable de la fidelidad de la herencia.

Pero incluso los replicadores cuánticos cometen errores ocasionales.

## INFIDELIDAD

La vida no podría haber evolucionado en nuestro planeta y no podría haberse adaptado a sus muchos retos si el proceso de copiar el código genético hubiera sido siempre perfecto. Por ejemplo, los microbios que nadaban en aquellos lagos antárticos templados hace muchos miles de años tenían que estar bien adaptados a la vida en un ambiente relativamente cálido e iluminado. Cuando el techo de hielo selló su mundo, aquellos microbios que copiaban sus genomas con el cien por cien de fidelidad perecieron casi con toda seguridad. Pero muchos microbios cometieron algunos errores en el proceso de copia y generaron hijos mutantes que eran algo diferentes de sus progenitores. Aquellos hijos cuyas diferencias los

equiparon mejor para sobrevivir en un ambiente más frío y más oscuro habrían prosperado, y de manera gradual, a lo largo de miles de eventos de copia no totalmente perfectos, los descendientes de aquellos microbios atrapados se habrían adaptado bien a la vida en el lago sumergido.

De nuevo, este proceso de adaptación mediante mutación (errores en la replicación del ADN) dentro del lago Vostok es un microcosmos del proceso que ha tenido lugar en todo el globo durante miles de millones de años. La Tierra ha sufrido muchas catástrofes importantes a lo largo de su extensa historia, desde erupciones volcánicas enormes hasta edades del hielo e impactos de meteoritos. La vida habría perecido si no se hubiera adaptado al cambio mediante la copia de errores. Y, de manera igualmente importante, las mutaciones han sido también las impulsoras de los cambios genéticos que transformaron los microbios sencillos que primero evolucionaron en nuestro planeta en la biosfera enormemente diversa de la actualidad. Un poco de infidelidad tiene mucho recorrido, si se le da el tiempo suficiente.

Además de proponer que la mecánica cuántica era el origen de la fidelidad de la herencia, Erwin Schrödinger hizo otra atrevida sugerencia en su libro de 1944 *What is Life ?* Especuló con que las mutaciones pueden representar algún tipo de salto cuántico dentro del gen. ¿Es ello plausible? Para dar respuesta a esta pregunta primero debemos explorar una controversia que afecta al meollo mismo de la teoría evolutiva.

#### LA JIRafa, EL GUISANTE Y LA MOSCA DEL VINAGRE

Suele decirse que Charles Darwin «descubrió» la evolución, pero, al menos un siglo antes de que enunciara su teoría, los naturalistas estaban ya familiarizados, gracias al estudio de los fósiles, con el hecho de que los organismos habían cambiado a lo largo del tiempo geológico. En realidad, el abuelo de Darwin, Erasmus Darwin, había sido un ferviente evolucionista. Pero probablemente la más famosa teoría evolucionista predarwinista fue la que propuso un aristócrata francés que llevaba el impresionante título de Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet, caballero de Lamarck.

Nacido en 1744, Lamarck se educó como sacerdote jesuita, pero al morir su padre heredó el dinero justo para adquirir un caballo, con el que partió para convertirse en un soldado y luchar contra Prusia en la guerra de Pomerania. Su carrera militar quedó interrumpida cuando lo hirieron y volvió a París para trabajar como empleado de banca, al tiempo que estudiaba botánica y medicina



en su tiempo libre. Acabó encontrando un trabajo de ayudante botánico en el Jardin du Roi (el Jardín del Rey), hasta que la revolución le cortó la cabeza a su patrono. Pero Lamarck prosperó en la Francia posrevolucionaria, y obtuvo una cátedra en la Universidad de París, donde cambió el centro de atención de sus estudios, que pasó de las plantas a los invertebrados.

Lamarck es uno de los grandes científicos menos apreciados, como mínimo en el mundo anglosajón. Además de acuñar el término «biología» (del griego *bios*, «vida»), propuso, medio siglo antes que Darwin, una teoría de la evolución que proporcionaba un mecanismo plausible para el cambio evolutivo. Lamarck indicó que los organismos pueden modificar su cuerpo en respuesta al ambiente a lo largo de su vida. Por ejemplo, los granjeros acostumbrados a un trabajo físico duro suelen desarrollar un cuerpo más musculoso que los empleados de banca. Lamarck afirmaba que estos cambios adquiridos pueden ser heredados por los hijos y descendientes y, con ello, impulsar el cambio evolutivo. Su ejemplo más famoso, y más ridiculizado, es el del antílope imaginario que alargaba el cuello para ramonear las hojas más altas del árbol. Lamarck sugirió que los descendientes del antílope heredaron la característica adquirida del cuello alargado y su progenie experimentó el mismo proceso, hasta que finalmente evolucionaron y se convirtieron en jirafas.

En el mundo anglosajón se ridiculizó sin excepción la teoría lamarckista del cambio adaptativo heredado, pues había pruebas abundantes de que las características adquiridas durante la vida de un animal no solían heredarse. Por ejemplo, los noreuropeos de piel clara que emigraron a Australia hace varios siglos suelen ser bronceados si pasan mucho tiempo al aire libre pero, lejos del sol, sus hijos son igual de pálidos que sus antepasados. Es evidente que el cambio adaptativo en respuesta a una luz solar intensa, el bronceado, no se hereda. De modo que, después de la publicación de *El origen de las especies* en 1859, la teoría evolutiva lamarckista resultó eclipsada por la teoría de la selección natural de Darwin. \*

En la actualidad se pone el énfasis en la versión de Darwin de la teoría de la evolución, la idea de la supervivencia de los más aptos, con una naturaleza implacable que perfecciona a los bien adaptados a partir de su progenie menos perfecta. Pero la selección natural es solo la mitad de la historia de la evolución. Para que la evolución tenga éxito, la selección natural necesita una fuente de variación a la que hincarle el diente. Esto era algo que desconcertaba a Darwin porque, como ya hemos descubierto, la herencia se caracteriza por un grado notablemente alto de fidelidad. Esto puede no quedar patente de inmediato en los

organismos sexuales que parecen ser diferentes de sus padres, pero la reproducción sexual solo reorganiza los rasgos existentes de los progenitores para generar los hijos. De hecho, a principios del siglo XIX se creía de manera generalizada que la mezcla de rasgos en la reproducción sexual funcionaba de manera parecida a la mezcla de pintura. Si se toman varios cientos de latas de pinturas de colores variados y se mezcla media lata de una con media lata de otra, y se repite este proceso miles de veces, entonces acabaremos por tener varios cientos de latas de pintura gris: la variación individual se habrá mezclado para obtener una población promedio. Pero Darwin necesitaba que la variación se mantuviera continuamente y de hecho aumentara, si tenía que ser el origen del cambio evolutivo.

Darwin creía que la evolución progresaba de manera muy gradual, ya que la selección natural actúa sobre una variación heredable minúscula:

La selección natural solo puede actuar mediante la preservación y la acumulación de modificaciones heredadas infinitesimalmente pequeñas, cada una de ellas beneficiosa para el ser que se conserva; y de la misma forma que la geología moderna ha casi proscrito teorías tales como la excavación de un gran valle por una única ola diluvial, de la misma manera la selección natural, si es un verdadero principio, eliminará la creencia en la creación continua de nuevos seres orgánicos, o de cualquier modificación grande y repentina de su estructura. <sup>3</sup>

Pero el origen de esta materia prima para la evolución (las «modificaciones heredadas infinitesimalmente pequeñas») era un gran misterio. Las rarezas o *sports* \* con características heredables eran bien conocidas por los biólogos del siglo XIX : por ejemplo, en una granja de Nueva Inglaterra nació a finales del siglo XVIII una oveja con patas muy cortas, y se la utilizó para criar una variedad de patas cortas, las llamadas ovejas Ancon, que eran más fáciles de manejar porque no podían saltar vallas. Sin embargo, Darwin creía que estas peculiaridades no podían ser los motores de la evolución porque los cambios implicados eran demasiado grandes y solían generar animales extraños que tendrían muy pocas probabilidades de sobrevivir en la naturaleza. Darwin tenía que encontrar una fuente de cambios heredables más pequeños y menos espectaculares para que proporcionaran las modificaciones infinitesimalmente pequeñas necesarias para que su teoría funcionara. Nunca llegó a resolver este problema. De hecho, en ediciones posteriores de *El origen de las especies* incluso recurrió a una forma de teoría evolutiva lamarckista para generar una variación menor y heredable.

Parte de la solución ya la había descubierto en vida de Darwin el monje y botánico checo Gregor Mendel, \* a quien conocimos en el capítulo 2. Los

experimentos de Mendel con guisantes demostraron que las pequeñas variaciones en la forma y el color de los guisantes se heredaban realmente de manera estable, y de manera decisiva, estos rasgos no se mezclaban sino que se heredaban puros generación tras generación, aunque a menudo saltaban alguna generación si el carácter era recesivo en lugar de dominante. Mendel propuso que unos «factores» discretos y heredables, lo que ahora llamamos genes, codificaban los rasgos biológicos y eran el origen de la variación biológica. Así, en lugar de plantear la reproducción sexual en términos de latas de pintura que se mezclan, piénsese en tarros llenos de canicas de una inmensa variedad de colores y formas. Cada generación que se mezcla intercambia la mitad de canicas de un tarro con la mitad de otro tarro. El aspecto esencial es que, incluso después de miles de generaciones, estas canicas individuales conservan sus colores distintos, de la misma manera que los rasgos pueden transmitirse sin cambios durante cientos o miles de generaciones. De este modo, los genes proporcionan una fuente estable de variación sobre la que la selección natural puede actuar.

La obra de Mendel fue ninguneada casi por completo mientras vivió, y olvidada después; así, hasta donde sabemos, Darwin no conocía ni la teoría de Mendel de los «factores heredables» ni su solución potencial al enigma de la mezcla. De manera que el problema de encontrar la fuente de los cambios heredables que impulsan la evolución condujo, a finales del siglo XIX, a una reducción del respaldo a la teoría de la evolución darwinista. Pero al iniciarse el nuevo siglo, varios botánicos que estudiaban la hibridación de plantas y que descubrieron las leyes que rigen la herencia de la variación resucitaron las ideas de Mendel. Como todo buen científico que cree haber encontrado algo nuevo, buscaron en la literatura existente antes de publicar sus resultados, y quedaron asombrados al descubrir que Mendel había descrito sus leyes de la herencia hacía unas cuantas décadas.

El redescubrimiento de los factores mendelianos, que ahora recibieron el nuevo nombre de genes, <sup>\*</sup> proporcionó una solución al enigma de la mezcla de Darwin, pero no resolvió de inmediato el problema de encontrar el origen de la nueva variación genética necesaria para promover el cambio evolutivo a largo plazo, puesto que parecía que los genes se heredaban sin alteración. La selección natural puede actuar para cambiar la mezcla de las canicas que son los genes en cada generación pero, por su cuenta, no produce ninguna canica nueva. Este callejón sin salida lo resolvió uno de los botánicos que redescubrieron la genética mendeliana, Hugo de Vries, quien mientras paseaba por un campo de patatas observó una variedad completamente nueva de hierba del asno o

borriquera, *Oenothera lamarckiana* , más alta que la planta habitual y con pétalos ovalados en lugar de los familiares pétalos acorazonados. Reconoció que esta planta era «mutante» y, más importante aún, demostró que los rasgos mutantes se transmitían a la descendencia de la planta, de manera que se heredaban.

El genetista Thomas Hunt Morgan llevó el estudio de las mutaciones de De Vries al laboratorio, en la Universidad de Columbia, en los primeros años de la década de 1900, donde trabajó con la siempre dispuesta mosca del vinagre. Morgan y su equipo expusieron las moscas a ácidos fuertes, rayos X y toxinas en un esfuerzo para crear mutantes. Finalmente, en 1909, una mosca con ojos blancos surgió de su ninfa, y el equipo demostró que, como en la hierba borriquera de extrañas formas de De Vries, el rasgo mutante se transmitía como un gen mendeliano.

La unión de la selección natural darwiniana con la genética y la teoría de la mutación mendeliana condujo finalmente a lo que a menudo se conoce como síntesis neodarwiniana. Se comprendió que la mutación era el origen último de variaciones genéticas heredables que en su mayor parte tienen poco efecto y a veces son incluso dañinas, pero que ocasionalmente hacen que los mutantes sean más adecuados que sus progenitores. El proceso de la selección natural interviene entonces para erradicar a los mutantes menos adecuados de una población, al tiempo que permite que las variantes de más éxito sobrevivan y proliferen. Por último, los mutantes más aptos se convierten en la norma, y la evolución avanza mediante «la preservación y la acumulación de modificaciones heredadas infinitesimalmente pequeñas».

Un componente clave de la síntesis neodarwiniana es el principio de que las mutaciones se producen al azar; la variación no se genera en respuesta a un cambio ambiental. Así, cuando el ambiente cambia, una especie tiene que esperar a que se presente la mutación adecuada (mediante procesos aleatorios) con el fin de poder seguir dicho cambio. Esto contrasta con la idea lamarckista de evolución, que, por el contrario, proponía que la adaptación heredable (el cuello más largo de la jirafa) surgía en respuesta a un reto ambiental y después se heredaba.

A principios del siglo xx todavía no estaba claro si las mutaciones heredables ocurrían al azar, tal como creían los neodarwinistas, o se generaban en respuesta a desafíos ambientales, como creían los lamarckistas. Recuérdese que Morgan trató a sus moscas con sustancias químicas tóxicas y con radiación para generar mutaciones. Quizá, en respuesta a estos retos ambientales, las moscas generaban

nuevas variaciones que las ayudaban a sobrevivir el desafío ambiental. Al igual que la jirafa de Lamarck, podrían haber alargado su cuello en un sentido metafórico, y después haber transmitido este rasgo adaptativo a sus descendientes como una mutación heredable.

Los experimentos clásicos realizados por Salvador Luria, el director de tesis de James Watson, y Max Delbrück en la Universidad de Indiana en 1943, pretendían poner a prueba estas teorías rivales. Para entonces las bacterias habían sustituido a las moscas del vinagre como sujetos favoritos de los estudios evolutivos debido a la facilidad con que se las hacía crecer en el laboratorio y sus rápidos tiempos de generación. Se sabía que las bacterias podían ser infectadas por virus, pero que si se las exponía de manera repetida a estos desarrollaban rápidamente una resistencia al adquirir mutaciones. Esto ofrecía una situación ideal en la que se podrían comprobar las teorías rivales de la mutación, la neodarwinista y la lamarckista. Luria y Delbrück se dispusieron a descubrir o bien si en la población ya había mutantes bacterianos capaces de resistir la infección vírica, como suponía el neodarwinismo, o bien si surgían solo en respuesta a un reto ambiental planteado por un virus, tal como predecía el lamarckismo. Los dos científicos se encontraron con que los mutantes se presentaban más o menos con la misma tasa, tanto si el virus estaba presente como si estaba ausente. Por decirlo de otra manera, la presión selectiva del ambiente no afectaba a la tasa de mutación. Su experimento les valió un premio Nobel en 1969 y estableció el principio de la aleatoriedad de la mutación como un principio fundamental de la biología evolutiva moderna.

Pero cuando Luria y Delbrück realizaban sus experimentos en 1943, nadie sabía todavía de qué estaban hechas esas canicas que eran los genes, y mucho menos cuáles eran los mecanismos físicos responsables de generar mutaciones; es decir, de cambiar una canica por otra. Todo esto cambió en 1953, cuando Watson y Crick desvelaron la doble hélice. Se demostró que las canicas que eran los genes estaban hechas de ADN. Entonces el principio de que las mutaciones eran aleatorias tuvo perfecto sentido, puesto que las causas de mutación bien establecidas, como la radiación o las sustancias químicas mutagénicas, solían dañar la molécula de ADN de manera aleatoria a lo largo de toda su longitud, causando mutaciones en cualesquiera genes que afectaban, con independencia de que el cambio proporcionara o no una ventaja.

En su segundo artículo sobre la estructura del ADN, <sup>4</sup> Watson y Crick sugerían que también podía ser causa de mutación un proceso denominado tautomerización, que implica el movimiento de protones en el seno de una

molécula. Estamos seguros de que a estas alturas el lector ya será consciente de que cualquier proceso que implique el movimiento de partículas fundamentales, como los protones, puede ser de mecánica cuántica. Así pues, ¿tenía razón Schrödinger? ¿Son las mutaciones una especie de salto cuántico?

#### CODIFICAR CON PROTONES

Observe de nuevo el lector la mitad inferior de la figura 7.1. Verá que hemos dibujado el puente de hidrógeno (que, recuerde, es un protón compartido) como una línea de puntos entre dos átomos (oxígeno, O, o nitrógeno, N) en las bases emparejadas. Pero ¿acaso no es un protón una partícula? ¿Por qué razón, pues, se lo dibuja como una línea de puntos en lugar de un único punto? La razón es, desde luego, que los protones son entidades cuánticas que tienen a la vez el carácter de partícula y de onda: de modo que el protón está deslocalizado, y se comporta como una entidad embadurnada o una onda que chapotea entre las dos bases. La posición del hidrógeno en la figura 7.1 (que denota la posición más probable del protón) no está a medio camino entre las dos bases, sino que más bien está inclinada hacia un lado: más cerca de una hebra o de la otra. Esta asimetría es responsable de una característica extremadamente importante del ADN.

Pensemos en un par posible de bases, como A-T, con la A en una hebra y la T en la otra, unidas por dos puentes de hidrógeno (protones) en los que un protón está más cerca de un átomo de nitrógeno en A y el otro está más cerca de un átomo de oxígeno en T (véase figura 7.2a), lo que permite la formación del puente de hidrógeno A:T. Pero recuerde el lector que «más cerca de» es un concepto resbaladizo en el mundo cuántico, en el que las partículas no tienen posiciones fijas sino que habitan en una gama de probabilidades de estar en muchos lugares diferentes a la vez, incluidas aquellas que solo pueden alcanzarse mediante el efecto de túnel. Si los dos protones que mantienen juntas las dos letras genéticas saltaran al otro lado de sus puentes de hidrógeno respectivos, entonces cada uno terminaría más cerca de la base opuesta. Esto se traduce en la formación de formas alternativas de cada base, llamadas «tautómeros» (véase figura 7.2b). Por lo tanto, cada una de las bases del ADN puede existir en su forma canónica común, tal como se ve en la estructura de doble hélice de Watson y Crick, y en la forma tautómera, más rara, con sus protones codificadores situados en nuevas posiciones.

Pero recuérdese que los protones que forman los enlaces de hidrógeno en el

ADN son responsables de la especificidad del emparejamiento de bases que se usa para replicar el código genético. De este modo, si el par de protones codificadores se mueve (en direcciones opuestas), estará reescribiendo, en efecto, el código genético. Por ejemplo, si una letra genética en una hebra de ADN es T (timina), entonces en su forma normal se empareja, correctamente, con A. Sin embargo, si ocurre un doble cambio de protones, entonces tanto T como A adoptarán sus formas tautómeras. Desde luego, los protones pueden saltar de nuevo hasta su posición original, pero si resultan hallarse en sus formas tautómeras raras \* en el momento en el que la hebra de ADN se está copiando, entonces a las nuevas hebras de ADN pueden incorporarse las bases equivocadas. El tautómero de T puede emparejarse con G en lugar de hacerlo con A, de modo que a la nueva hebra se incorporará una G donde había una A en la hebra antigua. De manera parecida, si A se encuentra en su estado tautómero cuando se replica el ADN, entonces se emparejará con C en lugar de hacerlo con T, de modo que la nueva hebra tendrá una C allí donde la hebra antigua tenía una T (véase figura 7.3). En cada caso, las hebras de ADN acabadas de formar presentarán mutaciones: cambios en la secuencia del ADN que serán heredados por la progenie.

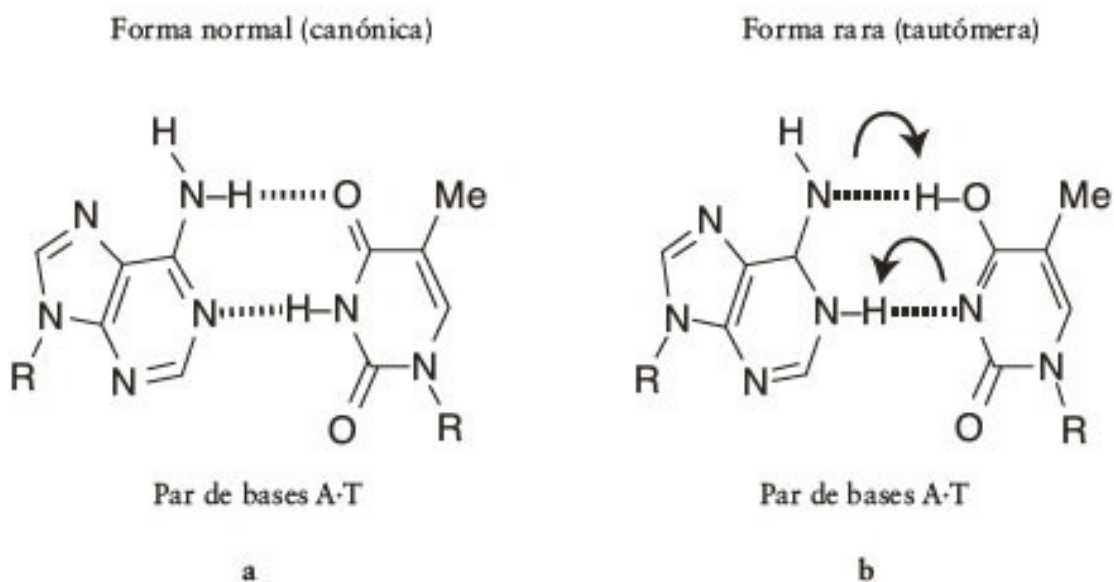


FIGURA 7.2. a) Un par de bases A-T estándar con los protones en sus posiciones normales; b) los protones emparejados han saltado a través de la doble hélice para constituir la forma tautómera de A y T.

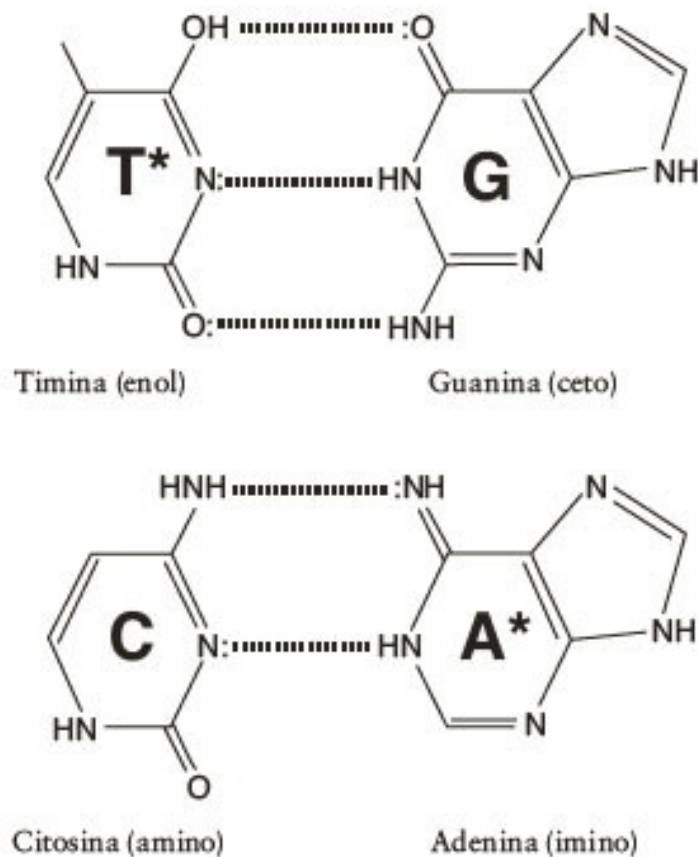


FIGURA 7.3. En su forma tautómera (enol), que se indica mediante T\* en la figura, T puede emparejarse incorrectamente con G, en lugar de hacerlo con su pareja usual, A. De manera parecida, la forma tautómera de A (A\*) puede emparejarse incorrectamente con C, en lugar de hacerlo con T. Si tales errores se incorporan durante la replicación del ADN, entonces el resultado será una mutación.

Aunque esta hipótesis es totalmente plausible, ha sido difícil encontrar pruebas directas de ella; pero, en 2011, cerca de sesenta años después de que Watson y Crick publicaran su artículo, un grupo radicado en el Centro Médico de la Universidad de Duke, en Estados Unidos, consiguió demostrar que bases de ADN emparejadas de manera incorrecta con protones en la posición tautómera pueden realmente encajar en el lugar activo de la polimerasa del ADN (el enzima que produce nuevo ADN), de modo que es probable que se incorporen a ADN acabado de replicar para causar mutaciones. <sup>5</sup>

De modo que los tautómeros (con posiciones alternativas de los protones) parecen ser uno de los motores de la mutación y, por lo tanto, de la evolución. Pero ¿qué hace que los protones se desplacen a la posición incorrecta? La posibilidad «clásica» obvia sería que de tanto en tanto los «sacuden» las



vibraciones moleculares constantes que tienen lugar a su alrededor. Sin embargo, ello requiere la disponibilidad de suficiente energía térmica para proporcionar el ímpetu, la «sacudida». Al igual que sucede con las reacciones catalizadas por enzimas que se comentaron en el capítulo 3, el protón debe superar una empinada barrera energética para hacer el movimiento. Como alternativa, los protones pueden ser arrancados de su posición por una colisión con moléculas de agua cercanas; pero no hay muchas moléculas de agua cerca de los protones codificadores en el ADN para proporcionarles este golpe.

Pero hay otra ruta que, como se descubrió, desempeñaba un papel importante en la manera en que los enzimas transfieren electrones y protones. Una de las consecuencias de la naturaleza aparentemente ondulatoria de las partículas subatómicas como electrones y protones es la posibilidad de realizar el efecto de túnel cuántico. La vaguedad en la posición de cualquier partícula le permite filtrarse a través de una barrera de energía. En el capítulo 3 vimos la manera en que los enzimas utilizan el efecto de túnel cuántico de electrones y protones al acercar entre sí las moléculas lo suficiente para que el efecto de túnel tenga lugar. Una década después de que Watson y Crick publicaran su trascendental artículo, el físico sueco Per-Olov Löwdin, al que encontramos al principio de este capítulo, propuso que el efecto de túnel cuántico podía proporcionar una manera alternativa para que los protones se desplazaran a través de los puentes de hidrógeno para generar las formas tautómeras y mutagénicas de los nucleótidos.

Es importante resaltar que las mutaciones del ADN las produce una gran variedad de mecanismos diferentes, entre ellos las lesiones causadas por sustancias químicas, partículas de desintegración radiactiva e, incluso, por rayos cósmicos. Todos estos cambios tienen lugar a un nivel molecular, y por lo tanto están destinados a implicar procesos de mecánica cuántica. Sin embargo, hasta el presente no hay ninguna indicación de que los aspectos más extraños de la mecánica cuántica tengan un papel en estas fuentes de mutación. Pero si se demuestra que el efecto de túnel cuántico está implicado en la formación de los tautómeros de las bases del ADN, entonces las rarezas cuánticas pueden estar desempeñando un papel en las mutaciones que impulsan la evolución.

Sin embargo, las formas tautómeras de las bases del ADN suponen alrededor del 0,01% de todas las bases naturales del ADN, y en potencia conducen a errores de la misma escala. Esta es una tasa mucho más alta que la tasa de mutación que encontramos en la naturaleza, del orden de una entre cien mil millones, de modo que si las bases tautómeras se hallan efectivamente presentes

en la doble hélice, entonces hay que eliminar la mayor parte de los errores resultantes. Esto lo hacen los diversos procesos de corrección de errores («revisión de texto») que contribuyen a asegurar la elevada fidelidad de la replicación del ADN. Aun así, estos errores promovidos por el efecto de túnel cuántico que se libran de la maquinaria de corrección pueden ser una fuente de las mutaciones que se presentan de manera natural y que promueven la evolución de toda la vida en la Tierra.

Descubrir los mecanismos subyacentes de la mutación no es solo importante para nuestra comprensión de la evolución, sino que también puede proporcionar atisbos de cómo surgen las enfermedades genéticas o cómo se convierten en cancerosas las células, pues ambos procesos son causados por mutaciones. Sin embargo, el problema que tiene comprobar si el efecto de túnel cuántico está implicado en las mutaciones es que, a diferencia de otras causas conocidas de mutación, como los mutágenos químicos o la radiación, el efecto de túnel cuántico no puede consistir tan solo en encenderse y apagarse. Por ello no es fácil medir tasas de mutación con y sin efecto de túnel para ver si son diferentes.

Pero puede haber una manera alternativa de detectar un origen mecánico cuántico de la mutación. Esta se remonta a la diferencia entre la información clásica y la información cuántica. La información clásica puede leerse y volver a leerse una y otra vez sin que su mensaje cambie, mientras que los sistemas cuánticos siempre resultan alterados por la medición. Así, cuando el enzima polimerasa del ADN analiza una base del ADN para determinar la posición de protones codificadores, realiza una medición cuántica, que en principio no es diferente de cuando un físico mide la posición de un protón en el laboratorio. En ambos procesos, la medición no es nunca inocua: según la mecánica cuántica, cualquier medición, ya la realice el enzima polimerasa del ADN dentro de una célula o un contador Geiger en un laboratorio, cambia inevitablemente el estado de la partícula que se está midiendo. Si el estado de dicha partícula corresponde a una letra del código genético, entonces cabría esperar que la medición, en particular la medición frecuente, cambiara dicho código y causara potencialmente una mutación. ¿Hay alguna prueba de ello?

Aunque todo nuestro genoma es copiado durante la replicación del ADN, la mayoría de las lecturas de nuestros genes no tienen lugar durante la replicación del ADN, sino durante los procesos mediante los cuales la información genética es usada para dirigir la síntesis de proteínas. El primero de estos procesos, conocido como transcripción, implica la copia de la información codificada en el ADN en ARN, un primo químico del ADN. El ARN viaja después hasta la

maquinaria de síntesis proteínica para fabricar proteínas: este es el segundo proceso, denominado traducción. Para distinguir estos procesos de la copia de información genética durante la replicación del ADN nos referiremos a ellos como lectura del ADN.

Una característica clave de este proceso es que algunos genes son leídos con mucha mayor frecuencia que otros. Si la lectura del código del ADN durante la transcripción constituye una medición cuántica, entonces cabría esperar que los genes que se leen con mayor frecuencia estuvieran sometidos a más perturbaciones inducidas por la medición, lo que conduce a tasas superiores de mutación. Esto es, en efecto, lo que se afirma que se ha encontrado en algunos estudios. Por ejemplo, Abhijit Datta y Sue Jinks-Robertson, de la Universidad de Emory, en Atlanta, Estados Unidos, manipularon un único gen en células de levadura de manera que se leía solo unas pocas veces para producir cantidades pequeñas de proteína en la célula, o muchas veces para producir grandes cantidades de proteína. Descubrieron que la tasa de mutación en el gen era treinta veces superior cuando se leía a los niveles superiores. <sup>6</sup> Un estudio similar en células de ratón encontró el mismo efecto, <sup>7</sup> y un estudio reciente de genes humanos concluía que aquellos de nuestros genes que son leídos a los niveles superiores tendían a mutar mucho más. <sup>8</sup> Esto es al menos consistente con un efecto de medición en mecánica cuántica, pero desde luego no demuestra que la mecánica cuántica se halle implicada. La lectura del ADN implica reacciones bioquímicas que pueden perturbar o lesionar la estructura molecular de los genes de muchas maneras diferentes, provocando mutaciones, sin necesidad de tener que recurrir a la mecánica cuántica.

Para comprobar si la mecánica cuántica está implicada en un proceso biológico necesitamos pruebas de que es difícil o imposible dar sentido al mismo sin la mecánica cuántica. En realidad, fue un enigma de este tipo lo que primero hizo que ambos autores nos interesáramos en el papel que la mecánica cuántica podía desempeñar en la biología.

### ¿GENES SALTARINES CUÁNTICOS?

En septiembre de 1988 se publicó en *Nature* un artículo sobre genética bacteriana <sup>9</sup> escrito por un eminentísimo genetista llamado John Cairns, que trabajaba en la facultad de Salud Pública de Harvard, en Boston. El artículo parecía contradecir aquel dogma fundamental de la teoría evolutiva neodarwinista, el principio según el cual las mutaciones, el origen de la variación

genética, se producen de manera aleatoria, y que la dirección de la evolución la proporciona la selección natural, la «supervivencia de los más aptos».

Cairns, un médico británico educado en Oxford, trabajó en Australia y Uganda antes de pasar un año sabático en 1961 en el laboratorio de Cold Spring Harbor, en el estado de Nueva York, de renombre mundial. De 1963 a 1968 fue director del laboratorio, que constituyó un semillero para la ciencia emergente de la biología molecular, en particular en las décadas de 1960 y 1970, cuando entre los científicos que trabajaban allí se contaban figuras como Salvador Luria, Max Delbrück y James Watson. Cairns había conocido efectivamente a Watson muchos años antes, cuando el bastante desaliñado futuro premio Nobel dictó una conferencia inconexa en una reunión en Oxford, y no había quedado demasiado impresionado; de hecho, la impresión general de Cairns de uno de los inmortales de la ciencia fue: «Pensé que era un completo chalado». [10](#)

Cairns realizó varios estudios fundamentales en Cold Spring Harbor. Por ejemplo, demostró que la replicación del ADN se inicia en un único punto y después se desplaza a lo largo del cromosoma, algo así como un tren que corre por la vía. También debió finalmente hacer buenas migas con James Watson, porque en 1966 editaron de manera conjunta un libro sobre el papel que desempeñaban los virus bacterianos en el desarrollo de la biología molecular. Después, en la década de 1990 se interesó por aquel estudio previo que habían hecho Luria y Delbrück y que les valió el premio Nobel, que parecía haber demostrado que las mutaciones se producen de manera aleatoria, antes de que un organismo se vea expuesto a ningún desafío ambiental. Cairns creía que había alguna inconsistencia en el diseño experimental de Luria y Delbrück, mediante el cual se suponía que habían demostrado que los mutantes bacterianos resistentes a un virus preexisten en la población, en lugar de surgir en respuesta a la exposición a los virus.

Cairns indicaba que ninguna bacteria que no fuera previamente resistente al virus habría tenido tiempo de desarrollar de forma adaptativa nuevas mutaciones en respuesta al desafío, porque los virus la habrían matado muy rápidamente. Preparó un diseño experimental alternativo que daba a las bacterias una mayor oportunidad de desarrollar mutaciones en respuesta a un desafío. En lugar de buscar mutaciones que conferían resistencia a un virus fatal, privó de nutrientes a las células y buscó mutaciones que permitieran sobrevivir y crecer a las bacterias. Como Luria y Delbrück, vio que unos pocos mutantes conseguían crecer desde el primer momento, lo que demostraba que se hallaban previamente en la población; pero, en contraste con el estudio anterior, observó muchos más

mutantes que aparecían mucho más tarde, aparentemente en respuesta a la falta de nutrientes.

El resultado de Cairns contradecía el principio bien establecido de que las mutaciones se presentaban al azar; sus experimentos parecían demostrar que las mutaciones tendían a ocurrir cuando eran ventajosas. Los hallazgos parecían respaldar la desacreditada teoría lamarckista de la evolución: a las bacterias sometidas a dieta de inanición no les crecía el cuello, como al imaginario antílope de Lamarck, sino que parecían responder a un desafío ambiental mediante la generación de modificaciones heredables: mutaciones.

Los resultados experimentales de Cairns fueron pronto confirmados por otros varios científicos. Pero el fenómeno no tenía explicación en el marco de la genética y la biología molecular contemporáneas. Sencillamente, no había mecanismo conocido alguno que permitiera que una bacteria, o de hecho cualquier organismo, eligiera qué genes mutar y cuándo. El hallazgo parecía contradecir asimismo lo que a veces se llama el dogma central de la biología molecular: el principio de que la información fluye solo en una dirección durante la transcripción, del ADN a las proteínas y de estas al ambiente de una célula o un organismo. Si los resultados de Cairns eran correctos, entonces las células también tenían que ser capaces de invertir el flujo de información genética, lo que permitiría que el ambiente influyese sobre lo que está escrito en el ADN.

La publicación del artículo de Cairns desencadenó una tormenta de controversia y una avalancha de cartas a *Nature* que intentaban dar sentido al descubrimiento. En tanto que genetista bacteriano, Johnjoe estaba profundamente desconcertado por el fenómeno de las «mutaciones adaptativas», como se las llegó a conocer. Por aquel entonces, estaba leyendo un relato divulgador de la mecánica cuántica, el popular *In Search of Schrödinger's Cat*, [11](#) de John Gribbin, y no pudo evitar considerar si la mecánica cuántica, en particular aquel enigmático proceso de la medición cuántica, podía proporcionar una explicación del resultado de Cairns. Johnjoe estaba asimismo familiarizado con la afirmación de Löwdin de que el código genético está escrito con letras cuánticas. De este modo, si Löwdin estaba en lo cierto, el genoma de las bacterias de Cairns tendría que ser considerado como un sistema cuántico. Y si esto era cierto, entonces averiguar si había una mutación presente constituiría una medición cuántica. ¿Podía acaso la influencia perturbadora de la medición cuántica proporcionar una explicación del extraño resultado de Cairns? Para explorar esta posibilidad debemos observar con más detenimiento la disposición experimental de Cairns.

Cairns había introducido millones de células de la bacteria intestinal *Escherichia coli* en la superficie de un gel en placas que contenían únicamente el azúcar lactosa como alimento. La cepa concreta de *E. coli* que Cairns usó tenía un error en uno de sus genes que la hacía incapaz de absorber lactosa, de modo que las bacterias pasaban hambre. Pero no morían; tan solo se quedaban en la superficie del gel. Lo que sorprendió a Cairns y causó todo el revuelo era que no permanecieron así durante mucho tiempo. Pasados varios días observó que aparecían colonias en la superficie del gel. Cada colonia estaba compuesta por mutantes que descendían de una única célula en la que una mutación había corregido el error en el código de ADN del gen defectuoso capaz de incorporar lactosa. Las colonias mutantes continuaron apareciendo a lo largo de varios días, hasta que finalmente las placas se secaron.

Según la teoría evolutiva estándar, tal como ejemplificaba el experimento de Luria-Delbrück, la evolución de la célula de *E. coli* tendría que haber requerido la presencia de mutantes preexistentes en la población. Algunos de ellos aparecieron realmente al inicio del experimento, pero eran demasiado pocos como para explicar las abundantes colonias comedoras de lactosa que surgieron rápidamente al cabo de unos días, después de que las bacterias fueran colocadas en el ambiente de lactosa (en el que las mutaciones podían proporcionar una ventaja adaptativa a las células; de ahí el término «mutaciones adaptativas»).

Cairns descartó las explicaciones triviales del fenómeno, como una tasa de mutación aumentada de modo general. También demostró que las mutaciones adaptativas solo aparecían en ambientes en los que la mutación proporcionaba una ventaja. Pero sus resultados no podían explicarse por la biología molecular clásica: las mutaciones habían de darse con la misma tasa, con independencia de si la lactosa estaba presente o no. Sin embargo, si, como argumentaba Löwdin, los genes son esencialmente sistemas de información cuántica, entonces la presencia de lactosa constituiría en potencia una medición cuántica, pues revelaría si el ADN de las células había mutado o no: un acontecimiento de nivel cuántico que depende de las posiciones de protones solitarios. ¿Podía la medición cuántica explicar la diferencia en las tasas de mutación que Cairns observaba?

Johnjoe decidió ofrecer sus ideas para su escrutinio en el Departamento de Física de la Universidad de Surrey. Jim estaba entre el público y, aunque escéptico, se quedó intrigado. Decidimos trabajar juntos para investigar si la idea tenía algún fundamento cuántico, y finalmente dimos con un modelo «intuitivo»

\* que propusimos que podía explicar las mutaciones adaptativas. Lo publicamos

en la revista *Biosystems* en 1999. [12](#)

El modelo se inicia a partir de la premisa de que los protones pueden comportarse de forma mecánica cuántica; así, los que se hallan en el ADN de las células de *E. coli* sin alimento, de manera ocasional presentarán efecto de túnel y pasarán a la posición tautómera (mutagénica), y con la misma facilidad podrán volver a sus posiciones originales. Desde el punto de vista de la mecánica cuántica, cabe considerar que el sistema se halla en una superposición de ambos estados, con y sin efecto de túnel, con el protón descrito por una función de onda que se extiende sobre ambos lugares, pero que es asimétrica, lo que da una probabilidad mucho mayor de encontrar al protón en la posición no mutada. Aquí no existe ningún dispositivo o aparato experimental de medición para registrar dónde se halla el protón; pero el proceso de medición que discutimos en el capítulo 4 lo realiza el ambiente circundante. Esto tiene lugar continuamente: por ejemplo, la lectura del ADN por la maquinaria de síntesis proteica obliga al protón a «decidirse» acerca de en qué lado del enlace se encuentra, ya sea en la posición normal (sin crecimiento) o en la tautómera (con crecimiento); y principalmente se encontrará en la posición normal.

Imaginemos que la placa de *E. coli* de Cairns es una caja de monedas, en que cada moneda representa el protón en la base nucleotídica clave en el gen de utilización de la lactosa. <sup>\*\*</sup> Este protón puede existir en uno de dos estados: «cara», que corresponde a la posición normal, no tautómera, y «cruz», que corresponde a la rara posición tautómera. Empezamos con todas las monedas mostrando caras, lo que corresponde al inicio del experimento con el protón en la posición no tautómera. Pero, desde el punto de vista de la mecánica cuántica, el protón se halla siempre en una superposición de las posiciones normal y tautómera, de modo que nuestras imaginarias monedas cuánticas se hallarán asimismo en una superposición de caras y cruces, con la mayoría de las probabilidades en favor del estado de cara hacia arriba, que es el normal. Pero al final el entorno inmediato del protón dentro de la célula acabará por medir su posición, y lo obligará a escoger dónde se halla, lo que podemos imaginar como una especie de lanzamiento de la moneda, con una probabilidad abrumadora de que salga cara. El ADN será copiado de manera ocasional, <sup>\*</sup> pero cualquier nueva hebra codificará solo la información genética que está allí, que casi siempre codifica solo el enzima defectuoso, de modo que la célula continuará pasando hambre.

Pero recuerde el lector que la moneda representa una partícula cuántica, un protón en la hebra del ADN; de modo que incluso después de la medición es

libre de volver al mundo cuántico para restablecer la superposición cuántica original. Así, después de haber lanzado nuestra moneda y de que haya dado cara, volverá a ser lanzada, una y otra vez. Al final dará cruz. En ese estado, el ADN puede ser copiado de nuevo, pero ahora producirá el enzima activo. En ausencia de lactosa, esto seguirá sin marcar ninguna diferencia porque, sin lactosa, el gen es inútil. La célula continuará pasando hambre.

Sin embargo, con presencia de lactosa la situación será muy diferente, porque el gen corregido que ha hecho la célula permitirá que esta consuma lactosa, crezca y se replique. Ya no será posible retornar al estado de superposición cuántica. El sistema habrá sido capturado de forma irreversible en el mundo clásico como célula mutante. Nos lo podemos imaginar como (solo en presencia de lactosa) si extrajéramos de la caja esas monedas raras que caen presentando cruz y las pusiéramos en otra caja marcada como «mutantes». En la caja original, seguiremos lanzando las monedas que quedan (las células de *E. coli*) y, siempre que aparezca una cruz, extraeremos la moneda y la transferiremos a la caja de mutantes. De manera gradual, la caja de mutantes acumulará cada vez más monedas. Si lo traducimos de nuevo al experimento, los mutantes capaces de crecer sobre lactosa aparecerán continuamente en el experimento, que es justo lo que Cairns descubrió.

Publicamos nuestro modelo en 1999, pero no consiguió muchos conversos. Sin desanimarse, Johnjoe escribió el libro *Quantum Evolution*, [13](#) en el que reclamaba un papel más amplio para la mecánica cuántica en el estudio de la biología y la evolución. Pero debemos recordar que esto sucedió antes de que se aceptara de modo general el papel del efecto de túnel de los protones en los enzimas, y la coherencia cuántica todavía no se había descubierto en la fotosíntesis, de modo que era natural que los científicos se mostraran escépticos con respecto a la idea de que en la mutación hubiera implicados extraños fenómenos cuánticos. Además, lo cierto es que pasamos por alto varias cuestiones. [14](#) Asimismo, el fenómeno de las mutaciones adaptativas se hizo «embrollado». Se descubrió que las células hambrientas de *E. coli* del experimento de Cairns subsistían a duras penas a partir de los nutrientes traza de las células muertas y moribundas, y en ocasiones se replicaban e incluso intercambiaban ADN. Empezaron a aparecer explicaciones convencionales de las mutaciones adaptativas, según las cuales se podía explicar las tasas de mutación aumentadas mediante una combinación de varios procesos: un aumento general en la tasa de mutación de todos los genes; muerte celular y liberación del ADN mutado de las células muertas y, por último, absorción



selectiva y amplificación del gen de la lactosa mutado por parte de células supervivientes que conseguían incorporarlo a su genoma. [15](#)

Sigue sin estar claro si estas explicaciones «convencionales» pueden aclarar por completo las mutaciones adaptativas. Veinticinco años después de la aparición del artículo original de Cairns, el fenómeno sigue siendo intrigante, como lo prueba la aparición continuada de artículos que investigan su mecanismo, [16](#) no solo en *E. coli* sino también en otros varios microbios. Tal como están ahora las cosas, no excluimos la posibilidad de que en las mutaciones adaptativas esté implicado el efecto de túnel cuántico; pero, por ahora, no podemos afirmar que esta sea la única explicación.

En ausencia de una fuerte necesidad para implicar a la mecánica cuántica en las mutaciones adaptativas, en fechas recientes decidimos dar un paso atrás e investigar un aspecto fundamental: ¿desempeña el efecto de túnel cuántico algún papel en la mutación? Como el lector recordará, el primero en plantear la teoría de que el efecto de túnel cuántico estaba implicado en la mutación fue Löwdin. Desde entonces lo han respaldado varios estudios teóricos, [17](#) y también estudios experimentales de lo que se llama «pares de bases modelo», que son sustancias químicas diseñadas para tener las mismas propiedades de emparejamiento de bases que las bases del ADN, pero con las que es más fácil realizar experimentos. Sin embargo, ninguna ha demostrado todavía que el efecto de túnel de los protones cause mutaciones. El problema es que tiene que competir con otras varias causas de mutaciones y mecanismos de reparación de mutaciones, lo que hace que desentrañar su papel, si es que existe, sea mucho más difícil.

Para investigar esta cuestión, Johnjoe ha extraído ideas de los experimentos con enzimas que se describieron en el capítulo 3, en los que, el lector recordará, se infería la implicación del efecto de túnel en protones después de descubrir «efectos isotópicos cinéticos». Si el efecto de túnel cuántico está implicado en la aceleración de una reacción enzimática, entonces se podría sustituir un núcleo de hidrógeno (un único protón) con un núcleo de deuterio (que consiste en un protón y un neutrón) para hacer más lenta la reacción, puesto que el efecto de túnel cuántico sería muy sensible a duplicar la masa de la partícula que intentara pasar por el túnel. Johnjoe intenta ahora una aproximación similar para la mutación, investigando si las tasas de mutación son diferentes en el agua deuterada: D<sub>2</sub>O en lugar de H<sub>2</sub>O. En el momento de escribir esto, parece que, en efecto, la sustitución cambia las tasas; pero es necesario trabajar mucho más para estar seguros de que el efecto se debe realmente al efecto de túnel cuántico,

pues la sustitución del hidrógeno por deuterio podría afectar a otros muchos procesos biomoleculares sin tener que recurrir a ninguna explicación de mecánica cuántica.

Jim se ha dedicado a investigar si el efecto de túnel cuántico de los protones en la doble hélice de ADN es factible desde el punto de vista teórico. Cuando un físico teórico aborda un problema complejo como este, intenta crear un modelo simplificado que sea tratable en términos matemáticos al tiempo que conserve lo que se piensa que son las características más importantes del sistema o proceso. Después se puede aumentar el refinamiento y la complejidad de estos modelos a medida que se añaden más detalles con el fin de acercarse cada vez más a imitar la situación real.

El modelo elegido en este caso como punto de partida para su análisis matemático puede imaginarse como una bola (que representa el protón) mantenida en su sitio mediante dos muelles fijados a paredes (véase figura 7.4), uno a cada lado, que tiran de la bola en direcciones opuestas. La bola tiende a permanecer en la posición en la que el tirón de ambos muelles es el mismo; de manera que si un muelle fuera algo más rígido (menos elástico) que el otro, entonces la bola se hallaría más cerca de la pared a la que está fijado el muelle más rígido. Sin embargo, todavía habría algo de elasticidad en este muelle, de modo que también fuera posible que la bola se instalara en una posición menos estable más cercana a la otra pared. Entonces, esto corresponde a lo que en física cuántica se denomina «doble pozo de energía potencial» y se aplica a la situación de un protón codificador en la hebra de ADN; en el esquema, el pozo de la izquierda corresponde a la posición normal del protón, mientras que el pozo de la derecha corresponde a la posición tautómera, más rara. Considerado desde el punto de vista clásico, aunque el protón se encuentre sobre todo en el pozo de la izquierda, si recibe un empujón lo bastante fuerte por parte de una fuente externa, ocasionalmente puede ser desplazado al otro lado (el tautómero). Pero siempre se encontrará en un pozo u otro. Sin embargo, la mecánica cuántica permite que el protón perfore de manera espontánea la barrera mediante el efecto de túnel cuántico, aunque no disponga de energía suficiente para salir trepando del pozo: no le es imprescindible necesariamente un golpe. Y no solo esto, sino que además el protón puede hallarse, por lo tanto, en una superposición de dos estados de posición (pozos de la izquierda y de la derecha) simultáneamente.

Desde luego, dibujar una imagen es mucho más fácil que escribir un modelo matemático que describa la situación con precisión. Para comprender el comportamiento del protón Enlace de hidrógeno necesitamos cartografiar de

manera muy precisa la forma de este pozo potencial, o superficie de energía. Este no es un asunto banal, pues su forma precisa depende de muchas variables. No solo el puente de hidrógeno forma típicamente parte de una estructura de ADN grande y compleja que consiste en cientos o incluso miles de átomos, también está inmerso en un baño caliente de moléculas de agua y otras sustancias químicas del interior de la célula. Además, las vibraciones moleculares, las fluctuaciones térmicas, las reacciones químicas iniciadas por enzimas e incluso las radiaciones ultravioleta o ionizante pueden afectar al comportamiento del enlace de ADN de forma tanto directa como indirecta.

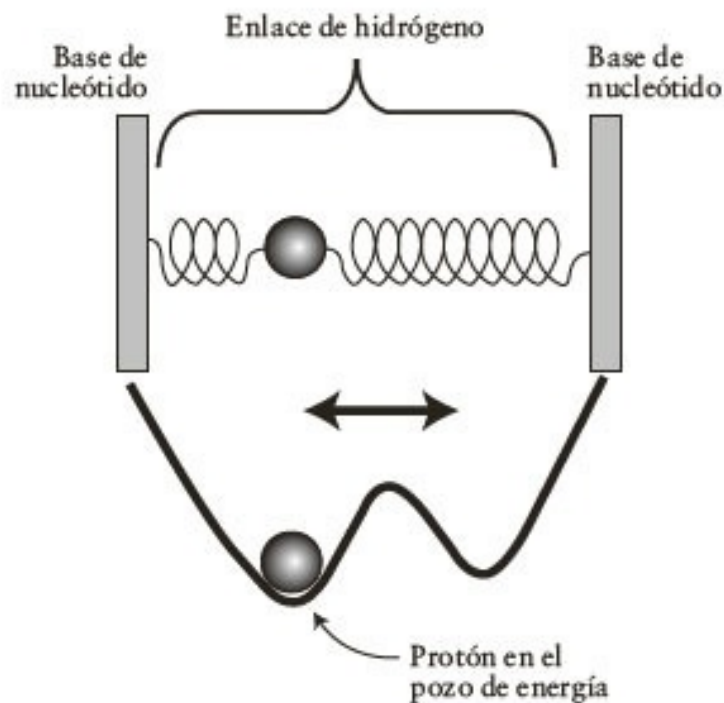


FIGURA 7.4. Podemos imaginar el protón de un enlace de hidrógeno que une dos bases de ADN conectado a dos muelles, de tal manera que puede oscilar de un lado a otro. Tiene dos posiciones estables posibles, que aquí se representan como un doble pozo de energía. El pozo de la izquierda (que corresponde a la posición no mutada) es algo más profundo que el pozo de la derecha (la posición tautómera), de modo que el protón prefiere instalarse en el de la izquierda.

Un enfoque para abordar este nivel de complejidad que ha adoptado Adam Godbeer, un estudiante de doctorado de Jim, implica el uso de una potente aproximación matemática, que ahora es popular entre físicos y químicos para modelar estructuras complejas, llamada teoría de densidad funcional (DFT). Esto permite calcular de manera muy precisa la forma del pozo de energía del puente de hidrógeno al tener en cuenta tanta información estructural del par de bases del

ADN como sea posible desde el punto de vista computacional. Piense el lector que la tarea de la DFT consiste en proporcionar un mapa de todas las fuerzas que actúan sobre el puente de hidrógeno debido a la atracción, la repulsión y el bamboleo de los átomos circundantes del ADN. Después esta información se usa para calcular la manera en que el efecto de túnel del protón se comporta a lo largo del tiempo. Una complicación añadida es que la presencia de los átomos circundantes en el ADN, y de moléculas de agua, afecta continuamente al comportamiento del protón y a su capacidad de trasladarse mediante el efecto de túnel cuántico de una hebra de ADN a la otra. Pero esta influencia constante del ambiente externo también puede incluirse asimismo en las ecuaciones de mecánica cuántica. Los cálculos de Godbeer [18](#) sugieren que, aunque es posible para los dos protones atravesar el túnel hasta sus posiciones tautómeras en el enlace A-T, la probabilidad de que lo hagan es relativamente pequeña. No obstante es necesario trabajar más los modelos informáticos. Sin embargo, lo que los modelos teóricos muestran es que la acción del ambiente circundante del interior de la célula ayuda activamente al proceso de efecto de túnel, en lugar de dificultarlo.

Entonces, ¿qué es lo que podemos conjeturar en el momento actual acerca de la conexión entre la mecánica cuántica y la genética? Hemos visto que es fundamental para la herencia, puesto que nuestro código genético está escrito en partículas cuánticas. Tal como predijo Erwin Schrödinger, genes cuánticos codifican la estructura y función clásicas de todos y cada uno de los microbios, plantas y animales que hayan vivido en la Tierra. Esto no es un accidente, ni es irrelevante, porque la copia en alta fidelidad de los genes simplemente no funcionaría si se tratara de estructuras clásicas: son demasiado pequeños para no verse afectados por las reglas cuánticas. La naturaleza cuántica de los genes permitió a aquellos microbios del lago Vostok replicar fielmente su genoma durante miles de años, de la misma manera que permitió a nuestros antepasados copiar sus genes a lo largo de los muchos millones, en realidad miles de millones, de años que se remontan hasta el alba de la vida en nuestro planeta. La vida no podría haber sobrevivido ni evolucionado en la Tierra si, hace miles de millones de años, no hubiera «descubierto» el truco de codificar información en el ámbito cuántico. \* Por otro lado, queda por ver si la mecánica cuántica desempeña un papel importante y directo en las mutaciones genéticas, esta «infidelidad» en la copia de la información genética que es tan importante para la vida.

## LA MENTE

Jean-Marie Chauvet nació en la antigua provincia francesa de Auvernia, pero cuando tenía cinco años sus padres se trasladaron al sureste, a la Ardèche, una región espectacular de ríos, desfiladeros y cañones excavados en la roca caliza subyacente. A los doce años, Jean-Marie descubrió la que habría de ser la pasión de su vida cuando él y sus amigos se pusieron por primera vez cascos de la Segunda Guerra Mundial para explorar las muchas cavernas y cuevas excavadas en las paredes de los valles de la Ardèche a lo largo de su gran río. Dejó la escuela a los catorce años, y trabajó primero como albañil, después como empleado de una ferretería y, por último, como portero. Pero, inspirado por el libro de Norbert Casteret *Ma vie souterraine*, Jean-Marie dedicó todos los fines de semana que pudo a su pasión de infancia, trepando por empinadas caras rocosas o introduciéndose en oscuras cavernas, mientras soñaba que un día sería la primera persona en posar los ojos sobre el tesoro oculto de una cueva inexplorada. «Siempre es lo desconocido lo que nos impulsa. Cuando estás recorriendo una cueva, no sabes qué vas a encontrar. ¿Terminará después del siguiente recodo, o descubrirás algo fantástico?». <sup>1</sup>

El sábado 18 de diciembre de 1994 empezó un fin de semana como cualquier otro para Jean-Marie, quien entonces tenía cuarenta y dos años, y sus dos amigos espeleólogos, Eliette Brunel-Deschamps y Christian Hillaire: deambulando por los desfiladeros en busca de algo nuevo. Cuando avanzaba la tarde y el aire se hacía más frío, decidieron explorar un área conocida como el Cirque d'Estre, que capta la magra luz solar de la tarde y así suele ser un poco más cálida que las partes abrigadas del valle en un frío día de invierno. Los amigos siguieron un antiguo sendero de mulas que serpenteaba a lo largo del acantilado, entre terrazas de encinas, boj es y brezos, con una gran vista del Pont d'Arc en la entrada del desfiladero. Mientras se movían con dificultad a través del sotobosque, advirtieron una pequeña cavidad en la roca, que medía unos veinticinco centímetros de ancho y setenta y cinco de alto.

Esto era, literalmente, una invitación abierta a los espeleólogos, y pronto se deslizaron a través de la grieta para entrar en una pequeña cámara de solo unos cuantos metros de longitud y apenas lo bastante alta para permitirles andar

erguidos. Casi de inmediato, advirtieron una leve corriente de aire procedente de la parte posterior de la cámara. Quienquiera que haya explorado cuevas estará familiarizado con la sensación de una corriente de aire cálido procedente de un túnel que no se ve. La mayoría de los pasajes ocultos son bien conocidos por los espeleólogos experimentados; lo que ocurre es que se encuentran más allá del estrecho trazo de iluminación que proporciona su linterna. Pero la corriente en aquella cámara minúscula no provenía de ninguna cueva conocida. El equipo se dedicó por turnos a mover piedras del extremo de la cámara hasta que localizaron el origen del aire: un conducto que caía en vertical hacia abajo. La más pequeña del grupo, Eliette, fue la primera en descender atada al extremo de una cuerda en la oscuridad hasta una estrecha galería por la que podía gatear. La galería se dirigía primero hacia abajo, después volvía a ascender antes de abrirse, punto en el cual Eliette pudo ver que colgaba a diez metros sobre un suelo de arcilla. Su linterna era demasiado débil para iluminar la pared distante, pero el eco que devolvió su grito desde la oscuridad le dijo que se hallaba en una cueva grande.

El grupo estaba muy emocionado, pero tenían que volver a su furgoneta, aparcada al pie del acantilado, para ir a buscar una escala. Después de volver a recorrer el camino de vuelta a la cavidad desenrollaron la escala y Jean-Marie fue el primero en alcanzar el piso de la cueva. Por cierto que era una caverna grande, al menos de cincuenta metros de alto y otros tantos de ancho, con imponentes columnas de calcita blanca. Los tres avanzaron con cuidado en medio de la oscuridad, pisando las huellas de los demás para evitar perturbar el ambiente prístino, y pasaron junto a grandes coladas y cortinas de madreperla y entre los huesos y dientes de osos muertos hacía mucho tiempo, esparcidos por antiguos nidos de hibernación excavados en el suelo de arcilla.

Cuando la luz de su linterna alcanzó la pared, Eliette dejó escapar un grito. Había visto una línea de ocre rojo que formaba el perfil de un pequeño mamut. Sin emitir palabra alguna, los amigos caminaron a lo largo de la pared, iluminando una tras otra las formas de un oso, un león, aves de presa, otro mamut, incluso un rinoceronte y unas manos humanas estarcidas. «Yo no dejaba de pensar: “Estamos soñando, estamos soñando”», recordaba Chauvet. <sup>2</sup>

Las linternas del grupo perdían potencia, de modo que volvieron sobre sus pasos, se arrastraron fuera de la cueva y regresaron en la furgoneta a la casa de Eliette para cenar con su hija, Carole. Pero sus relatos emotivos, inconexos y en gran parte incoherentes de lo que habían visto intrigaron tanto a Carole que esta insistió en que la llevaran directamente a la cueva, para poder ver por sí misma

aquellas maravillas.

Ya había oscurecido cuando volvieron a penetrar en la cueva, esta vez con linternas más potentes que revelaron todo el esplendor de su descubrimiento: varias cavernas decoradas con un maravilloso zoológico de animales: caballos, patos, un búho, leones, hienas, panteras, ciervos, mamuts, íbices y bisontes. La mayoría estaban dibujados en un maravilloso estilo naturalista, con sombreado con carbón vegetal y cabezas superpuestas para sugerir perspectiva, y en poses con un atractivo emocional real. Había una fila de caballos apacibles y pensativos, un lindo ejemplar juvenil de mamut con grandes pies redondos y un par de rinocerontes que embestían. Hay incluso un rinoceronte cuyas siete patas sugieren un movimiento de carrera.

La cueva de Chauvet, como se la conoce en la actualidad, está reconocida hoy en día como uno de los lugares de arte prehistórico más importantes del mundo. Al ser tan prístina (conserva incluso las huellas intactas de sus antiguos habitantes) permanece sellada y vigilada para preservar su delicado ambiente. El acceso está estrictamente controlado, y solo a unos pocos afortunados se les permite entrar en la cueva: uno de ellos fue el realizador cinematográfico Werner Herzog, cuyo documental *Cave of Forgotten Dreams* (2011) es lo más cerca que la mayoría de nosotros estaremos de gozar del notable arte rupestre de los cazadores de la edad del hielo que se refugiaron en estas cuevas hace treinta mil años.

Lo que queremos explorar en este capítulo no son las imágenes pintadas en las rocas, sino el enigma que tal vez evoque el título de la película de Herzog. A tenor de cualquier contemplación de las pinturas queda claro que no son meras representaciones planas de lo que había visto el ojo. A menudo se recurre a lo abstracto para conjurar la impresión de movimiento, y se utilizan protuberancias y curvas en la roca para dotar a los animales representados de una presencia casi tridimensional. \* El artista (o los artistas) no se habían limitado a pintar objetos: pintaron ideas. Los humanos que embadurnaron con pigmentos las paredes de la cueva de Chauvet eran, como nosotros, gente que pensaba acerca del mundo y de su lugar en él; eran conscientes.

Pero ¿qué es la conciencia? Esta es una pregunta que, desde luego, ha incomodado a filósofos, artistas, neurobiólogos y, de hecho, al resto de nosotros probablemente desde que hemos sido conscientes. En este capítulo adoptaremos la salida del cobarde y no plantearemos ninguna definición rígida. En realidad, somos de la opinión de que el esfuerzo para comprender este fenómeno biológico, el más extraño de todos, se ve a menudo dificultado por una



insistencia quisquillosa en buscar su definición. Los biólogos ni siquiera pueden ponerse de acuerdo en una definición única de la vida; pero esto no les ha impedido desentrañar aspectos de la célula, la doble hélice, la fotosíntesis, los enzimas y toda una caterva de otros fenómenos de la vida, entre ellos algunos impulsados por la mecánica cuántica, que ahora han revelado muchísimas cosas acerca de lo que significa estar vivo.

Hemos explorado muchas de estas revelaciones en capítulos anteriores, pero todas las que hemos discutido hasta ahora, desde las brújulas magnéticas hasta la acción enzimática, desde la fotosíntesis hasta la herencia y el olfato, pueden discutirse en términos de química y física convencionales. Aunque la mecánica cuántica puede resultar extraña, en particular desde la perspectiva de muchos biólogos, no obstante encaja por completo con el marco de referencia de la ciencia moderna. Y aunque quizá no dispongamos de una comprensión intuitiva o de sentido común de lo que ocurre en el experimento de doble rendija o en el enmarañamiento cuántico, las matemáticas que socalzan la mecánica cuántica son precisas, lógicas e increíblemente potentes.

Pero la conciencia es diferente. Nadie sabe dónde o cómo encaja en el tipo de ciencia del que hemos tratado hasta aquí. No hay ecuaciones matemáticas (respetables) que incluyan el término conciencia, y a diferencia, pongamos por caso, de la catálisis o el transporte de energía, hasta ahora no se ha descubierto en nada que no esté vivo. ¿Es una propiedad de toda la vida? La mayoría de la gente pensaría que no, y reservaría la conciencia para aquellos animales que poseen sistema nervioso; pero, entonces, ¿cuánto sistema nervioso es necesario? ¿Acaso los peces payaso añoran el arrecife que es su hogar? Nuestro petirrojo, ¿sentía realmente un deseo de volar hacia el sur en invierno, o acaso iba con el piloto automático, como un dron? La mayoría de los dueños de animales domésticos están convencidos de que sus perros, gatos o caballos son conscientes; así pues, ¿surgió la conciencia en los mamíferos? Muchas personas que tienen en casa canarios o periquitos están asimismo seguras de que sus mascotas tienen su propia personalidad y son tan conscientes como los gatos que los persiguen. Pero si la conciencia es común a las aves y los mamíferos, entonces tal vez ambos grupos heredaron esta propiedad de un antepasado común consciente, quizás algo parecido a los reptiles primitivos que vivieron hace más de trescientos millones de años y que parecen ser los antepasados de aves, mamíferos y dinosaurios, que llamamos amniotas. \* Por lo tanto, ¿acaso el *Tyrannosaurus rex* que conocimos en el capítulo 3 experimentaba miedo mientras se hundía en el pantano del Triásico? ¿Y son realmente conscientes los



animales más primitivos? Muchos poseedores de acuarios insistirán en que los peces y moluscos, como los pulpos, son conscientes; pero para encontrar un antepasado de todos estos grupos hemos de remontarnos a la aparición de los vertebrados en el período Cámbrico, hace quinientos millones de años. ¿Es la conciencia realmente tan antigua?

Desde luego, no lo sabemos. Incluso los dueños de mascotas emiten solo suposiciones, puesto que nadie sabe realmente cómo distinguir el comportamiento parecido al humano de la verdadera conciencia. Sin saber lo que es la conciencia, nunca podremos saber qué seres vivos poseen esta propiedad. De modo que nuestra ingenua aproximación será evitar estos argumentos y debates y permanecer totalmente agnósticos con respecto a cuestiones como cuándo apareció la conciencia en nuestro planeta, o cuáles de nuestros parientes en el reino animal son conscientes de sí mismos. Como punto de partida insistimos en que aquellos de nuestros antepasados que pintaron las ideas de osos, bisontes o caballos salvajes en las paredes de cuevas antiguas eran definitivamente conscientes. Así, en algún momento entre hace unos tres mil millones de años, cuando los microbios surgieron por primera vez del fango primigenio, y hace unas decenas de miles de años, cuando estos primeros humanos modernos decoraron cuevas con impresiones de animales, apareció una extraña propiedad en la materia de la que están compuestos los organismos vivos: parte de dicha materia se hizo consciente. Nuestro objetivo en este capítulo será considerar cómo y por qué ocurrió esto. Examinar la polémica sugerencia de que la mecánica cuántica desempeñó un papel clave en la aparición de la conciencia.

Primero, en el espíritu de los capítulos anteriores, plantearemos la pregunta de si necesitamos recurrir a la mecánica cuántica con el fin de explicar este fenómeno humano, el más misterioso de todos. Ciertamente, no basta adoptar con la tesis, como algunos han hecho, de que la conciencia es misteriosa y difícil de determinar, y que la mecánica cuántica es misteriosa y difícil de determinar, y por lo tanto es seguro que ambas deben estar conectadas de alguna manera.

#### ¿CUÁN RARA ES LA CONCIENCIA?

Quizás el hecho más raro que conocemos del universo es que sabemos mucho acerca de él, debido a una propiedad extraordinaria que poseen aquellas partes del universo que están encerradas dentro de nuestro propio cráneo: nuestra mente consciente. Esto es, en efecto, muy extraño, y sobre todo porque la

función de esta rara propiedad no es en absoluto clara.

Los filósofos suelen indagar acerca de esta cuestión imaginando la existencia de zombis. Estos funcionan igual que los seres humanos que se dedican a sus actividades, pintan las paredes de cuevas o leen libros, pero sin ninguna vida interior; dentro de su cabeza no ocurre nada excepto cálculos mecánicos que impulsan el movimiento de sus extremidades o las funciones motoras que animan su lenguaje. Los zombis son autómatas, sin conciencia ni sentido de la experiencia. El que estos seres sean al menos una posibilidad teórica lo hace evidente el hecho de que muchas de nuestras acciones, como andar, ir en bicicleta o los movimientos necesarios para tocar un instrumento musical familiar pueden realizarse de manera inconsciente (en el sentido de que nuestra mente consciente puede hallarse en otro lugar cuando realizamos dichas tareas), sin necesidad de percatarnos o recordar la experiencia previa. En realidad, cuando pensamos en ellos, nuestro desempeño en estas actividades, paradójicamente, se ve dificultado. Parece que la conciencia es prescindible; al menos, para estas acciones. Pero si existen actividades que pueden ejecutarse sin conciencia, ¿sería al menos posible imaginar un animal que ejecutara todas las actividades humanas en piloto automático?

Parece que no. Hay algunas actividades para las que la conciencia parece ser indispensable, como el lenguaje natural. Es muy difícil imaginar que se pueda mantener una conversación en piloto automático. También nos sería muy difícil realizar un cálculo complicado de manera automática o resolver un crucigrama. No podemos imaginar que nuestra artista de la Edad del Hielo (supondremos arbitrariamente que nuestro pintor era una hembra) hubiera sido capaz de pintar un bisonte sin nada más que la pared de una cueva frente a ella, si no fuera consciente. Lo que todas estas actividades necesariamente conscientes tienen en común es que son impulsadas por «ideas», como la idea que hay detrás de una palabra, la solución a un problema, o la comprensión de lo que un bisonte es y de lo que significa para las gentes de la Edad de Piedra. De hecho, las paredes de la cueva de Chauvet proporcionan muchas pruebas para esta aplicación de las ideas, como la más potente: poner varias ideas juntas para formar un concepto nuevo. Una roca inclinada, por ejemplo, está pintada con una figura imposible que posee la parte superior del cuerpo de un bisonte pero una parte inferior humana. Un objeto así solo pudo haber sido creado en una mente consciente.

¿Qué son, pues, las ideas? Para nuestro propósito, supondremos que las ideas representan información compleja que se conecta en nuestra mente consciente para formar conceptos que tienen significado para nosotros, como qué

significaba la imagen de la pared de la cueva de Chauvet (medio hombre, medio bisonte) para las gentes que habitaban estas cuevas. Esta manera de comprimir información compleja en una idea singular se mencionaba en la descripción, atribuida a Mozart, de cómo toda una composición musical podría estar «acabada en mi cabeza aunque fuera larga. Entonces mi mente la capta de una mirada. [...] No aparece de manera sucesiva, con las diversas partes trabajadas en detalle, como lo serán posteriormente, sino en su totalidad». <sup>3</sup> La mente consciente es capaz de «captar» información compleja «con las diversas partes», de modo que su significado pueda entenderse «en su totalidad». La conciencia permite que lo que accione nuestra mente sean las ideas y conceptos, y no los meros estímulos.

Pero ¿cómo queda incorporada toda la compleja información neuronal en nuestra mente consciente para formar una idea? Esta cuestión es un aspecto del primer enigma de la conciencia, lo que a menudo se denomina el problema de la integración: ¿cómo se une la información codificada en regiones dispares de nuestro cerebro en nuestra mente consciente? Por lo general, el problema de la integración se formula en términos de información visual o de otros sentidos. Recuerde el lector, por ejemplo, la evocadora descripción que Luca Turin hacía del aroma del perfume Nombre Noir de Shiseido: «Estaba a medio camino entre una rosa y una violeta, pero sin traza alguna de la dulzura de ninguna de las dos, y en cambio el fondo era de unas notas austeras, casi santas, de cedro de caja de cigarros». Turin no experimentaba el perfume como una mezcla de olores distintos cada uno de ellos asociado con el disparo de su particular neurona olfativa receptora, sino como un único aroma con una gama de notas y tonos evocativos subyacentes, que incluían el significado de toda una serie de conceptos accesorios, como cigarros y violetas. De forma parecida, las imágenes y los sonidos no se experimentan como proporciones distintas de colores, texturas o notas, sino como impresiones sensoriales, recuerdos y conceptos integrados de, por ejemplo, un bisonte, un árbol o una persona.

Imaginemos a nuestra artista del Paleolítico mientras observa un bisonte real. Sus ojos, nariz, oídos y, si se trataba de un bisonte muerto, los receptores del tacto en sus dedos habrían captado una multitud de impresiones sensoriales del animal, entre ellas su olor, forma, color, textura, movimiento y sonido. En el capítulo 5 vimos cómo nuestro sentido del olfato capta los olores. El lector recordará que las moléculas odorantes que se unen a cada neurona olfativa hacen que el nervio «dispare», lo que significa que envía una señal eléctrica a lo largo de su axón (el extremo en forma de mango de escoba de la célula), que va desde

el epitelio olfativo en la parte posterior de la nariz hasta el bulbo olfativo en el cerebro. Más adelante en el capítulo exploraremos los detalles de este proceso de disparo, porque es clave para comprender la implicación potencial de la mecánica cuántica en nuestros pensamientos. Sin embargo, por ahora imaginaremos que el viento arrastra una molécula odorante de bovino desde nuestro bisonte hasta el interior de la nariz de nuestra artista, donde se une a un receptor olfativo y desencadena una sarta de pulsos eléctricos que recorren el axón, que parece un alambre, algo así como una señal telegráfica pero que solo contiene puntos, blips o parpadeos, en lugar de los puntos y rayas de los telegramas.

Una vez que la señal del nervio olfativo llegó al cerebro de nuestra artista, desencadenó el disparo (más parpadeos) de muchos más nervios eferentes; la señal del parpadeo saltó de un nervio a otro, y cada nervio actuó como una especie de estación repetidora de telégrafos. Otros datos sensoriales se captaron de manera parecida en forma de señales de parpadeo. Por ejemplo, los bastones y los conos (neuronas especialistas como las neuronas olfativas, pero que no responden a los odorantes sino a la luz) que tapizan la retina de sus ojos habrían enviado trenes de señales de parpadeo a lo largo de los nervios ópticos hasta la corteza visual de su cerebro. Y de la misma manera que las neuronas olfativas respondieron a moléculas de odorante individuales, los nervios ópticos tan solo respondieron a determinados rasgos de una imagen que cayó sobre su retina: algunos habrían respondido a un color o tono de gris concretos, y otros, a bordes o líneas o texturas particulares. Los nervios auditivos de su oído interno respondieron de forma similar al sonido, quizá la respiración pesada de un bisonte alanceado; y el tacto de su piel lo habrían captado los nervios mecanosensibles de la piel. En todos estos ejemplos, cada neurona sensorial habría respondido solo a determinadas características de la entrada sensorial. Por ejemplo, una neurona auditiva concreta solo habría disparado si el sonido que entraba en los oídos de la artista incluía una determinada frecuencia. Pero, fuera cual fuera su origen, la señal generada por cada nervio habría sido precisamente la misma: un pulso de parpadeos eléctricos que se desplazaban desde el órgano sensorial hasta regiones especializadas del cerebro de la artista. Allí, aquellas señales pudieron haber desencadenado respuestas motrices inmediatas; pero también pudieron haber modificado la conectividad entre neuronas para establecer una memoria de sus observaciones a través del principio según el cual las «neuronas que disparan juntas se conectan entre sí», en el que parece basarse la manera en que los recuerdos se codifican en el cerebro.

Lo más importante aquí es que no hay ningún lugar en los más o menos cien mil millones de neuronas de un cerebro humano donde esta vasta corriente de parpadeos se una para formar la impresión consciente de un bisonte. En realidad, corriente no es el término adecuado aquí, porque sugiere una acumulación de la información en dicha corriente, y esto no es lo que ocurre en las neuronas. Por el contrario, cada señal nerviosa permanece encerrada en un nervio individual. Así, en lugar de una corriente, hemos de pensar en la información que viaja a través del cerebro como secuencias de señales de blip, blip, blip, blip... que transitan a lo largo de hebras de una inmensa maraña de billones de conexiones entre cien mil millones de neuronas. El problema de la integración es el problema de comprender cómo toda la información dispar codificada en blips genera la percepción unificada de un bisonte.

Y no son solo las impresiones sensoriales las que necesitan integrarse. La materia prima de la conciencia no son los datos sensoriales desprovistos de contexto, sino los conceptos con significado (en el caso de un bisonte, peludo, apastoso, aterrador o magnífico), cada uno de los cuales está cargado con gran cantidad de información compleja. Todo este bagaje adicional tiene que haber sido integrado con las impresiones sensoriales que proporcionan la impresión de un bisonte peludo, apastoso y aterrador pero magnífico que nuestra artista del Paleolítico pudo haber recordado cuando lo reprodujo en trazos de pigmento. <sup>4</sup>

Formular el problema de la integración en términos de ideas, en lugar de impresiones sensoriales, nos lleva al meollo del problema de la conciencia, que es el enigma de cómo las ideas pueden mover mentes y, de esa manera, cuerpos. Nunca sabremos qué es lo que había exactamente en la mente de nuestra artista de la Edad de Piedra que provocó que aplicara pigmento a la piedra. Quizá pensaba que la forma de un bisonte alegraría un rincón oscuro; o quizá creyera que pintar al animal mejoraría las probabilidades de éxito de sus compañeros cazadores. Pero de lo que podemos estar seguros es de que la artista habría creído que la decisión de pintar el bisonte era idea suya.

Pero ¿cómo puede una idea mover la materia? Considerado como un objeto totalmente clásico, el cerebro recibe información a través de una de las entradas sensoriales y después procesa dicha información para generar salidas, exactamente igual que un ordenador (o un zombi). Pero ¿dónde, en esta maraña de blips, se halla nuestra mente consciente, este sentido del «yo» que, estamos convencidos, impulsa nuestras acciones voluntarias? ¿Qué es exactamente esta conciencia y cómo interactúa con la materia de nuestro cerebro para mover nuestros brazos, piernas o lengua? Lo cierto es que la conciencia (o el libre

albedrío) no figura en un universo completamente determinista, porque las leyes de la causalidad solo permiten una cosa después de otra en una cadena interminable de causa y efecto que se extiende desde aquella cueva de Chauvet directamente hasta el Gran Estallido.

Jean-Marie describe el momento en el que él y sus compañeros pusieron por primera vez la vista en las pinturas de la cueva de Chauvet: «Nos agobiaba la sensación de que no estábamos solos; las almas y espíritus de los artistas nos rodeaban. Creíamos poder sentir su presencia». <sup>5</sup> Era evidente que los espeleólogos vivían una experiencia profunda, que algunos calificarían de espiritual. Cuando miramos el interior del cráneo de un humano o de un animal, todo lo que encontramos es tejido blando y húmedo, no muy distinto de la materia de un chuletón de bison. Pero cuando este material se halla dentro de nuestro propio cráneo, es consciente y tiene experiencias, conceptos que no parecen existir en absoluto en el mundo material. Y, de alguna manera, esta sustancia etérea de conciencia y experiencia (nuestra mente consciente) impulsa a la sustancia material de nuestro cerebro a que cause nuestras acciones... o, al menos, esta es nuestra impresión. Este enigma, que ha recibido diversos nombres, como el problema mente-cuerpo o el problema duro de la conciencia, es seguramente el misterio más profundo de toda nuestra existencia.

En este capítulo preguntaremos si la mecánica cuántica puede proporcionar algunas respuestas a este misterio profundo. Desde buen comienzo destacaremos que cualquier idea acerca de la conciencia sigue siendo de naturaleza muy especulativa, puesto que nadie conoce realmente qué es o cómo funciona. Ni siquiera existe un consenso entre los neurocientíficos, psicólogos, informáticos e investigadores de la inteligencia artificial de que haya una necesidad de algo más allá de la mera complejidad del cerebro humano para explicar la conciencia.

Nuestro punto de partida serán los procesos cerebrales que condujeron a que se imprimiera la forma de un bison en la caliza de la Ardèche.

## LA MECÁNICA DEL PENSAMIENTO

En este apartado seguiremos la cadena causal en sentido inverso desde la aparición de una línea de ocre rojo sobre la pared de una cueva hace treinta mil años. Esto nos llevará a los músculos que se contraen en el brazo de la pintora que dibujó aquella línea, después a los impulsos nerviosos que causaron que los músculos se contrajeran, y previamente a los impulsos cerebrales que dispararon aquellos nervios y las entradas sensoriales que pusieron en marcha la cadena de

acontecimientos. Nuestro objetivo es intentar esclarecer en qué punto de esta cadena causal entra la conciencia, de modo que podamos investigar a continuación si la mecánica cuántica pudo haber intervenido de alguna manera en este acontecimiento.

Podemos imaginar la escena hace algunos milenios, cuando una artista desconocida, vestida quizá con pieles de oso, fijó su mirada en las tinieblas de la cueva de Chauvet. Las pinturas se descubrieron cueva adentro, de manera que la pintora tuvo que haber portado una antorcha, junto con los cuencos de pigmento, al interior de la cueva. Después, en algún momento, la pintora mojó un dedo en el cuenco de carbón vegetal coloreado y embadurnó el pigmento sobre la pared para crear el perfil de un bisonte.

El movimiento del brazo de la pintora sobre la pared de la cueva lo inició una proteína muscular llamada miosina. Esta es un enzima que usa energía química para impulsar la contracción de los músculos, y provoca en esencia que las fibras musculares se deslicen unas sobre otras. Los detalles de este mecanismo de contracción los han establecido cientos de científicos a lo largo de varias décadas, y es un ejemplo notable de ingeniería y dinámica biológicas a nanoescala. Pero en este capítulo pasaremos por alto los fascinantes detalles moleculares de la contracción muscular para centrarnos en cómo pudo algo tan efímero como una idea hacer que los músculos se contrajeran (véase figura 8.1).

La respuesta inmediata es que no lo hizo. La contracción de las fibras musculares de la artista se desencadenó, en realidad, cuando unos iones sodio, cargados positivamente, se precipitaron dentro de sus células musculares. Estas tienen más iones sodio en el exterior de su membrana que en su interior, lo que origina una diferencia de voltaje a través de la membrana, como si de una minúscula batería se tratara. Sin embargo, en estas membranas hay poros, llamados canales iónicos, que, si están abiertos, permiten que los iones sodio penetren en la célula. Fue este proceso de descarga eléctrica lo que desencadenó la contracción muscular de la artista.

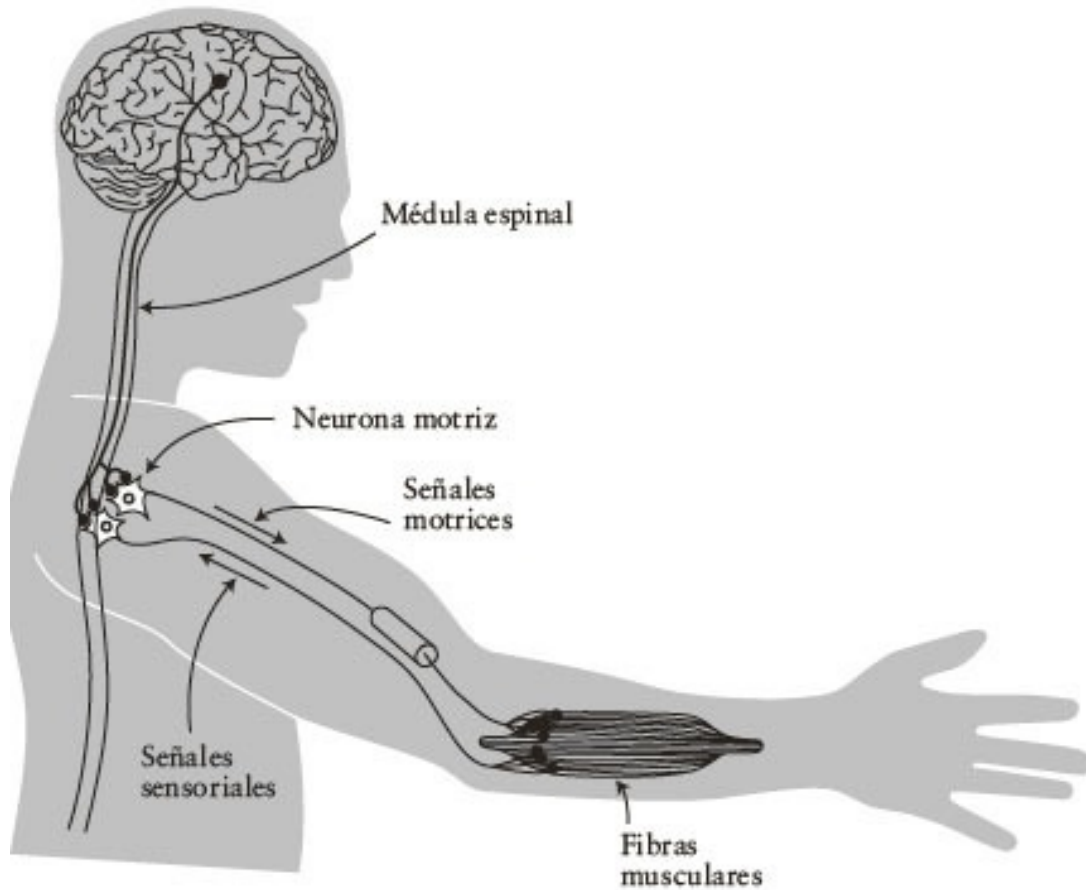


FIGURA 8.1. Las señales nerviosas se desplazan desde el cerebro y por la médula espinal hasta alcanzar las fibras musculares, y hacen que el músculo se contraiga y de esta manera mueva una extremidad, como, por ejemplo, el brazo.

El segundo paso hacia atrás en nuestra cadena de causación se basa en la siguiente pregunta: ¿qué hizo que estos canales iónicos del músculo se abrieran en aquel momento? La respuesta es que los nervios motores fijados a los músculos del brazo de la artista liberaron sustancias químicas llamadas neurotransmisores que hicieron que se abrieran los canales iónicos. Pero ¿qué hizo que estos nervios motores liberaran su paquete de neurotransmisores? Las terminaciones nerviosas liberan neurotransmisores siempre que les llega una señal eléctrica llamada potencial de acción (véase figura 8.2). Los potenciales de acción son fundamentales para todo el sistema de señales de los nervios, de modo que es necesario que miremos con mayor detenimiento cómo funcionan.

Una célula nerviosa, o neurona, es una célula muy larga, delgada y serpentiforme que consta de tres partes. En su extremo anterior hay un cuerpo celular con aspecto de araña, que es donde se inicia el potencial de acción. Después, este se desplaza a lo largo de la delgada sección media, llamada axón



(el «mango de la escoba» de una neurona olfativa), hasta el extremo posterior del nervio, donde se liberan las moléculas de los neurotransmisores (véase figura 8.2). Aunque el axón nervioso tiene un aspecto que recuerda a un minúsculo cable eléctrico, la manera en que transmite su señal eléctrica es mucho más ingeniosa que el proceso por el que un simple flujo de electrones cargados negativamente atraviesa un alambre de cobre.

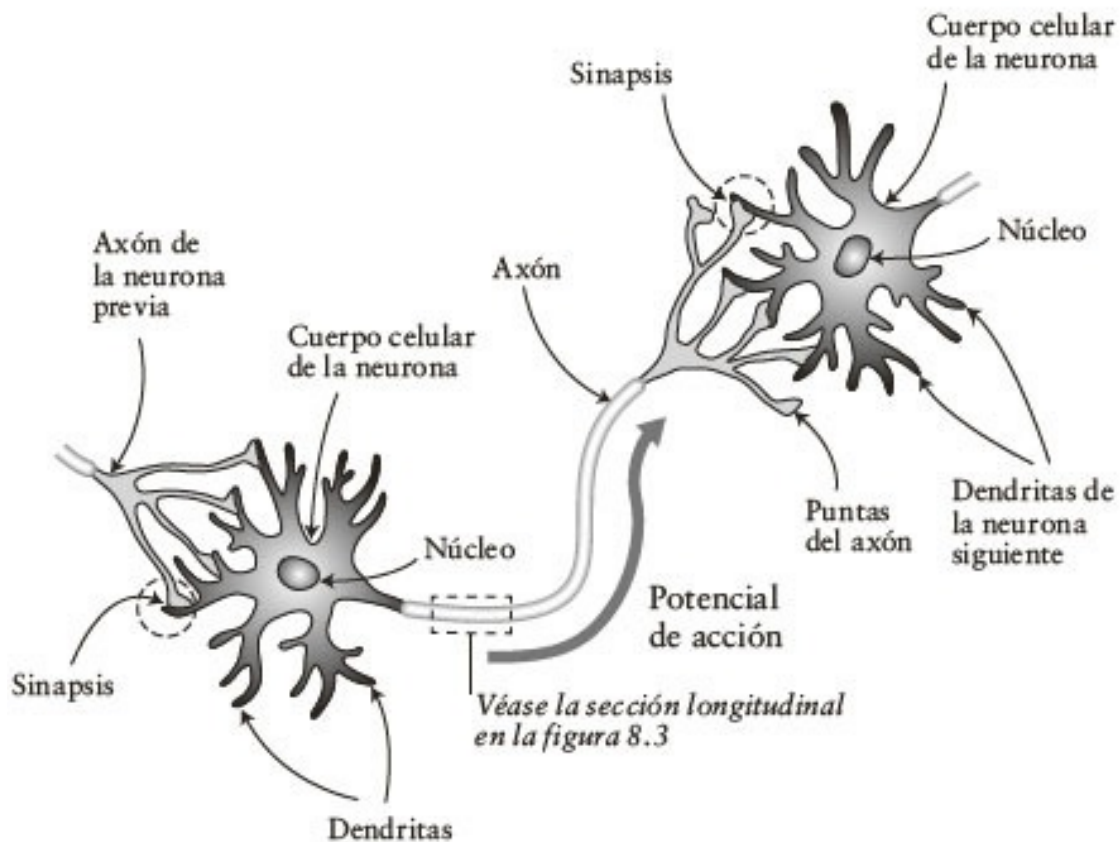


FIGURA 8.2. Los nervios emiten señales eléctricas desde el cuerpo celular a lo largo del axón y hasta la terminal del nervio, donde pueden provocar la liberación de un neurotransmisor en una sinapsis. El neurotransmisor es captado por el cuerpo celular de una neurona situada a continuación, lo que hace que esta se excite y, por lo tanto, transmita la señal nerviosa de una neurona a la siguiente.

La célula nerviosa, al igual que una célula muscular, suele tener más iones sodio con carga positiva en el exterior que en el interior. Esta diferencia la mantienen bombas que impulsan a los iones sodio fuera de la célula a través de la membrana de la neurona. El exceso de cargas positivas externas proporciona una diferencia de voltaje a través de la membrana celular de alrededor de una centésima de voltio. Aunque esto no parece ser gran cosa, el lector recordará que las membranas celulares tienen solo unos pocos nanómetros de espesor, de

manera que se trata de un voltaje a través de una distancia muy corta. Esto significa que tenemos un gradiente eléctrico (que es lo que en realidad es el voltaje) a través de la membrana celular de un millón de voltios por metro. Esto equivale a unos apabullantes diez mil voltios a través de un hueco de un centímetro, y es casi suficiente para crear una chispa, como la que es necesaria en la bujía de nuestro automóvil para prender el combustible.

El extremo anterior del nervio motor de la artista, el cuerpo de la neurona, está conectado a un grupo de estructuras denominadas sinapsis (véase figura 8.2), que son algo así como cajas de conexión entre nervio y nervio. Los nervios aferentes liberan moléculas de neurotransmisores en estas conexiones al igual que los neurotransmisores son liberados en las conexiones nervio-músculo; esto dispara la abertura de canales iónicos en la membrana que rodea el cuerpo de la neurona, con lo que se permite que iones con carga positiva entren en su interior, lo que provoca que el voltaje se reduzca mucho.

La mayoría de las caídas de voltaje causadas por la abertura de unos cuantos canales iónicos en una sinapsis tendrán poco efecto, o ninguno. Pero si llega gran cantidad de neurotransmisores, entonces se abrirán muchos canales iónicos. La subsiguiente entrada de iones positivos en la célula hace que el voltaje de su membrana caiga por debajo de un umbral crítico de alrededor de  $-0,04$  voltios. Cuando esto ocurre, entra en juego otro conjunto de canales iónicos en los nervios. Estos son los canales iónicos accionados según el voltaje, lo que significa que son sensibles, no a los neurotransmisores, sino a la diferencia de voltaje a través de la membrana. En el ejemplo de nuestra artista, cuando el voltaje en el cuerpo celular cayó por debajo del umbral crítico, un grupo numeroso de estos canales se abrió para permitir que más iones se precipitaran al interior del nervio, con lo que cortocircuitaron todavía más su área de membrana. La consiguiente caída de voltaje provocó que se abrieran más canales iónicos accionados en función del voltaje, dejando que más iones entraran dentro de la célula, lo que hizo que se cortocircuitara una extensión mayor de la membrana. El largo cable del nervio, el axón, está tapizado de estos canales accionados según el voltaje, de modo que, cuando se inició el cortocircuito en el cuerpo celular, desencadenó una especie de efecto dominó de cortocircuitos de la membrana (el potencial de acción) que viajó rápidamente a lo largo del nervio hasta que alcanzó la terminación nerviosa (véase figura 8.3). Una vez allí estimuló la liberación del neurotransmisor en la conexión neuromuscular, lo que hizo que el músculo del brazo de nuestra artista se contrajera para trazar la línea de un bisonte en la pared de la cueva (véase figura 8.1).

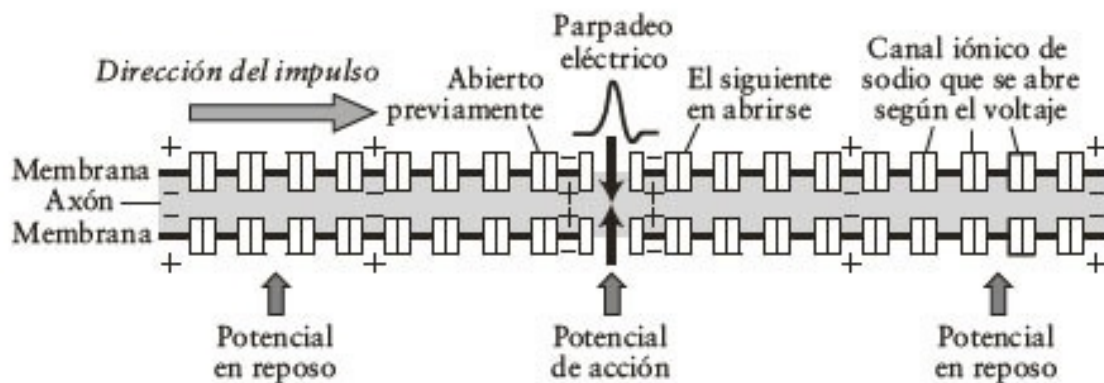


FIGURA 8.3. Los potenciales de acción se desplazan a lo largo de los axones nerviosos mediante la acción de canales iónicos, que se abren en función del voltaje, en las membranas de las neuronas. En su estado de reposo, la membrana tiene más iones positivos en el exterior que en el interior. Sin embargo, un cambio en el voltaje causado por un potencial de acción aferente desencadenará la abertura de los canales iónicos y una oleada de iones sodio con carga positiva (un potencial de acción) entrará en la célula e invertirá de manera temporal el voltaje de la membrana. Este parpadeo eléctrico disparará la apertura de los canales iónicos corriente abajo en una especie de impulso eléctrico de efecto dominó que se desplaza a lo largo del nervio hasta que alcanza el extremo de este, donde desencadena la liberación del neurotransmisor. Una vez que el potencial de acción ha pasado, las bombas iónicas hacen que la membrana retorne a su estado normal de reposo.

A partir de esta descripción, el lector puede ver lo diferentes que son las señales nerviosas de una señal eléctrica que se desplaza a lo largo de un cable. Para empezar, la corriente, el movimiento de cargas, no se produce a lo largo de los cables nerviosos en la dirección de la señal nerviosa, sino que es perpendicular a la dirección del potencial de acción: de fuera a dentro, a través de aquellos canales iónicos de la membrana celular. Asimismo, justo después de iniciarse el potencial de acción por la abertura de los primeros canales iónicos, estos se cierran de golpe y las bombas iónicas se ponen a trabajar para restablecer el voltaje inicial de la batería a través de la membrana. Así pues, otra manera de ver la señal nerviosa es como una oleada de puertas iónicas de la membrana que se abren y se cierran, que se desplaza desde el cuerpo celular hasta la terminación nerviosa: un parpadeo eléctrico en movimiento.

Las conexiones nervio-nervio para la mayoría de las células motoras están situadas en la médula espinal, donde reciben señales neurotransmisoras procedentes de cientos o incluso miles de nervios aferentes (véase figura 8.1). Algunos nervios aferentes liberan neurotransmisores en la caja de conexiones (sinapsis) que abre canales iónicos en el cuerpo celular para aumentar la probabilidad de disparar el nervio motor, mientras otros tienden a cerrarlos. De

esta manera, el cuerpo celular de cada neurona parece actuar como la compuerta lógica de un ordenador, y genera una salida (tanto si dispara como si no lo hace) basada en sus entradas. Así, si la neurona es como una compuerta lógica, entonces se puede pensar en el cerebro, compuesto por miles de millones de neuronas, como una especie de ordenador; o, al menos, esta es la suposición de la mayoría de los neurocientíficos cognitivos que están de acuerdo en lo que se ha llamado la teoría computacional de la mente.

Pero hemos dado un salto demasiado grande hacia delante: todavía no hemos alcanzado el cerebro. El nervio motor de nuestra artista tuvo que haber recibido gran cantidad de neurotransmisores en sus cajas de conexión nervio-nervio, haciendo que aquel disparara. Esas entradas procedían de nervios aferentes que en su mayoría se originaron en su cerebro. Siguiendo en sentido inverso la cadena de causación, las cabezas de aquellos nervios habrían tomado sus decisiones acerca de si disparaban o no sobre la base de sus muchas entradas, y de las entradas de aquellas entradas, y así sucesivamente hacia atrás siguiendo la cadena causal hasta que alcanzamos los nervios que recibieron señales de entrada procedentes de los ojos, oídos, nariz y receptores del tacto de la artista, así como de los centros de memoria que habrían recibido entradas sensoriales de sus observaciones previas de bisontes vivos y muertos. Entre las entradas sensoriales y las salidas motrices está la red neural del cerebro que realizó los cálculos que dictaron la decisión para generar, o no generar, las salidas motrices precisas necesarias para dibujar el perfil de un bisonte.

De modo que ya la tenemos: toda la cadena de sucesos que condujeron a aquella contracción muscular que hizo que el brazo de la artista se moviera sobre la pared. Pero ¿acaso nos hemos dejado algo? Lo que hemos descrito hasta ahora es una cadena causal meramente mecanicista, desde la entrada sensorial hasta la salida motriz, con parte de la información canalizada a través de centros de memoria. Este es el tipo de mecanismo del que Descartes hablaba cuando hizo la afirmación (que se comentó en el capítulo 2) de que los animales son simples máquinas; todo lo que hemos hecho ha sido sustituir sus poleas y palancas por nervios, músculos y compuertas lógicas.

Pero recuérdese que Descartes reservó un papel para una entidad espiritual, el alma, como motor último de las acciones humanas. ¿Dónde está el alma en esta cadena de acontecimientos de entradas y salidas? Hasta aquí solo hemos descrito una artista zombi. ¿Dónde su conciencia, su idea de que tenía que representar un bisonte significativo en la pared de la cueva entra en esta cadena de acontecimientos de entradas y salidas? Este sigue siendo el mayor de los

enigmas de la ciencia del cerebro.

#### CÓMO LA MENTE MUEVE LA MATERIA

De uno u otro modo, la mayoría de la gente suscribe probablemente la idea del dualismo, la creencia de que la mente/ alma/conciencia es una cosa distinta del cuerpo físico. Pero el dualismo perdió partidarios en los círculos científicos en el siglo xx , y en la actualidad la mayoría de los científicos prefieren la idea de monismo: la creencia de que la mente y el cuerpo son la misma cosa. Por ejemplo, el neurocientífico Marcel Kinsbourne afirma que «ser consciente equivale a tener los circuitos neurales en estados funcionales interactivos concretos». <sup>6</sup> Pero las compuertas lógicas de un ordenador son, como ya hemos indicado, bastante parecidas a las neuronas, de modo que no está claro por qué ordenadores muy conectados, como la Red Informática Mundial (World Wide Web), con sus mil millones, aproximadamente, de usuarios de internet (aunque todavía es pequeña, comparada con los cien mil millones de neuronas del cerebro), no muestran señales de conciencia. ¿Por qué los ordenadores basados en el silicio son zombis, mientras que los ordenadores basados en la carne son conscientes? ¿Se trata simplemente de una cuestión de complejidad y de la mera «capacidad de interconexión» de las células de nuestro cerebro, que todavía no tiene parangón en la Red Informática Mundial, <sup>\*</sup> o es la conciencia un tipo de computación muy diferente?

Desde luego, hay muchas explicaciones de la conciencia, y todas ellas se han planteado en multitud de monografías sobre la materia. Pero, para lo que nos interesa en este informe, nos centraremos en la afirmación, muy controvertida pero fascinante, que es más relevante para nuestro asunto; a saber, que la conciencia es un fenómeno mecánico cuántico. Es bien sabido que la cuestión la planteó Roger Penrose, el matemático de Oxford que, en *La nueva mente del emperador* (1989), <sup>\*</sup> sostuvo que la mente humana es un ordenador cuántico.

El lector recordará la idea de los ordenadores cuánticos del capítulo 4, donde evocamos aquel artículo del *New York Times* de 2007 que afirmaba que las plantas eran ordenadores cuánticos. El equipo del MIT se convenció al final de la idea de que, en efecto, los sistemas fotosintéticos de microbios y plantas pueden realizar algún tipo de computación cuántica. Pero ¿podían haber estado operando también sus ingeniosos cerebros en el ámbito cuántico? Para examinar esta cuestión, primero debemos observar con mayor detenimiento lo que son los ordenadores cuánticos y cómo funcionan.

## COMPUTANDO CON CUBITS

Cuando hoy pensamos en un ordenador queremos decir cualquier dispositivo electrónico capaz de cumplir instrucciones para manipular y procesar información mediante una colección de interruptores eléctricos que pueden estar ENCENDIDO o APAGADO, cada uno capaz de codificar un dígito binario (o *bit*), como un 1 o un 0. Se puede organizar una colección de tales interruptores para construir circuitos que realicen instrucciones lógicas, que pueden combinarse y usarse para efectuar operaciones aritméticas como sumas y restas o, de hecho, abrir y cerrar las compuertas que describimos para las neuronas. La gran ventaja de este ordenador digital eléctrico es que es mucho más rápido que cualquier manera manual de realizar el mismo tipo de tarea, ya sea contando con los dedos, con una aritmética mental o utilizando papel y lápiz.

Pero mientras que los ordenadores electrónicos pueden ser extraordinariamente rápidos a la hora de hacer sumas, ni siquiera ellos pueden hacer un seguimiento de la complejidad del mundo cuántico con su multitud de probabilidades superpuestas. Para superar este problema, Richard Feynman, el físico premio Nobel, dio con una posible solución. Sugirió que se efectuaran cálculos en el mundo cuántico, con un ordenador o computador cuántico.

Para ver cómo podrían funcionar los ordenadores cuánticos, será útil representar primero el «bit» de un ordenador clásico como una especie de brújula esférica cuya aguja puede señalar al 1 (polo norte) o al 0 (polo sur) y es capaz de girar  $180^\circ$  para pasar de uno de estos dos estados al otro (véase figura 8.4a). La unidad procesadora central (CPU) de un ordenador consta de muchos millones de estos interruptores de un bit, de modo que puede imaginarse que todo el proceso de cómputo es como la aplicación de un conjunto complejo de reglas de cambio (algoritmos) que pueden hacer que una gran cantidad de esferas giren  $180^\circ$ .

El equivalente del bit en la computación cuántica se denomina cubit. Este se parece a la esfera clásica, \* pero su movimiento no está limitado a un giro de  $180^\circ$ . Por el contrario, puede rotar a través de cualquier ángulo arbitrario en el espacio y, al pertenecer a la mecánica cuántica, también puede señalar simultáneamente en muchas direcciones en una superposición cuántica coherente (véase figura 8.4b). Esta flexibilidad aumentada permite que un cubit codifique más información que un bit clásico. Pero el incremento real de potencia de cómputo aparece cuando se ponen juntos varios cubits.

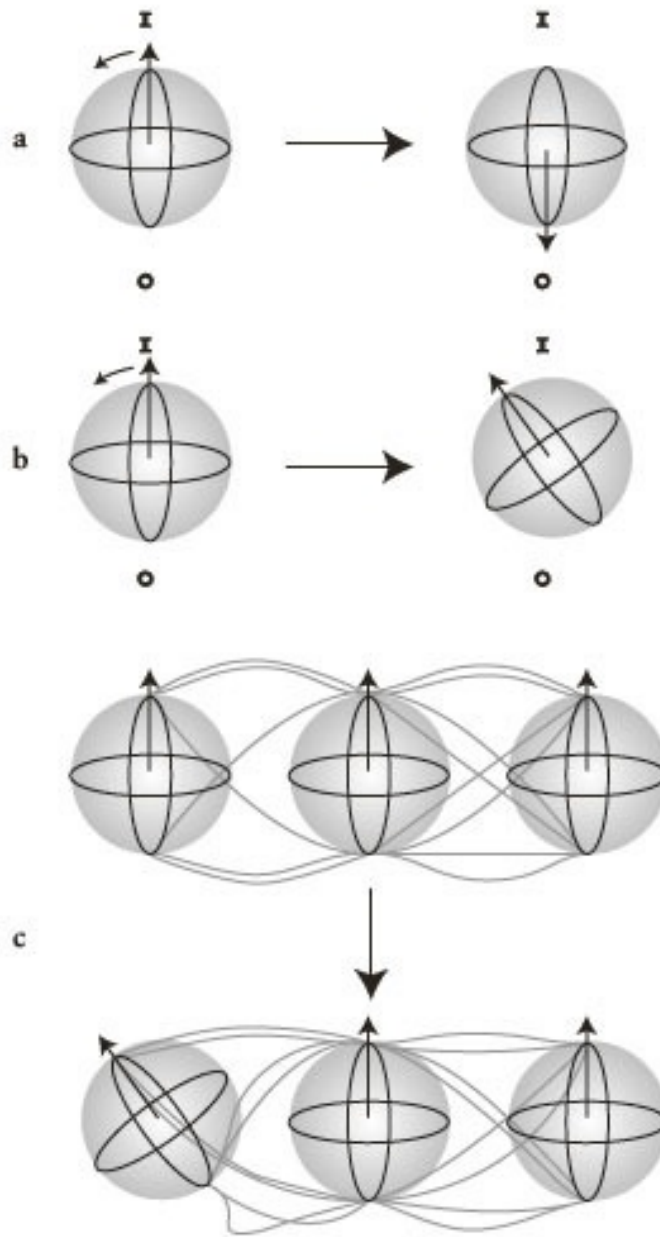


FIGURA 8.4. a) Un bit clásico que pasa de 1 a 0 se representa como una rotación de una esfera clásica a lo largo de  $180^\circ$ . b) Un cubit que efectúa el mismo cambio puede representarse como una rotación de una esfera a lo largo de cualquier ángulo arbitrario. Sin embargo, un cubit coherente puede estar asimismo en una superposición de muchas rotaciones. c) Tres cubits coherentes que muestran sus interacciones de enmarañamiento como cuerdas imaginarias que conectan la superficie de cada esfera. La tensión de estas cuerdas después de las rotaciones ejemplifica los cálculos cuánticos.

Mientras que el estado de un bit clásico no tiene influencia en sus vecinos, los cubits pueden estar asimismo «enmarañados cuánticamente». El lector recordará del capítulo 6 que el enmarañamiento o entrelazamiento es un paso más allá de la coherencia, por el que las partículas cuánticas pierden su individualidad, de



modo que lo que le ocurre a una de ellas les afecta a todas, instantáneamente. Desde la perspectiva de la computación cuántica, el enmarañamiento puede visualizarse como si cada cubit esférico estuviera conectado mediante cordeles elásticos \* a todos los demás cubits (véase figura 8.4c). Ahora, imaginemos que rotamos solo una de las esferas. Sin enmarañamiento, la rotación no afectará a los cubits vecinos. Pero si nuestro cubit está entrelazado con otros cubits, entonces la rotación cambia las tensiones en todos los cordeles que conectan a estos cubits conectados. El recurso computacional de todos estos cordeles enmarañados aumenta de manera exponencial con el número de cubits, lo que significa que aumenta con mucha mucha rapidez.

Para hacernos una idea de lo que es el crecimiento exponencial, el lector habrá oído la leyenda acerca del emperador chino que estaba tan contento con la invención del ajedrez que prometió recompensar a su inventor con el premio que este eligiera. El astuto inventor pidió solo un grano de arroz para el primer cuadrado del tablero de ajedrez, dos granos de arroz para el segundo, cuatro para el tercero y así sucesivamente, duplicando el número de granos en cada cuadrado sucesivo hasta que llegó al cuadrado sesenta y cuatro. El emperador, considerando que esta era una petición modesta, aceptó ilusionado y ordenó a sus sirvientes que trajeran el arroz. Pero, cuando se empezaron a contar los granos de arroz, pronto descubrió su error. La primera fila de cuadrados solo reunió 255 granos (28 menos uno; recuérdese que el primer cuadrado tenía uno solo grano de arroz), e incluso al final de la segunda fila de cuadrados solo encontraba 32.768 granos, algo menos de un kilogramo de arroz. Pero cuando los kilogramos empezaron a multiplicarse en los cuadrados siguientes, el emperador quedó consternado al descubrir que al final de la tercera fila tenía que entregar media tonelada de arroz. ¡Solo con que se alcanzara el final de la quinta fila, el reino habría entrado en bancarrota! En realidad, alcanzar la última casilla del tablero de ajedrez habría requerido 9.223.372.036.854.775.808 (264 menos uno) granos de arroz, o 230.584.300921 toneladas, que más o menos equivale a toda la cosecha mundial de arroz en toda la historia de la humanidad.

El problema del emperador fue que no reparó en que duplicar un número una y otra vez conduce al crecimiento exponencial, que es otra manera de decir que el aumento de un número al siguiente es proporcional al tamaño del número previo. El crecimiento exponencial es un crecimiento explosivo, como el emperador descubrió a su costa. Y de la misma manera que los granos de arroz de la leyenda aumentaban de manera exponencial con el número de casillas del tablero de ajedrez, la potencia de un ordenador cuántico aumenta de manera



exponencial con su número de cubits.

Esto es muy distinto de un ordenador clásico, cuya potencia aumenta solo linealmente con el número de bits. Por ejemplo, añadir un bit más a un ordenador clásico de 8 bits aumentará su potencia por un factor de un octavo; para duplicar su potencia, será necesario duplicar el número de bits. Pero añadir simplemente un cubit a un ordenador cuántico duplicará su potencia, lo que llevará al mismo tipo de aumento exponencial en potencia que hizo que el emperador viera cómo perdía sus granos de arroz. En realidad, si un ordenador cuántico pudiera mantener coherencia y enmarañamiento con solo 300 cubits, lo que potencialmente podría implicar solo 300 átomos, podría, en determinadas tareas, ¡superar a un ordenador clásico del tamaño de todo el universo!

Pero, y este es un pero muy grande, para que el ordenador cuántico funcionara, los cubits tendrían que interactuar solo con ellos mismos para efectuar cálculos, (a través de sus «cordeles» enmarañados). Esto significa que tendrían que estar completamente aislados de su ambiente. El problema es que cualquier interacción con el mundo exterior hace que los cubits se enmarañen con su ambiente, que podemos considerar como la formación de muchos más cordeles, todos los cuales tiran de los cubits desde direcciones diferentes, compitiendo con los cordeles entre los cubits y, por lo tanto, interfiriendo con los cálculos que realizan. Este es, en esencia, el proceso de decoherencia (véase figura 8.5). Incluso con la más débil de las interacciones, el ambiente lanza una tal confusión de cordeles de entrelazamiento sobre los cubits que estos dejan de comportarse de manera coherente unos con otros: sus cordeles cuánticos quedan cortados, en efecto, y los cubits se comportarán como bits clásicos e independientes.

Los físicos cuánticos hacen lo que pueden para mantener la coherencia en los cubits enmarañados y trabajan con sistemas físicos muy enrarecidos y cuidadosamente controlados, codifican cubits en un puñado de átomos, enfrían el sistema hasta alcanzar casi el cero absoluto y rodean su aparato con un grueso revestimiento calorífugo para dejar afuera cualquier influencia ambiental. Utilizando estas estrategias han producido algunos logros notables. En 2001, científicos de la IBM y de la Universidad de Stanford consiguieron construir un «ordenador cuántico de tubo de ensayo» de siete cubits que podía poner en marcha un código inteligente denominado algoritmo de Shor, por el matemático Peter Shor, quien lo diseñó en 1994 específicamente para que se ejecutara en un ordenador cuántico. El algoritmo de Shor codifica una manera muy eficiente de factorizar números; es decir, calcular qué números primos deben multiplicarse para obtener el número requerido. Esto supuso un avance enorme y recibió

publicidad en todo el mundo; pero el vuelo de prueba de este ordenador cuántico bisoño solo consiguió computar los factores primos del número 15 (3 y 5, por si el lector quiere saberlo).

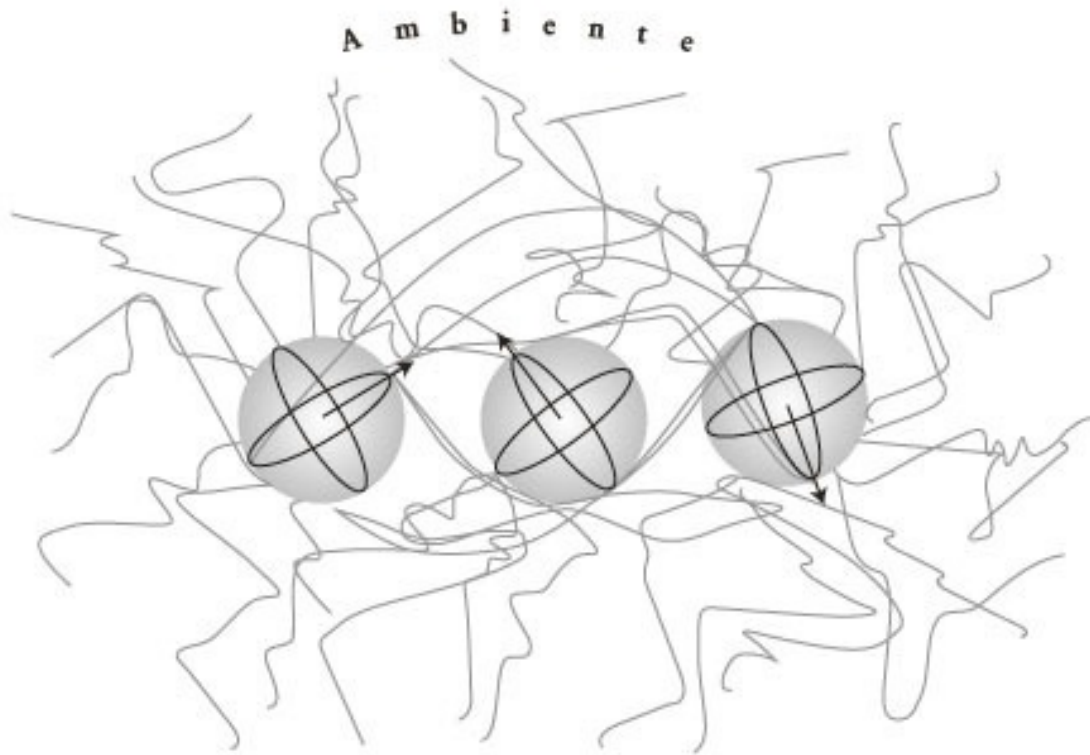


FIGURA 8.5. Se puede imaginar que la decoherencia en un ordenador cuántico es causada por el enmarañamiento de cubits con una maraña de cuerdas ambientales. Dichas cuerdas tiran de los cubits y los empujan de aquí para allá, de manera que estos ya no responden a sus propias conexiones de enmarañamiento.

A lo largo de la última década, algunos de los físicos, matemáticos e ingenieros más destacados han trabajado duro para construir ordenadores cuánticos mayores y mejores, pero los progresos han sido lentos. En 2011, un investigador chino consiguió factorizar el número 143 ( $13 \times 11$ ) utilizando solo cuatro cubits. Al igual que el grupo estadounidense antes que ellos, el equipo chino empleó un sistema en el que se codificaron cubits en los estados de espín de átomos. La compañía canadiense D-Wave ha sido la primera en emplear un enfoque totalmente distinto, en el que los cubits se codifican en el movimiento de electrones en circuitos eléctricos. En 2007, la compañía afirmó haber desarrollado el primer ordenador cuántico comercial de 16 cubits, capaz de resolver un sudoku y otros problemas de búsqueda de patrones y de optimización. En 2013, una colaboración de la NASA, Google y la Asociación

de Universidades de Investigación Espacial (USRA) adquirió (por una suma no revelada) una máquina de 512 cubits construida por D-Wave que la NASA planea utilizar para buscar exoplanetas, es decir, planetas que no orbitan alrededor de nuestro Sol, sino de estrellas distantes. Sin embargo, todos los problemas que hasta ahora ha abordado la compañía han estado al alcance de la potencia de ordenadores convencionales, y muchos expertos en computación cuántica siguen sin estar convencidos de que la tecnología de D-Wave sea realmente computación cuántica... o, si lo es, de que su diseño consiga hacerlo más rápido que un ordenador clásico.

Sea cual sea la aproximación que los experimentadores elijan tomar, los retos a los que se enfrentan a la hora de transformar la generación actual de ordenadores cuánticos primitivos en algo útil siguen siendo inmensos. El mayor de los problemas es aumentar la potencia. Cada cubit adicional duplica la potencia de computación cuántica, pero también duplica la dificultad de mantener la coherencia cuántica y el enmarañamiento. Los átomos tienen que ser más fríos, el aislamiento más efectivo, y cada vez se hace más difícil mantener la coherencia durante más que unas pocas billonésimas de segundo. La decoherencia aparece mucho antes de que el ordenador consiga completar siquiera el cálculo más sencillo. (Aunque en el momento de escribir esto, el récord para coherencia cuántica de estados de espín nucleares a temperatura ambiente es de unos impresionantes treinta y nueve minutos.) <sup>7</sup> Pero, como hemos descubierto, las células vivas consiguen mantener a raya la decoherencia durante el tiempo suficiente para transportar excitones en los complejos fotosintéticos, o electrones y protones en las enzimas. ¿Podría mantenerse a raya de manera parecida la decoherencia en el sistema nervioso central para permitir que se realice computación cuántica en el cerebro?

#### ¿COMPUTAR CON MICROTÚBULOS?

La argumentación inicial de Penrose de que el cerebro es un ordenador cuántico provenía de una dirección relativamente sorprendente: el famoso conjunto (al menos en círculos matemáticos) de teoremas de incompletitud que propuso el matemático austríaco Kurt Gödel. Tales teoremas fueron muy sorprendentes para aquellos matemáticos que en la década de 1930 se habían embarcado llenos de confianza en un programa para identificar un conjunto potente de axiomas matemáticos que pudieran demostrar que las declaraciones verdaderas eran verdaderas y que las afirmaciones falsas eran falsas; básicamente, que toda la

aritmética tenía consistencia interna y estaba desprovista de contradicciones en sí. Parece el tipo de cosa de la que solo los matemáticos o filósofos tendrían que preocuparse, pero entonces era, y continúa siendo, un problema importante en el campo de la lógica. Los teoremas de incompletitud de Gödel demostraron que una tal empresa estaba destinada al fracaso.

El primero de sus teoremas demostró que los sistemas lógicos, como el lenguaje natural o las matemáticas, pueden hacer unas declaraciones verdaderas que no pueden demostrar. Esta parece ser una afirmación inocua, pero sus implicaciones son trascendentales. Consideremos un sistema lógico familiar, como el lenguaje, que es capaz de razonar mediante declaraciones tales como «Todos los hombres son mortales. Sócrates es un hombre», para concluir que «Sócrates es mortal». Es fácil ver, y fácil demostrar formalmente, que la última declaración se sigue lógicamente de las dos primeras, dado un conjunto sencillo de reglas algebraicas (si  $A = B$  y  $B = C$ , entonces  $A = C$ ). Pero Gödel demostró que cualquier sistema lógico lo suficientemente complejo como para demostrar teoremas matemáticos tiene una limitación fundamental: la aplicación de sus reglas puede generar declaraciones que son verdaderas, pero estas no pueden demostrarse con las mismas herramientas que se usaron de entrada para generarlas.

Esto parece bastante extraño, y de hecho lo es. Sin embargo, y esto es importante, el teorema de Gödel no significa que algunas declaraciones verdaderas sean simplemente no demostrables. En cambio, un conjunto de reglas puede ser capaz de demostrar la verdad de declaraciones generadas por cualquier otro conjunto de reglas y, por lo tanto, ser indemostrable con ellas. Por ejemplo, algunas declaraciones del lenguaje verdaderas pero indemostrables pueden ser demostrables dentro de las reglas del álgebra, y viceversa.

Esto es, desde luego, una simplificación enorme y excesiva, que no hace justicia a las sutilezas del asunto. Al lector interesado puede que le guste leer el libro que en 1979 escribió Douglas Hofstadter, profesor estadounidense de ciencia cognitiva, sobre este tema y otros relacionados. [8](#) Aquí el punto clave es que, en su libro *La nueva mente del emperador*, Penrose toma los teoremas de incompletitud de Gödel como punto de partida para su argumentación, y primero señala que los ordenadores clásicos emplean sistemas de lógica formal (algoritmos informáticos) para hacer sus declaraciones. Del teorema de Gödel se sigue que también deben ser capaces de generar declaraciones verdaderas que no pueden demostrar. Pero, aduce Penrose, los humanos (o, al menos, aquellos miembros de la especie que son matemáticos) pueden demostrar la verdad de

estas declaraciones informáticas indemostrables pero ciertas. Por lo tanto, argumenta, la mente humana es más que un simple ordenador clásico, puesto que es capaz de lo que Penrose denomina procesos no computables. A continuación postula que esta no computabilidad requiere algo adicional, algo que solo puede proporcionar la mecánica cuántica. La conciencia, aduce, requiere un ordenador cuántico.

Por supuesto, esta es una afirmación muy atrevida para hacerla sobre la base de la demostrabilidad o no de una declaración matemática difícil, punto al que volveremos. Pero en su libro posterior, *Las sombras de la mente*, Penrose fue incluso más allá y propuso un mecanismo físico por el que el cerebro podría calcular sus sumas en el mundo cuántico. <sup>9</sup> Penrose formó equipo con Stuart Hameroff, <sup>\*</sup> profesor de anestesiología y psicología en la Universidad de Arizona, para afirmar que las estructuras denominadas microtúbulos que se encuentran en las neuronas son los cubits de los cerebros cuánticos. <sup>10</sup>

Los microtúbulos son largas hebras de una proteína denominada tubulina. Hameroff y Penrose propusieron que estas proteínas de la tubulina (las cuentas de la hebra) son capaces de presentarse, al menos, en dos formas diferentes, extendida y contraída, y de pasar de una a la otra, y que, de manera crucial, son capaces de comportarse como objetos cuánticos que existen en una superposición de ambas formas a la vez para constituir algo parecido a cubits. No solo esto: postularon que las proteínas de la tubulina en una neurona están enmarañadas con las proteínas de la tubulina en otras muchas neuronas. El lector recordará que el enmarañamiento es aquella «acción fantasmal a distancia» con el potencial de conectar objetos que están muy alejados uno de otro. Si las conexiones fantasmales entre todos los cientos de miles de millones de neuronas de un cerebro humano fueran posibles, entonces podrían, en potencia, integrar toda la información codificada en nervios separados y de esta manera resolver el problema de la integración. También podrían proporcionar a la mente consciente las capacidades escurridizas pero extraordinariamente potentes de un ordenador cuántico.

La teoría de la conciencia de Penrose-Hameroff contiene muchos más aspectos destacables, entre los que se incluye, posiblemente de manera incluso más controvertida, una propuesta para implicar la gravedad. <sup>\*</sup> Pero ¿es creíble? Nosotros, al igual que casi todos los neurobiólogos y físicos cuánticos, no estamos para nada convencidos. Una de las objeciones más evidentes puede resultar obvia a partir de la descripción precedente de cómo la información se desplaza desde el cerebro a través de los nervios. El lector habrá advertido que

en esta descripción no mencionamos los microtúbulos. Ello se debe a que era innecesario hacerlo, puesto que no tienen, hasta donde se sabe, ningún papel directo en el procesamiento de la información neural. Los microtúbulos sostienen la arquitectura de cada neurona y transportan neurotransmisores arriba y abajo; pero no se cree que estén implicados en el procesamiento de información basado en red responsable de los cálculos cerebrales. De manera que los microtúbulos son sustratos improbables para nuestros pensamientos.

Pero quizás una objeción más importante todavía es que los microtúbulos del cerebro son candidatos muy poco probables como qubits cuánticos coherentes por la sencilla razón de que son demasiado grandes y complicados. En capítulos anteriores hemos argumentado a favor de la coherencia cuántica, el entrelazamiento y el efecto de túnel en toda una serie de sistemas biológicos, desde los sistemas fotosintéticos hasta las enzimas, los receptores olfativos, el ADN y el esquivo órgano de la magnetorecepción en aves. Pero una característica clave de todos ellos es que la parte «cuántica» del sistema (el excitón, electrón, protón o radical libre) es sencilla. Consiste o bien en una única partícula o en un pequeño número de partículas que hacen lo que hacen a distancias de escala atómica. Esto corresponde, desde luego, a la intuición que hace setenta años tuvo Schrödinger de que los tipos de sistema vivo que es probable que soporten reglas cuánticas implicarán un número reducido de partículas.

Pero la teoría de Penrose-Hameroff propone que moléculas enteras de proteína, compuestas de millones de partículas, se encuentran en superposición cuántica y entrelazadas no solo con moléculas del mismo microtúbulo, sino también con microtúbulos, compuestos asimismo por millones de partículas, de los miles de millones de células nerviosas de todo el volumen del cerebro. Esto está lejos de ser plausible. Aunque nadie ha conseguido medir la coherencia en microtúbulos del cerebro, los cálculos sugieren que la coherencia cuántica incluso en microtúbulos aislados no se podría mantener durante escalas de tiempo superiores a unos pocos picosegundos, \* un tiempo demasiado fugaz como para tener algún impacto en la computación cerebral. [11](#)

Sin embargo, quizás el problema fundamental de la teoría de Penrose-Hameroff de la conciencia cuántica sea la argumentación original de Penrose en el sentido de que el cerebro es un ordenador cuántico. El lector recordará que Penrose basaba esta afirmación en su aseveración de que los humanos pueden demostrar las declaraciones gödelianas mientras que los ordenadores no pueden hacerlo. Pero esto implica la existencia de computación cuántica en el cerebro solo si los ordenadores cuánticos pueden demostrar las declaraciones gödelianas

mejor que un ordenador clásico; no solo no hay prueba alguna para esta aseveración, sino que además la mayoría de investigadores creen lo contrario. [12](#)

Un asunto adicional es que no queda nada claro que un cerebro humano pueda realmente funcionar mejor que un ordenador clásico a la hora de demostrar las declaraciones gödelianas. Aunque los humanos pueden ser capaces de demostrar la verdad de una declaración gödeliana generada por un ordenador, es igualmente posible que los ordenadores sean capaces de demostrar la verdad de una declaración gödeliana indemostrable generada por una mente humana. El teorema de Gödel solo limita la capacidad de un sistema de lógica para demostrar todas sus propias declaraciones; no pone límites a la capacidad de un sistema de lógica para demostrar declaraciones gödelianas generadas por otro.

Pero ¿significa esto que la mecánica cuántica no desempeña ningún papel en el cerebro? ¿Es probable que, con tanta acción cuántica que se desarrolla en otras partes de nuestro cuerpo, nuestros pensamientos estén accionados totalmente por los procesos de la máquina de vapor del mundo clásico? Quizá no. Investigaciones recientes sugieren que la mecánica cuántica puede ciertamente desempeñar un papel crucial en la manera en que la mente funciona.

#### ¿CANALES IÓNICOS CUÁNTICOS?

Un posible lugar para los fenómenos mecánicos cuánticos en el cerebro reside en los canales iónicos de las membranas celulares de las neuronas. Tal como ya hemos descrito, estos son responsables de mediar con los potenciales de acción (las señales nerviosas) que transmiten información en el cerebro, de manera que desempeñan un papel fundamental en el procesamiento de la información neural. Los canales tienen una longitud de alrededor de solo una milmillonésima de metro (1,2 nanómetros) y menos de la mitad de este valor de anchura, de modo que los iones han de pasar a su través en fila india. Pero lo hacen con una tasa extraordinariamente alta de alrededor de cien millones por segundo. Y los canales son también muy selectivos. Por ejemplo, el canal responsable de permitir la entrada de iones potasio a la célula deja pasar alrededor de un ion de sodio por cada diez mil iones de potasio, a pesar del hecho de que el ion de sodio es un poco más pequeño que el de potasio..., de modo que ingenuamente podríamos esperar que se deslizara con facilidad a través de algo lo bastante grande como para acomodar un ion de potasio.

Estas altísimas tasas de transporte, junto al extraordinario grado de selectividad ejercido, forma la base de la velocidad de los potenciales de acción



y, por lo tanto, de su capacidad de transmitir nuestros pensamientos por nuestro cerebro. Pero el modo en que los iones se transportan de una manera tan rápida y selectiva sigue siendo un misterio. ¿Podría explicarlo la mecánica cuántica? Ya hemos descubierto (en el capítulo 4) que la mecánica cuántica puede acentuar el transporte de energía en la fotosíntesis. ¿Puede mejorar asimismo el transporte en el cerebro? En 2012, el neurocientífico Gustav Bernroider, de la Universidad de Salzburgo, se unió a Johann Summhammer, del Instituto del Átomo de la Universidad de Tecnología de Viena, para realizar una simulación de mecánica cuántica de un ion que atravesaba un canal iónico accionado en función del voltaje; descubrieron que el ion se deslocaliza (se extiende) cuando viaja a través del canal: es más una onda coherente que una partícula. Asimismo, esta onda iónica oscila a frecuencias muy altas y transfiere energía a la proteína circundante mediante una especie de proceso de resonancia, de manera que el canal actúa, en efecto, como un frigorífico iónico que reduce más o menos a la mitad la energía cinética del ion. Este enfriamiento efectivo del ion ayuda a preservar su estado cuántico deslocalizado al mantener a raya la decoherencia, y por lo tanto promueve el transporte cuántico rápido a través del canal. También contribuye a la selectividad, puesto que el grado de refrigeración será muy distinto si el sodio sustituye al potasio: la interferencia constructiva puede promover el transporte de los iones de potasio, mientras que la interferencia destructiva puede inhibir el transporte de iones de sodio. El equipo llegó a la conclusión de que la coherencia cuántica desempeña un papel «indispensable» en la conducción de iones a través de los canales iónicos de los nervios y, por lo tanto, es una parte esencial de nuestro proceso de pensamiento. [13](#)

Cabe destacar que estos investigadores no han sugerido que los iones coherentes cuánticos sean capaces de actuar como una especie de cubits neurales, ni tampoco que puedan desempeñar papel alguno en la conciencia. A primera vista es difícil ver cómo pueden contribuir a resolver algunos de los problemas de la conciencia, como el problema de la integración. Sin embargo, a diferencia de los microtúbulos de la hipótesis de Penrose-Hameroff, los canales iónicos sí que desempeñan al menos un papel claro en la computación neural (son la base de los potenciales de acción), de modo que su estado reflejará el estado de la neurona: si el nervio dispara, entonces habrá iones que fluyan (recuérdese que se mueven como ondas cuánticas) con rapidez a través de los canales, mientras que si el nervio está en reposo, los iones que haya en el canal estarán estacionarios. Así, puesto que en nuestro cerebro la suma total de neuronas que disparan y que no disparan ha de codificar de alguna manera



nuestros pensamientos, entonces dichos pensamientos también están reflejados (codificados) en la suma de todo el flujo cuántico de iones que entran y salen de nuestras neuronas.

Pero ¿cómo podrían los procesos mentales individuales combinarse para generar pensamientos conscientes, integrados? Seguro que un canal iónico coherente (ya sea cuántico o clásico) no puede codificar toda la información integrada en los procesos de pensamiento que culminan en la visualización de un objeto complejo, como un bisonte. Para desempeñar un papel en la conciencia, los canales iónicos tendrían que estar conectados de alguna manera. ¿Podría ayudar la mecánica cuántica? ¿Es posible, por ejemplo, que los iones de un canal no sean solo coherentes a lo largo de la longitud del canal, sino también que sean coherentes o incluso que estén enmarañados con iones de canales adyacentes o incluso de neuronas próximas? Casi con toda seguridad, no. Los canales iónicos y los iones de su interior tendrían el mismo problema que la idea de Penrose-Hameroff de los microtúbulos. Aunque resulta concebible que un único canal iónico pueda estar entrelazado con un canal adyacente en la misma neurona, el entrelazamiento entre canales iónicos en nervios diferentes, que sería necesario para resolver el problema de la integración, es totalmente irrealizable en el ambiente cálido, húmedo, muy dinámico e inductor de decoherencia de un cerebro vivo.

De este modo, si el enmarañamiento no puede integrar la información a nivel cuántico en los canales iónicos, ¿existe alguna otra cosa que pueda realizar la tarea? Quizá sí. Los canales iónicos que se abren en función del voltaje son, desde luego, sensibles al voltaje: es lo que abre y cierra los canales. El voltaje es simplemente una medida del gradiente de un campo eléctrico. Pero todo el volumen del cerebro lo ocupa su propio campo electromagnético (EM), que es generado por la actividad eléctrica de todos sus nervios. Este campo es lo que se detecta de forma habitual mediante las tecnologías de exploración cerebral, como la electroencefalografía (EEG) o la magnetoencefalografía (MEG), e incluso una ojeada a uno de estos registros nos dirá lo extraordinariamente complejo y rico en información que es este campo. La mayoría de los neurocientíficos han hecho caso omiso del papel potencial que el campo EM podría desempeñar en la computación cerebral porque han supuesto que es como el pitido de vapor de un tren: un producto de la actividad cerebral, pero sin impacto en dicha actividad. Sin embargo, varios científicos, entre ellos Johnjoe, se han planteado en fechas recientes la idea de que trasladar la conciencia de las partículas discretas de materia en el cerebro al campo EM integrado podría

resolver en potencia el problema de la integración y proporcionar una sede para la conciencia. [14](#)

Para comprender cómo puede funcionar esto, tal vez necesitemos desarrollar en profundidad lo que queremos dar a entender por un «campo». El término deriva de su uso común: significa algo que se extiende por el espacio, como un campo de maíz o un campo de fútbol. En física, el término «campo» tiene el mismo significado esencial, pero por lo general se refiere a campos de energía que pueden mover objetos. Los campos gravitatorios mueven cualquier cosa que tenga masa, y los campos eléctricos o magnéticos mueven partículas cargadas eléctricamente o partículas magnéticas, como los iones en los canales iónicos de los nervios. En el siglo XIX, James Clerk Maxwell descubrió que electricidad y magnetismo son dos aspectos del mismo fenómeno, el electromagnetismo, de modo que nos referimos a ambos como campos EM. Es bien sabido que la ecuación de Einstein,  $E = mc^2$ , con energía en un lado y masa en el otro, demostró que energía y materia son intercambiables. De modo que el campo de energía electromagnética del cerebro (la parte de la izquierda de la ecuación de Einstein) es tan real como la materia que constituyen sus neutrones; y, puesto que está generada por los disparos de las neuronas, codifica exactamente la misma información que los patrones de disparo neural del cerebro. Sin embargo, mientras que la información neuronal queda atrapada en estas neuronas que emiten señales, la actividad eléctrica generada por todas las señales unifica toda la información dentro del campo EM del cerebro. Esto podría resolver potencialmente el problema de integración. [15](#) Y, al abrir y cerrar los canales iónicos que se abren en función del voltaje, el campo EM se acopla a estos iones coherentes desde el punto de vista cuántico que se desplazan a través de los canales.

Cuando se propusieron por primera vez las teorías de la conciencia del campo EM en los primeros años de este siglo, no había pruebas directas de que el campo electromagnético del cerebro pudiera influir sobre los patrones de disparo de los nervios para impulsar nuestros pensamientos y acciones. Sin embargo, algunos experimentos recientes realizados en varios laboratorios han demostrado que los campos EM externos, de intensidad y estructura similares a los que el propio cerebro genera, influyen en efecto sobre el disparo de los nervios. [16](#) De hecho, lo que parece que el campo hace es coordinar los disparos de los nervios: es decir, hacer que muchas neuronas entren en sincronía de modo que todas disparen al unísono. Los hallazgos sugieren que el propio campo EM del cerebro, generado por el disparo de los nervios, influye asimismo sobre este

mismo disparo, proporcionando una especie de bucle de autorreferencia que muchos teóricos afirman que es un componente esencial de la conciencia. [17](#)

La sincronización del disparo de los nervios por parte del campo EM del cerebro es también muy importante en el contexto del enigma de la conciencia, porque es una de las pocas características de actividad nerviosa que se sabe que se correlaciona con la conciencia. Por ejemplo, todos tenemos experiencia del fenómeno de buscar un objeto que está a plena vista, como nuestras gafas, y después divisarlo entre un revoltijo de otros objetos. Mientras mirábamos aquel revoltijo, la información visual que codificaba aquel objeto viajaba a través de nuestro cerebro, mediante nuestros ojos, pero de alguna manera no veíamos el objeto que estábamos buscando: no éramos conscientes del mismo. Pero después lo vimos. ¿Qué cambia en nuestro cerebro entre los momentos en que primero somos inconscientes y después conscientes de un objeto dentro del mismo campo visual? Es de destacar que el disparo neural no parece cambiar: las mismas neuronas disparan veamos o no las gafas. Pero cuando no las divisamos, las neuronas disparan de manera asincrónica, y cuando las vemos lo hacen de manera sincrónica. [18](#) El campo electromagnético, que pone juntos todos estos canales iónicos coherentes en partes dispares del cerebro para generar disparos sincrónicos, podría desempeñar un papel en esta transición entre los pensamientos inconscientes y los conscientes.

Hemos de poner énfasis en que invocar ideas tales como los campos electromagnéticos del cerebro o los canales iónicos coherentes, con el fin de explicar la conciencia, no proporciona, en absoluto, ningún respaldo a los llamados «fenómenos paranormales» como la telepatía, puesto que ambos conceptos solo son capaces de influir en los procesos neurales que se producen dentro de un único cerebro: ¡no permiten la comunicación entre cerebros diferentes! Y, tal como hemos señalado cuando considerábamos la argumentación gödeliana de Penrose, no existe de hecho prueba alguna de que se necesite en absoluto la mecánica cuántica para explicar la conciencia, a diferencia de otros fenómenos biológicos que hemos abordado en este libro, como la acción enzimática o la fotosíntesis. Pero ¿es probable que las extrañas características de la mecánica cuántica que hemos descubierto que están implicadas en tantos fenómenos cruciales de la vida estén excluidas de su producto más misterioso, la conciencia? Dejaremos que sea el lector quien decida. El plan que hemos esbozado con anterioridad, que implica canales iónicos coherentes desde el punto de vista cuántico y campos electromagnéticos, es ciertamente especulativo, pero al menos proporciona una conexión plausible

entre los ámbitos cuántico y clásico en el cerebro.

Así pues, teniendo esto *in mente* , volvamos de nuevo a la oscura cueva en el sur de Francia para completar la cadena de acontecimientos desde el cerebro hasta la mano mientras nuestra artista se halla preparada ante la pared, observando cómo la luz de la antorcha titila sobre sus contornos grises. Algún juego de la luz sobre la roca aporta la imagen de un bisonte a su mente consciente. Esto es suficiente para crear una idea en su cabeza, quizás ejemplificada como una fluctuación en el campo EM de su cerebro, que hace que se abran grupos de canales iónicos coherentes en gran cantidad de neuronas separadas, lo que ocasiona que estas disparen de manera sincrónica. Las señales nerviosas sincrónicas disparan potenciales de acción a través de su cerebro y, por medio de conexiones sinápticas, inician un tren de señales que viaja a lo largo de su médula espinal y a través de conexiones nerviosas hasta los nervios motores que disparan sus paquetes de neurotransmisores a las conexiones neuromusculares que están fijadas a los músculos de su brazo. Dichos músculos se contraen para generar el movimiento coordinado de su mano, que pasa rápidamente sobre la pared de la cueva y deposita una línea de carbón vegetal sobre la roca con la forma de un bisonte. Y, lo que quizá sea más importante, ella percibe que inició la acción debido a una idea en su mente consciente. No es una zombi.

Treinta mil años después, Jean-Marie Chauvet proyecta la luz de una linterna sobre esta misma pared de la cueva y la idea que nació dentro del cerebro de aquella artista, muerta desde hace muchísimo tiempo, titila de nuevo a través de las neuronas de una mente humana consciente.

## CÓMO EMPEZÓ LA VIDA

... si (y ¡oh!, ¡qué gran si!) pudiéramos concebir algún pequeño estanque cálido, con todo tipo de sales de amoníaco y fosfóricas, luz, calor o electricidad presentes, que un compuesto proteínico se formara químicamente listo para experimentar cambios todavía más complejos...

CHARLES DARWIN ,  
carta a Joseph Hooker, 1871

Groenlandia no es particularmente verde. \* En algún momento alrededor del año 982, un vikingo danés conocido como Erik el Rojo huyó de una acusación de asesinato navegando hacia el oeste desde Islandia y descubrió la isla. No fue el primero: ya la habían descubierto varias veces las gentes de la Edad de Piedra que habían llegado desde el Canadá oriental al menos en 2500 a. C. Pero Groenlandia presenta un ambiente riguroso e implacable, y aquellas culturas iniciales desaparecieron, dejando solo algunas débiles trazas. Erik esperaba tener más suerte, al haber llegado durante el llamado Período Cálido Medieval, cuando las condiciones eran más bonancibles; por ello dio a la isla su nombre actual, confiando en que su promesa de verdes pastos atraería a sus paisanos hacia el oeste. Es evidente que la estratagema funcionó, porque pronto se estableció una colonia de varios miles de personas y, al menos en un primer momento, parece que prosperó. Pero cuando el período cálido declinó, Groenlandia volvió a las condiciones climáticas típicas del Atlántico Norte, y el casquete de hielo central creció hasta cubrir el 80% de la superficie insular. Al volverse el clima cada vez más extremo, los isleños se esforzaron para mantener su sistema agrícola escandinavo en los suelos poco profundos de la estrecha franja costera, y tanto las cosechas como el ganado se redujeron.

Resulta irónico que, más o menos por la misma época que la colonia vikinga fracasaba, otra oleada de inmigrantes, los inuits (esquimales), se ganaban la vida en el norte de la isla con una refinada tecnología de pesca y caza que estaba bien adaptada a las condiciones locales. Los vikingos podrían haberse salvado si hubieran utilizado las estrategias de supervivencia de los inuits, pero la única

constancia que tenemos de contacto entre los dos pueblos es la observación de un colono vikingo en el sentido de que los inuits sangraban mucho cuando los acuchillaban; lo que no muestra disposición alguna a aprender de sus vecinos septentrionales. El resultado fue que a finales de siglo xv la colonia vikinga se vino abajo, y al parecer los últimos habitantes recurrieron al canibalismo.

Sin embargo, los daneses no olvidaron nunca su puesto de avanzada occidental, y a principios del siglo xviii se envió una expedición para renovar los lazos con los colonos. Solo encontraron casas abandonadas y cementerios, pero la visita condujo al establecimiento de una colonia más próspera que, junto con los inuits nativos, se acabó convirtiendo en la moderna región autónoma de Groenlandia. En la actualidad, la economía de Groenlandia ha crecido a partir de sus raíces inuits, que depende en gran parte de la pesca, pero cada vez se han reconocido más las riquezas minerales potenciales de la isla. En la década de 1960, la Inspección Geológica Danesa de Groenlandia contrató a un joven geólogo de origen neozelandés llamado Vic McGregor para que realizara un estudio geológico del extremo suroccidental de la isla, cerca de su capital Godthaab (ahora rebautizada Nuuk).

McGregor pasó varios años viajando por la región surcada de fiordos en una barca diminuta, parcialmente abierta, de un tamaño apenas suficiente para él, dos tripulantes locales y algún invitado ocasional, todos apretujados entre equipo de acampada, utensilios de caza y pesca (que no diferían de los que utilizaban aquellos primeros colonos inuits) y equipo geológico. Mediante técnicas estándares de estratigrafía, McGregor llegó a la conclusión de que las rocas de la región habían sido depositadas en diez estratos sucesivos, el más antiguo y profundo tal vez fuera «realmente muy antiguo»: quizás incluso de más de tres mil millones de años de antigüedad.

A principios de la década de 1970, McGregor envió una muestra de su roca antigua al laboratorio en Oxford de Stephen Moorbath, un científico que se había ganado una reputación por la datación radiométrica de rocas. El método depende de la medición de la proporción entre isótopos radiactivos y sus productos de desintegración. Por ejemplo, el uranio 238 se desintegra con una vida media de cuatro mil quinientos millones de años (a lo largo de una cadena de núclidos, que finalmente producen un isótopo estable del plomo); así, puesto que la Tierra tiene unos cuatro mil millones de años de antigüedad, la concentración de uranio natural en una roca tomará toda la edad de la Tierra para reducirse a la mitad. Midiendo la proporción de estos isótopos en cualquier muestra de roca, los científicos pueden, por lo tanto, calcular cuánto tiempo hace desde que se

depositaron dichas rocas; y eran estas técnicas las que Stephen Moorbath empleó en 1970 para analizar una muestra de un tipo de roca llamado gneis, que McGregor había arrancado de la región costera del suroeste de Groenlandia llamada Amîtsoq. Sorprendido, descubrió que el gneis contenía una proporción de plomo mayor que la de cualquier mena o roca de la que se hubiera informado nunca. El hallazgo de niveles muy altos de plomo significaba que el gneis de Amîtsoq era, tal como McGregor había adivinado, «realmente muy antiguo»: al menos tres mil setecientos millones de años de antigüedad, más antiguo que ninguna otra roca que se hubiera encontrado con anterioridad en la Tierra.

Moorbath quedó tan sorprendido por el descubrimiento que acompañó a McGregor en varias expediciones a Groenlandia. En 1971, ambos decidieron visitar la región de Isua, remota y prácticamente inexplorada, ubicada al borde del casquete de hielo interior (véase figura 9.1). Primero tuvieron que navegar en la pequeña barca de McGregor hasta la cabecera del fiordo de Godthaab, repleto de icebergs, donde los colonos vikingos habían subsistido a duras penas en la Edad Media. Después los recogió un helicóptero perteneciente a una compañía minera local que también estaba interesada en la región y cuyas prospecciones magnéticas aéreas habían sugerido que era potencialmente rica en mineral de hierro. Los científicos descubrieron que dentro de la roca verde \* local de Isua había muchas masas de roca almohadillada, conocidas como lavas basálticas almohadilladas, que se habían formado por lava volcánica que había extrudido directamente en agua de mar: los llamados volcanes de fango. Estas rocas se dataron de nuevo en al menos tres mil setecientos millones de años de antigüedad. El hallazgo demostraba a las claras que la Tierra poseía océanos líquidos y cálidos no mucho después de su formación, \*\* con volcanes de fango (véase figura 9.2) que burbujeaban con fumarolas hidrotermales en el fondo de un mar somero.



FIGURA 9.1. Mapa de Groenlandia, que muestra la posición de Isua.

Sin embargo, la verdadera sorpresa se produjo cuando Minik Rosling, un investigador del Museo Geológico de Copenhague, midió la proporción de isótopos de carbono en la roca verde de Isua. Las rocas contienen alrededor del 0,4% de carbono, y cuando se midieron las proporciones relativas de los dos isótopos  $^{13}\text{C}$  y  $^{12}\text{C}$ , se encontró que la cantidad de  $^{13}\text{C}$ , más raro y más pesado, era mucho menor de lo esperado. Las fuentes inorgánicas de carbono, como el dióxido de carbono atmosférico, tienen alrededor del 1% de  $^{13}\text{C}$ , pero la fotosíntesis prefiere incorporar el isótopo más ligero,  $^{12}\text{C}$ , en la biomasa vegetal y microbiana, de modo que un nivel bajo de  $^{13}\text{C}$  es, por lo general, un indicador de la presencia de material orgánico. Estos resultados sugerían que en las aguas cálidas que rodeaban los volcanes de fango de Isua hace tres mil setecientos millones de años vivían organismos que, como las plantas actuales, captaban carbono del dióxido de carbono, o bien de la atmósfera o bien disuelto en el agua, y lo usaban para construir todos los compuestos basados en el carbono que constituían sus células.





FIGURA 9.2. Un moderno volcán de fango en Trinidad. ¿Acaso la primera vida sobre la Tierra burbujeó de un volcán de fango similar, y dejó su rastro en la roca verde de Isua? Foto: Michael C. Rygel a través de Wikipedia Commons.

La teoría de las rocas de Isua sigue siendo polémica, y muchos científicos no están convencidos de que los bajos niveles de  $^{13}\text{C}$  encontrados allí impliquen necesariamente una presencia tan temprana de organismos vivos. Gran parte del escepticismo proviene del hecho de que hace tres mil ochocientos millones de años la Tierra se hallaba en la agonía de lo que se conoce como «fuerte bombardeo tardío», y padecía impactos regulares de asteroides y cometas con la energía suficiente para vaporizar el agua superficial y presumiblemente también para esterilizar los océanos. El descubrimiento de fósiles de cualquiera de estos organismos fotosintetizadores antiguos cerraría desde luego el caso, pero las rocas de Isua han sido deformadas gravemente a lo largo de millones de años y cualquiera de dichos fósiles sería irreconocible. Hemos de saltar varios cientos de millones de años hacia delante antes de encontrar pruebas de la existencia de vida claramente presentes en la forma de fósiles reconocibles de microbios antiguos.

A pesar de la falta de pruebas concluyentes, muchos creen que los datos isotópicos de Isua proporcionan las indicaciones más antiguas de vida sobre la Tierra; y los volcanes de fango de Isua habrían proporcionado, ciertamente, un ambiente ideal para la aparición de la vida, con sus aguas cálidas y alcalinas surgiendo de las fumarolas termales. Habrían sido ricas en carbonatos inorgánicos disueltos, y las rocas de serpentina extrudidas, serpentiformes, que son muy porosas, habrían estado perforadas por millones de cavidades minúsculas, cada una de las cuales podría haber sido un microambiente capaz de concentrar y estabilizar minúsculas cantidades de compuestos orgánicos. Quizá la vida se volvió realmente verde por primera vez en el fango de Groenlandia. La pregunta es: ¿cómo?

#### EL PROBLEMA DE LA MUGRE

Por lo general, se acepta que los tres grandes misterios de la ciencia son el origen del universo, el origen de la vida y el origen de la conciencia. La mecánica cuántica está íntimamente implicada en el primero, y ya hemos comentado su posible conexión con el tercero; como no tardaremos en descubrir, también puede ayudar a explicar el segundo misterio. Pero primero debemos examinar si las explicaciones no cuánticas son capaces de proporcionar una explicación completa del origen de la vida.

Los científicos, filósofos y teólogos han meditado durante siglos sobre el origen de la vida y han producido una rica variedad de teorías para explicarlo, desde la creación divina hasta la llamada panspermia, que defiende que alguien sembró nuestro planeta desde el espacio. En el siglo XIX se dio paso a un enfoque científico más riguroso. Charles Darwin propuso que los procesos químicos que tienen lugar en algún «pequeño estanque cálido» pudieron haber conducido a la creación de materia viva. La teoría científica formal que se construyó a partir de las especulaciones de Darwin surgió de forma separada e independiente de un ruso, Aleksandr Oparin, y de un inglés, J. B. S. Haldane, a principios del siglo XX, y en la actualidad se conoce de manera general como la hipótesis de Oparin-Haldane. Ambos propusieron que la atmósfera de la Tierra primitiva era rica en hidrógeno, metano y vapor de agua, que, cuando se hallaban expuestos a relámpagos, radiación solar o calor volcánico, se combinaban para dar una mezcla de compuestos orgánicos simples. Indicaron que esos compuestos se acumularon en el océano primordial para formar una sopa orgánica, cálida y diluida, que permaneció en el agua durante millones de años, quizá fluyendo

sobre los volcanes de fango de Isua, hasta que alguna combinación casual de sus constituyentes dio finalmente origen a una nueva molécula dotada de una propiedad extraordinaria: la capacidad de replicarse.

Haldane y Oparin propusieron que la aparición de este «replicador primordial» fue el acontecimiento clave que condujo al origen de la vida tal como la conocemos. Su éxito posterior habría estado sometido a la selección natural darwiniana. Al ser una entidad muy sencilla, el replicador habría generado muchos errores o mutaciones en su replicación. Estos replicadores mutantes habrían competido entonces con las formas no mutadas por los materiales químicos a partir de los cuales había que construir nuevos replicadores. Los que tuvieron más éxito habrían dejado entonces el mayor número de descendientes, y se habría establecido un proceso molecular de selección natural darwiniana para hacer que el enjambre de replicadores fuese cada vez más eficiente y complejo. Los replicadores que capturaran moléculas accesorias, como péptidos, que catalizaran enzimáticamente su replicación habrían conseguido una ventaja, y algunos incluso pudieron haber quedado encerrados dentro de vesículas (diminutos sacos llenos de líquido o de aire) limitadas por membranas de grasa, como se hallan en la actualidad las células vivas, que las protegieron de los caprichos de su entorno exterior. Una vez encerrado, el interior de la célula habría podido sostener transformaciones *bio* químicas (su metabolismo) para fabricar sus propias biomoléculas y evitar que se filtraran al exterior. Con la capacidad de preservar y sostener un estado interno al tiempo que lo mantenían separado de su ambiente, habría nacido la primera célula viva.

La hipótesis de Oparin-Haldane proporcionó un marco científico que ayudaba a comprender cómo se pudo haber originado la vida sobre la Tierra. Pero durante varias décadas no se puso a prueba dicha teoría, hasta que dos químicos estadounidenses se interesaron en ella.

En la década de 1950, Harold Urey era un científico distinguido pero polémico. Había obtenido el premio Nobel de Química en 1934 por el descubrimiento del deuterio, el isótopo del hidrógeno que, como recordará el lector del capítulo 3, se empleó para estudiar el efecto isotópico cinético en enzimas, momento a partir del cual se demostró que su actividad implica el efecto de túnel cuántico. La experiencia de Urey en la purificación de isótopos hizo que en 1941 lo nombraran jefe de la sección de enriquecimiento de uranio del Proyecto Manhattan, que intentaba desarrollar la bomba atómica. Sin embargo, Urey quedó decepcionado con los objetivos del Proyecto Manhattan y del secreto con que operaba, y más tarde procuró disuadir al presidente de

Estados Unidos, Harry S. Truman, de lanzar la bomba sobre Japón. Después de Hiroshima y Nagasaki, Urey escribió un artículo para la popular revista *Collier's*, titulado «I'm a frightened man», en el que advertía de los peligros que suponían las armas atómicas. Desde su puesto en la Universidad de Chicago también se opuso activamente a la anticomunista «caza de brujas» de McCarthy en la década de 1950, y escribió cartas al presidente Truman en favor de Julius y Ethel Rosenberg, a quienes se juzgó por espionaje y finalmente se los ejecutó por filtrarles secretos atómicos a los soviéticos.

Stanley Miller, el otro químico estadounidense implicado en la tarea de comprobar la hipótesis de Oparin-Haldane, se incorporó a la Universidad de Chicago como estudiante de doctorado en 1951, y trabajó al principio en el problema de la nucleosíntesis de elementos en el interior de las estrellas, bajo la dirección de Edward Teller, el científico conocido como «padre de la bomba de hidrógeno». La vida de Miller sufrió un cambio cuando en octubre de 1951 asistió a una conferencia sobre el origen de la vida impartida por Harold Urey, quien discutió la viabilidad del escenario de Oparin-Haldane y sugirió la necesidad de que alguien hiciera los experimentos. Fascinado, Miller se trasladó del laboratorio de Teller al de Urey y se dispuso a convencer a este para que se convirtiera en su director de tesis y le permitiera realizar los experimentos. Al principio, Urey se mostró escéptico acerca de los planes de su entusiasta estudiante para comprobar la teoría de Oparin-Haldane: calculaba que harían falta millones de años para que las reacciones químicas inorgánicas generaran un número suficiente de moléculas orgánicas como para poder detectarlas... ¡y Miller solo disponía de tres años para obtener su doctorado! No obstante, Urey estaba preparado para concederle el espacio y los recursos que necesitaba entre seis meses y un año. De esta manera, si el experimento no llevaba a ninguna parte, Miller tendría tiempo para pasar a un proyecto de investigación más seguro.

En su intento de replicar las condiciones en que la vida se originó en la Tierra primitiva, Miller simuló la atmósfera primordial limitándose a llenar un frasco con agua, para emular el océano, rellenándolo con los gases que pensaba que habrían estado presentes en la atmósfera: metano, hidrógeno, amoníaco y vapor de agua. Después simuló los relámpagos encendiendo la mezcla con chispas eléctricas. Para sorpresa de Miller, y para asombro general del mundo científico, descubrió que al cabo de solo una semana de descargar chispas en su atmósfera primordial, el frasco contenía cantidades significativas de aminoácidos, los componentes esenciales de las proteínas. El artículo que describía este

experimento se publicó en la revista *Science* en 1953, [1](#) con Miller como único autor, ya que Harold Urey adoptó la más que insólita decisión de insistir en que su estudiante de doctorado obtuviera todo el crédito por el descubrimiento.

El experimento de Miller-Urey (como suele conocerse en la actualidad, a pesar del generoso gesto de Urey) se celebró como el primer paso en la creación de vida en el laboratorio, y todavía se considera un hito de la biología. Aunque no se generaron moléculas autorreplicantes, por lo general se creyó que la sopa «primordial» de Miller de aminoácidos se habría polimerizado para formar péptidos y proteínas complejas y, con el tiempo suficiente y un océano lo bastante grande, habría acabado por producir los replicadores de Oparin-Haldane.

Muchos científicos han repetido el experimento de Miller-Urey desde la década de 1950 para acá. Se ha hecho de muchas maneras distintas y utilizando diferentes mezclas de sustancias químicas, gases y fuentes de energía para generar no solo aminoácidos, sino también azúcares e incluso pequeñas cantidades de ácidos nucleicos. Y sin embargo aquí estamos, más de medio siglo después, sin que ninguna sopa primordial creada en el laboratorio haya producido ningún replicador primordial de Oparin-Haldane. Para comprender por qué, debemos analizar en detalle los experimentos de Miller.

La primera cuestión es la complejidad de la mezcla química que Miller generó. Gran parte del material orgánico se produjo con la forma de un alquitrán complejo, del tipo que resulta familiar a los químicos orgánicos que a menudo ven tales sustancias siempre que sus complejos procedimientos de síntesis química no están estrictamente controlados y se producen gran cantidad de productos incorrectos. En realidad es fácil producir una brea similar en la comodidad de nuestra cocina. Nos basta con quemar la cena: la composición de esa mugre pardo-negrucza tan difícil de eliminar del fondo de la sartén se parece bastante al alquitrán de Miller. El problema de estas mezclas químicas es que a partir de ellas resulta notablemente difícil producir algo más que esa mugre con aspecto de brea. En términos químicos, no son lo que se llama «productivas», porque son tan complejas que cualquier sustancia química específica, como un aminoácido, tiende a reaccionar con tantos otros compuestos diferentes que después se pierde en una selva de reacciones químicas intrascendentes. Millones de cocineros, y miles de estudiantes de química, se han pasado siglos produciendo esta mugre orgánica, cuyo resultado ha sido poco más que una difícil tarea de limpieza.

Imagine el lector que vamos a hacer una sopa primordial rascando toda la mugre del fondo de todas las cacerolas quemadas en todo el mundo, y después disolvemos todos estos millones de moléculas orgánicas complejas en un volumen de agua equivalente a un océano. Añadamos ahora unos cuantos volcanes de fango de Groenlandia como nuestra fuente de energía, y quizá la chispa de unos relámpagos, y removamos. ¿Durante cuánto tiempo tendremos que remover la sopa antes de crear vida? ¿Un millón de años? ¿Cien millones de años? ¿Cien mil millones de años?

Incluso la vida más simple es, de manera muy parecida a esta mugre química, extraordinariamente compleja. Sin embargo, a diferencia de la mugre, también está muy organizada. El problema de usar mugre como material de partida para generar vida organizada es que las fuerzas termodinámicas aleatorias de que se disponía en la Tierra primordial (los movimientos parecidos a los de bolas de billar que discutimos en el capítulo 2) tienden a destruir el orden más que a crearlo. Si ponemos una gallina en la cazuela, la calentamos y la removemos, produciremos caldo de gallina. Nadie ha puesto nunca una lata de sopa en una cazuela y ha producido una gallina.

Desde luego, la vida no empezó con gallinas (o huevos). Los organismos autorreplicantes más básicos en la actualidad son las bacterias, que son mucho más simples que cualquier ave. \* La más sencilla es un micoplasma (la bacteria que utilizó Craig Venter en su experimento de vida sintética, *Mycoplasma* ); pero incluso estos organismos son formas de vida muy complejas. Su genoma codifica casi quinientos genes, que producen un número parecido de proteínas muy complejas que, como enzimas, producen lípidos, azúcares, ADN, ARN, la membrana celular, su cromosoma y otras mil estructuras, cada una de ellas más intrincada que el motor de nuestro automóvil. Y, en realidad, el micoplasma es algo así como un pobre diablo bacteriano, pues no puede sobrevivir por su cuenta y debe obtener muchas de sus biomoléculas de su patrón: es un parásito y, como tal, sería incapaz de sobrevivir en cualquier sopa primordial verosímil. Un candidato más probable sería otro organismo unicelular, una cianobacteria, que es capaz de fotosintetizar para producir todas sus sustancias bioquímicas. De haber estado presentes en la Tierra primitiva, estas cianobacterias habrían sido un posible origen para aquellos bajos niveles de  $^{13}\text{C}$  detectados en las rocas de tres mil setecientos millones de años de antigüedad de Isua, en Groenlandia. Pero esta bacteria es mucho más compleja que un micoplasma, pues tiene un

genoma que codifica casi dos mil genes. ¿Durante cuánto tiempo tendríamos que remover nuestro océano de sopa primordial para producir una cianobacteria?

El astrónomo británico que acuñó el término «Gran Estallido», sir Fred Hoyle, estuvo interesado por los orígenes de la vida durante toda su vida. La probabilidad de que procesos químicos aleatorios aunaran esfuerzos para generar vida, dijo, era tan probable como que un tornado que soplara por un desguace de chatarra ensamblara por azar el reactor de un jumbo. Lo que estaba destacando de manera tan gráfica era que la vida celular, tal como la conocemos en la actualidad, es simplemente demasiado compleja y organizada como para haber surgido solo por azar. Tuvieron que haberla precedido unos autorreplicadores más sencillos.

#### EL MUNDO DEL RNA

Entonces, ¿qué aspecto tenían estos autorreplicadores? ¿Y cómo funcionaban? Puesto que ninguno de ellos ha sobrevivido hasta nuestros días, presumiblemente porque se han extinguido debido a la competencia por parte de sus descendientes más afortunados, su naturaleza es más que nada una hipótesis fundamentada. Una manera de enfocarlo es extrapolar hacia atrás desde las formas de vida más simples de la actualidad para imaginar un autorreplicador mucho más sencillo, una especie de bacteria elemental que pudo haber sido la precursora, hace miles de millones de años, de toda la vida sobre la Tierra.

El problema estriba en que no es posible disecar autorreplicadores más sencillos a partir de células vivas porque ninguno de los componentes de las células es capaz de autorreplicarse por sí mismo. Los genes de ADN no se autorreplican. Dicha tarea corresponde a los enzimas polimerasas del ADN. A su vez, estos no se autorreplican, porque primero necesitan estar codificados en hebras de ADN y ARN.

El ARN tendrá un papel importante en este capítulo, de modo que puede ser útil recordar qué es y qué hace. El ARN es el primo químico más sencillo del ADN, y se presenta como una hélice de una sola hebra en comparación con la doble hélice del ADN. A pesar de esta diferencia, el ARN tiene, aproximadamente, la misma capacidad de codificar información genética que su primo más famoso: lo que pasa es que no posee la copia complementaria de dicha información. Y, exactamente igual que el ADN, su información genética está escrita en cuatro letras genéticas diferentes, de modo que en el ARN pueden codificarse genes de la misma manera que puede hacerse en el ADN. De hecho,

muchos virus, como el de la gripe, poseen genomas de ARN en lugar de genomas de ADN. Pero en las células vivas, como las bacterias o las células de animales o plantas, el ARN lleva a cabo un papel diferente del ADN: la información genética escrita en el ADN se copia primero en ARN según el proceso de lectura génica que discutimos en el capítulo 7. Y puesto que, a diferencia del cromosoma de ADN, relativamente voluminoso e inmóvil, las hebras de ARN, más cortas, tienen libertad para moverse por toda la célula, pueden llevar el mensaje genético de los genes desde el cromosoma hasta la maquinaria de síntesis proteica. Aquí la secuencia de ARN se lee y se traduce en la secuencia de aminoácidos que entra en las proteínas, como los enzimas. De modo que, al menos en las células modernas, el ARN es un intermediario clave entre el código genético escrito en el ADN y las proteínas que producirán todos los demás componentes de nuestras células.

Así pues, volviendo a nuestro problema del origen de la vida, aunque una célula viva como un todo es una entidad autorreplicante, sus componentes individuales no lo son; de la misma manera que una mujer es una autorreplicante (con un poco de «ayuda»), pero su corazón o su hígado no lo son. Esto crea un problema cuando se intenta extrapolar hacia atrás a partir de la compleja vida celular de hoy en día hasta su antepasado no celular, que era mucho más simple. Si se plantea de otra manera, la cuestión es entonces: ¿qué fue primero, el gen de ADN, el ARN o el enzima? Si el ADN o el ARN fueron primero, entonces ¿qué los hizo? Y si el primero fue el enzima, entonces ¿cómo se codificó?

Una posible solución la proporcionó el bioquímico estadounidense Thomas Cech, quien en 1982 descubrió que, además de codificar información genética, algunas moléculas de ARN pueden adoptar la función de los enzimas para catalizar reacciones, trabajo por el que compartió el premio Nobel de Química de 1989 con Sidney Altman. Los primeros ejemplos de estos ribozimas, como se los conoce, se encontraron en los genes de minúsculos organismos unicelulares llamados *Tetrahymena*, que es un tipo de protozoo que se halla en estanques de agua dulce; pero desde entonces se ha encontrado que los ribozimas desempeñan un papel en todas las células vivas. Su descubrimiento se consideró rápidamente como una posible salida del enigma del huevo y la gallina en el origen de la vida. La hipótesis del mundo de ARN, como se la conoció, propone que la síntesis química primordial se tradujo en la generación de una molécula de ARN que podía actuar a la vez como gen y como enzima, de modo que podía codificar su propia estructura (como el ADN) y hacer copias de sí misma (como los enzimas) a partir de las sustancias bioquímicas disponibles en la sopa primordial.



Este proceso de copia habría sido, en un primer momento, muy de prueba y error, y habría dado origen a gran cantidad de versiones mutantes que habrían luchado entre sí en la competencia molecular darwiniana a la que ya nos hemos referido. Andando el tiempo, estos replicadores de ARN habrían reclutado proteínas para mejorar su eficiencia de replicación, lo que habría conducido al ADN y, por último, a la primera célula viva.

La idea de que un mundo de moléculas de ARN autorreplicante precedió a la aparición del ADN y las células es ahora casi un dogma en la investigación sobre el origen de la vida. Se ha demostrado que los ribozimas son capaces de realizar todas las reacciones clave que cabe esperar de cualquier molécula autorreplicante. Por ejemplo, una clase de ribozimas puede unir dos moléculas de ARN, mientras que otra puede separarlas. Y otra forma de ribozima puede hacer copias de hebras cortas (de solo un puñado de bases de longitud) de bases de ARN. A partir de estas actividades sencillas podemos imaginar un ribozima más complejo capaz de catalizar el conjunto completo de reacciones necesarias para la autorreplicación. Una vez que aparece la autorreplicación, también lo hace la selección natural; de modo que el mundo de ARN se habría instalado en una senda competitiva que al final conduciría, o eso se aduce, a la primera célula viva.

Sin embargo, esta situación hipotética presenta varios problemas. Aunque reacciones bioquímicas sencillas pueden ser catalizadas por ribozimas, la autorreplicación de un ribozima es un proceso mucho más complejo que implica el reconocimiento por el ribozima de la secuencia de sus propias bases, la identificación de sustancias químicas idénticas en el ambiente del ribozima, y el ensamblaje de dichas sustancias químicas en la secuencia correcta para hacer una réplica de sí mismo. Esta es una tarea monumental incluso para proteínas que disfruten del lujo de vivir dentro de células repletas de las sustancias bioquímicas correctas, de modo que es incluso más difícil ver cómo ribozimas que sobrevivían en la desorganizada y mugrienta sopa primordial pudieron conseguir dicha hazaña. Hasta la fecha, nadie ha descubierto ni ha conseguido producir un ribozima que pueda realizar una tarea tan compleja, ni siquiera en el laboratorio.

También cabe hablar de un problema fundamental: cómo hacer las propias moléculas de ARN en la sopa primordial. La molécula está constituida por tres piezas: la base de ARN que codifica su información genética (al igual que las bases del ADN codifican la información genética del ADN), un grupo fosfato y un azúcar llamado ribosa. Aunque se ha tenido cierto éxito a la hora de diseñar

reacciones químicas plausibles que pudieran haber hecho las bases de ARN y los componentes de fosfato en la sopa primordial, la reacción más creíble que produce ribosa también produce una plétora de otros azúcares. No se conoce mecanismo no biológico alguno por el que el azúcar ribosa pueda generarse en solitario. E incluso si se produjera ribosa, poner juntos correctamente los tres componentes es en sí misma una tarea formidable. Cuando se ponen juntas las formas plausibles de los tres componentes del ARN nos estamos limitando a combinar de maneras arbitrarias para componer la inevitable mugre primordial. Los químicos eluden este problema al usar formas especiales de bases cuyos grupos químicos se han modificado para evitar estas reacciones secundarias no deseadas... pero esto es hacer trampa y, en cualquier caso, es incluso más improbable que las bases «activadas» se formaran en condiciones primordiales que las bases de ARN originales.

Sin embargo, los químicos pueden sintetizar las bases de ARN a partir de sustancias químicas sencillas si siguen una serie muy compleja de reacciones cuidadosamente controladas en las que cada producto deseado de una reacción se aísla y se purifica antes de llevarlo a la reacción siguiente. El químico escocés Graham Cairns-Smith estimó que hay unos 140 pasos necesarios para la síntesis de una base de ARN a partir de compuestos orgánicos simples que es probable que hubieran estado presentes en la sopa primordial. <sup>2</sup> Para cada paso existe un mínimo de unas seis reacciones alternativas que hay que evitar. Esto hace que la síntesis química sea fácil de visualizar, porque se puede pensar en cada molécula como una especie de dado molecular, y en cada paso como un lanzamiento en el que el número seis representa generar el producto correcto y cualquier otro número indica que se ha hecho el producto equivocado. Así, la probabilidad de que cualquier molécula inicial se convierta finalmente en ARN es equivalente a lanzar un seis 140 veces seguidas.

Desde luego, los químicos mejoran estas probabilidades tremendas al controlar cada paso con detenimiento, pero el mundo prebiótico tuvo que haberse basado únicamente en el azar. ¿Quizás el sol salió en el momento oportuno para evaporar una pequeña charca de sustancias químicas que rodeaba un volcán de fango? ¿O quizás el volcán de fango entró en erupción para añadir agua y un poco de azufre para crear otro conjunto de compuestos? ¿Quizás una tormenta de relámpagos removió la mezcla y aceleró algunos otros cambios químicos con la entrada de energía eléctrica? Las preguntas podrían multiplicarse; pero es bastante fácil calcular la probabilidad de que, basándose tan solo en el azar, cada uno de los 140 pasos necesarios hubiera producido el producto adecuado de los

seis posibles: es de uno en  $6^{140}$  (aproximadamente,  $10^{109}$ ). Para tener una probabilidad estadística de producir ARN por procesos puramente aleatorios necesitaríamos al menos este número de moléculas iniciales en nuestra sopa primordial. Pero  $10^{109}$  es un número muchísimo mayor que incluso el número de partículas fundamentales que existen en todo el universo visible (unas  $10^{80}$ ). La Tierra simplemente no tenía suficientes moléculas, o suficiente tiempo, para producir cantidades significativas de ARN en todos los millones de años que van desde su formación y la aparición de la vida en la época que sugieren las rocas de Isua.

No obstante, imaginemos que, efectivamente, se produjo la síntesis de cantidades significativas de ARN a través de algún proceso químico que todavía no hemos descubierto. Ahora debemos superar el problema igualmente abrumador de enhebrar las cuatro bases de ARN diferentes (equivalentes, el lector lo recordará, a aquellas cuatro letras del código de ADN: A, G, C y T) todas juntas en la secuencia precisamente adecuada para producir un ribozima capaz de autorreplicación. La mayoría de los ribozimas son hebras de ARN de, al menos, cien bases de longitud. En cada posición de la hebra debe estar presente una de las cuatro bases, de modo que hay  $4^{100}$  (o  $10^{60}$ ) maneras diferentes de ensamblar una hebra de ARN de 100 bases de longitud. ¿Qué probabilidad existe de que la mezcla aleatoria de bases de ARN genere la secuencia exactamente adecuada a lo largo de la longitud de la hebra para producir un ribozima autorreplicante?

Puesto que parece que nos estamos divirtiendo mucho con los números grandes, podemos calcularla. Resulta que  $4^{100}$  hebras individuales de ARN de 100 bases de longitud tendrían una masa combinada de  $10^{50}$  kilogramos. De modo que esto es lo que necesitaríamos para poder tener una única copia de la mayoría de las hebras y, por lo tanto, una probabilidad razonable de que una de ellas tuviera todas sus bases dispuestas correctamente para ser un autorreplicador. Sin embargo, se estima que toda la masa de la galaxia de la Vía Láctea es aproximadamente de  $10^{42}$  kilogramos.

Es evidente que no podemos basarnos en el puro azar.

Desde luego, es posible que no haya solo una disposición entre las  $4^{100}$  hebras posibles de ARN de 100 bases de longitud que pueda actuar como autorreplicador. Quizás haya muchas más. Quizás haya incluso billones de posibles replicadores que se pueden formar a partir de las hebras de ARN de 100 bases de longitud. Quizás el ARN autorreplicante es, en realidad, muy común, y solo necesitamos un millón de moléculas para tener alguna probabilidad de

formar un autorreplicador. El problema de esta argumentación es que solo se trata de eso: una argumentación. A pesar de los muchos intentos, nadie ha producido nunca un único ARN replicante (o ADN, o proteína), ni ha observado ninguno en la naturaleza. Esto no es tan sorprendente cuando se considera lo exigente que es la tarea de la autorreplicación. En el mundo actual, se necesita una célula entera para conseguir esta hazaña. ¿Se podría haber conseguido con un sistema mucho más sencillo hace miles de millones de años? Seguro que se logró, porque de lo contrario no estaríamos hoy aquí planteándonos el problema. Pero no está en absoluto claro cómo se consiguió antes de que aparecieran las células por evolución.

Dadas las dificultades de identificar autorreplicadores biológicos, podríamos obtener algún indicio planteando una pregunta más general: ¿cuán fácil es la autorreplicación en cualquier sistema? La tecnología moderna nos ha proporcionado gran cantidad de máquinas que pueden replicar materiales, desde máquinas fotocopadoras hasta impresoras 3D (tridimensionales) pasando por ordenadores electrónicos. ¿Puede alguno de estos dispositivos hacer una copia de sí mismo? Probablemente el que está más cerca es una impresora 3D, como una de las impresoras RepRap (acrónimo de Replicating Rapid prototyper, prototipador replicador y rápido), inventadas por Adrian Bowyer, de la Universidad de Bath, en el Reino Unido. Estas máquinas pueden imprimir sus propios componentes, que después pueden ensamblarse para producir otra impresora 3D RepRap.

Bueno, no del todo. La máquina solo imprime en plástico, pero su propia estructura está hecha de metal, como la mayoría de sus componentes eléctricos. De modo que solo puede replicar sus partes de plástico, que después deben ensamblarse manualmente con partes adicionales para producir una nueva impresora. La idea de los diseñadores es producir impresoras RepRap que se autorrepliquen (existen varios diseños alternativos) y que puedan obtenerse gratis por todo el mundo. Pero en el momento de escribir esto, aún estamos muy lejos de construir una máquina verdaderamente autorreplicante.

Así pues, si buscar máquinas autorreplicantes no nos ayuda realmente en nuestro empeño por descubrir lo fácil o difícil que es la autorreplicación, ¿podemos dejar completamente de lado el mundo material y explorar esta cuestión dentro de un ordenador, donde estas sustancias químicas complejas y difíciles de producir pueden sustituirse por las piezas fundamentales básicas del mundo digital, a saber, los bits que solo pueden tener un valor de 1 o 0? Un byte de datos, que consiste en ocho bits, representa un único carácter de texto en un

código de ordenador y puede equipararse aproximadamente con la unidad de código genético: una base de ADN o ARN. Ahora podemos plantear la pregunta: entre todas las posibles hebras de bytes, ¿cuán comunes son las que pueden autorreplicarse en un ordenador?

Aquí tenemos una enorme ventaja, porque las hebras de bytes autorreplicantes son, en realidad, muy comunes: las conocemos como virus informáticos. Se trata de programas informáticos relativamente cortos que pueden infectar nuestros ordenadores al convencer a su CPU para que haga gran cantidad de copias. Después, estos virus informáticos saltan a nuestro correo electrónico para infectar los ordenadores de nuestros amigos y colegas. De modo que si consideramos la memoria del ordenador como una especie de sopa digital primordial, entonces puede considerarse que los virus informáticos son el equivalente digital de los autorreplicadores primordiales.

Uno de los virus informáticos más sencillos, Tinba, tiene solo 20 kilobytes de longitud: muy corto si se compara con la mayoría de los programas informáticos. Pero en 2012, Tinba consiguió atacar los ordenadores de grandes bancos, se introdujo en sus buscadores y robó datos de usuarios; de modo que era, claramente, un formidable autorreplicador. Aunque 20 kilobytes puede ser muy corto para un programa informático, no obstante comprende una ristra relativamente larga de información digital pues, con 8 bits por cada byte, corresponde a 160.000 bits de información. Puesto que cada bit puede hallarse en uno de dos estados (0 o 1), podemos calcular fácilmente la probabilidad de generar ristas de dígitos binarios de manera aleatoria. Por ejemplo, las probabilidades de generar una ristra concreta de tres bits, pongamos 111, es de  $1/2 \times 1/2 \times 1/2$ , o una probabilidad entre  $2^3$ . Con la misma lógica matemática, se sigue que la probabilidad de llegar por azar a una ristra específica de 160.000 bits de longitud, la longitud de Tinba, es de uno entre  $2^{160.000}$ . Este es un número alucinantemente pequeño, y nos dice que Tinba no pudo haber surgido tan solo por azar.

Quizás existen ahí afuera, tal como hemos conjeturado para las moléculas de ARN, muchísimos códigos autorreplicantes que son mucho más sencillos que Tinba y que pueden haber surgido por azar. Pero si este fuera el caso, entonces lo más seguro es que ya habría surgido de manera espontánea un virus informático a partir de todos los tropecientos miles de trillones de gigabytes de código de ordenador que fluyen a través de internet cada segundo. Al fin y al cabo, la mayoría de dichos códigos son meras secuencias de unos y ceros (piense el lector en todas las imágenes y películas que se descargan en cada segundo).

Tales códigos son potencialmente funcionales en términos de instruir a nuestras CPU para que realicen operaciones básicas, como copiar o borrar; pero todos los virus informáticos que hasta ahora han infectado los ordenadores muestran la rúbrica inequívoca del diseño humano. Hasta donde sabemos, el vasto río de información digital que fluye a diario alrededor del mundo no ha generado todavía ningún virus informático de manera espontánea. Incluso dentro del ambiente favorable a la replicación de un ordenador, la autorreplicación es difícil y, hasta donde sabemos, tampoco se ha producido nunca de manera espontánea.

ENTONCES, ¿PUEDE AYUDAR LA MECÁNICA CUÁNTICA?

Esta excursión en el mundo digital expone el problema esencial de la investigación del origen de la vida, que se reduce a la naturaleza del motor de búsqueda utilizado para poner sus ingredientes necesarios juntos y en la configuración correcta para formar un autorreplicador. Fueran las que fueren las sustancias químicas de que se disponía en la sopa primordial, habrían tenido que explorar un enorme espacio de posibilidades para dar con un autorreplicador sumamente raro. ¿Podría ser que nuestro problema fuera que estamos confinando la rutina de búsqueda a las reglas del mundo clásico? El lector recordará del capítulo 4 que los teóricos cuánticos del MIT eran al principio muy escépticos acerca del informe del *New York Times* en el que se planteaba que las plantas y los microbios ponían en marcha una rutina de búsqueda cuántica. Pero al final se convencieron ante la idea de que los sistemas fotosintéticos llevaban a cabo una estrategia de búsqueda cuántica, llamada paseo cuántico. Varios investigadores, nosotros entre ellos, [3](#) han explorado la idea de que en el origen de la vida pudo haber implicado asimismo algún tipo de escenario de búsqueda cuántica.

Imaginemos una diminuta charca primordial encerrada dentro de un poro de estas rocas de serpentina extruidas de un volcán de fango bajo el antiguo mar de Isua hace tres mil quinientos millones de años, cuando se estaban formando los estratos de gneis de Groenlandia. Aquí es donde pudo haberse formado el «pequeño estanque cálido, con todo tipo de sales de amoníaco y fosfóricas, luz, calor y electricidad presentes» de Darwin, en el que pudo haberse generado «un compuesto proteínico [...] listo para experimentar cambios todavía más complejos». Ahora, imaginemos además que «un compuesto proteínico» (que podría haber sido asimismo una molécula de ARN), producido por el tipo de procesos químicos que Stanley Miller descubrió, es una especie de protoenzima

(o ribozima) que tiene alguna actividad enzimática, pero que todavía no es una molécula autorreplicante. Imaginemos además que algunas de las partículas de este enzima pueden desplazarse a diferentes posiciones pero que las barreras energéticas clásicas les impiden hacerlo. Sin embargo, tal como discutimos en el capítulo 3, tanto los electrones como los protones pueden atravesar, mediante el efecto de túnel cuántico, barreras energéticas que prohíben su transbordo clásico, una característica que es crucial para la acción enzimática. En efecto, el electrón o protón existe de manera simultánea a ambos lados de la barrera. Si imaginamos que esto ocurre dentro de nuestros protoenzimas, entonces cabría esperar que las configuraciones diferentes (encontrar la partícula a cada lado de la barrera energética) estuvieran asociadas con distintas actividades enzimáticas, es decir, capacidades para acelerar diversos tipos de reacciones químicas, incluso quizás una reacción de autorreplicación.

Solo para hacer que los números sean fáciles de operar, imaginemos que hay un total de 64 protones y electrones en nuestro protoenzima imaginario, cada uno de los cuales puede, mediante el efecto de túnel cuántico, hallarse en cualquiera de dos posiciones diferentes. La cantidad total de variación estructural disponible para nuestro protoenzima imaginario sigue siendo enorme:  $2^{64}$ , una formidable cantidad de posibles configuraciones. Ahora imaginemos que solo una de dichas configuraciones tiene lo que hace falta para convertirse en un enzima autorreplicante. La pregunta es: ¿cuán fácil es encontrar la configuración concreta que pudo conducir a la aparición de la vida? ¿Se realizará alguna vez el autorreplicador en nuestro minúsculo estanque cálido?

Pensemos primero en el protoenzima como una molécula totalmente clásica, incapaz de efectuar ningún truco cuántico, como la superposición o el efecto de túnel. La molécula debe estar, en cualquier momento dado, en solo una de las  $2^{64}$  configuraciones diferentes posibles, y la probabilidad de que este protoenzima sea un autorreplicador es de 1 dividido por  $2^{64}$ : una probabilidad sumamente pequeña. Con una probabilidad abrumadora, el protoenzima clásico se verá atascado en una de las aburridas configuraciones que no pueden autorreplicarse.

Desde luego, las moléculas cambian como resultado del desgaste termodinámico general, pero en el mundo clásico este cambio es relativamente lento. Para que una molécula se modifique, la disposición original de los átomos debe dismantelarse y sus partículas constituyentes deben reorganizarse para formar una nueva configuración molecular. Tal como descubrimos en el capítulo 3 con el colágeno de dinosaurio, de vida larguísima, a veces los cambios químicos pueden tener lugar a lo largo de escalas de tiempo geológico.

Considerado en términos clásicos, nuestro protoenzima tardaría muchísimo tiempo en explorar siquiera una fracción minúscula de estas  $2^{64}$  configuraciones químicas.

Sin embargo, la situación es radicalmente diferente si consideramos que las 64 partículas clave en el protoenzima son electrones y protones que pueden emplear el efecto de túnel para atravesar entre sus posiciones alternativas. Al ser un sistema cuántico, el protoenzima puede existir de manera simultánea en todas sus configuraciones posibles como una superposición cuántica. La razón por la que antes hemos elegido el número 64 resulta ahora más clara; es el mismo número que exploramos cuando nos referimos a la metedura de pata del emperador chino con respecto al tablero de ajedrez para ilustrar la potencia de la computación cuántica en el capítulo 8; aquí las partículas cuánticas adoptan el papel de las casillas en el tablero o cubits. Nuestro protoautorreplicador podría, de sobrevivir el tiempo suficiente, actuar como un ordenador cuántico de 64 cubits; y ya hemos descubierto lo potente que sería un dispositivo de este tipo. Quizá pueda usar sus enormes recursos de cómputo cuántico para computar la respuesta a la siguiente pregunta: ¿cuál es la configuración molecular correcta para un autorreplicador? De esta guisa, el problema y su solución potencial se hacen más claros. Consideremos que el protoenzima se encuentra en dicha superposición cuántica, y el problema de búsqueda para encontrar una estructura que sea el autorreplicador entre las  $2^{64}$  posibles se hace soluble.

Pero hay una complicación. El lector recordará que los cubits tienen que permanecer coherentes y entrelazados con el fin de efectuar la computación cuántica. Una vez que aparece la decoherencia, la superposición de  $2^{64}$  estados diferentes se viene abajo y solo queda uno. ¿Ayuda esto? A primera vista, no, porque la probabilidad de que la superposición cuántica se desplome en el único estado autorreplicante es la misma que antes: un minúsculo 1 dividido por  $2^{64}$ , la misma probabilidad que obtener cara 64 veces seguidas en un lanzamiento de monedas. Pero lo que ocurre acto seguido marca la diferencia entre la descripción cuántica y su equivalente clásico.

Si una molécula no se comporta con arreglo a la mecánica cuántica y se encuentra, como es casi seguro que ocurrirá, con la disposición equivocada de átomos que es incapaz de autorreplicar, probar con una configuración diferente tendría que implicar el proceso geológicamente lento de dismantelar y reorganizar los enlaces moleculares. Pero después de la decoherencia de la molécula cuántica equivalente, cada uno de los 64 electrones y protones de nuestro protoenzima estará listo, de manera casi instantánea, para volver a



hallarse, mediante el efecto de túnel, en una superposición de todas sus posiciones posibles para restablecer la superposición cuántica original de  $2^{64}$  configuraciones diferentes. En su estado de 64 cubits, la molécula protorreplicadora cuántica podría repetir una y otra vez su búsqueda de autorreplicación en el mundo cuántico.

La decoherencia haría desplomarse de nuevo rápidamente la superposición, pero esta vez la molécula se encontraría en otra de sus  $2^{64}$  diferentes configuraciones clásicas. De nuevo, la decoherencia comportaría que la superposición se viniera abajo, y de nuevo el sistema se encontraría en otra configuración; y este proceso continuaría de manera indefinida. En esencia, en este ambiente relativamente protegido, la formación y destrucción del estado de superposición cuántica es un proceso reversible: los procesos de superposición y decoherencia, que son mucho más rápidos que la formación y destrucción clásicas de enlaces químicos, lanzan la moneda cuántica una y otra vez.

Pero hay un acontecimiento por el que dejarán de lanzarse monedas cuánticas. Si la molécula protorreplicadora cuántica acaba por desplomarse en un estado de autorreplicación, empezará a replicar y, al igual que en las células de *E. coli* privadas de nutrientes de las que hablamos en el capítulo 7, la replicación obligará al sistema a efectuar una transición irreversible hacia el mundo clásico. La moneda cuántica se habrá lanzado de manera irreversible, y el primer autorreplicador habrá nacido en el mundo clásico. Desde luego, esta replicación tendrá que implicar algún tipo de proceso bioquímico dentro de la molécula, o entre esta y su entorno, que sea claramente diferente de los que tuvieron lugar antes de que se encontrara la disposición protorreplicadora. En otras palabras, es necesario que haya un mecanismo que ancle esta configuración especial en el mundo clásico antes de que se pierda y de que la molécula pase a la siguiente disposición cuántica.

#### ¿QUÉ ASPECTO TENÍA EL PRIMER AUTORREPLICADOR?

El panorama que hemos esbozado arriba es, desde luego, mera especulación. Pero si la búsqueda del primer autorreplicador no tuvo lugar en el mundo clásico sino en el cuántico, al menos en potencia resuelve el problema de la búsqueda del autorreplicador.

Para que esta situación hipotética funcione, la biomolécula primordial (el protoautorreplicador) tuvo que haber sido capaz de explorar gran cantidad de estructuras diferentes mediante el efecto de túnel cuántico de sus partículas en

diferentes posiciones. ¿Sabemos qué tipo de moléculas serían capaces de realizar este truco? Bueno, en cierta medida, sí. Tal como ya hemos descubierto, los electrones y protones de los enzimas se hallan fijados de manera relativamente laxa, lo que les permite pasar fácilmente a diferentes posiciones gracias al efecto de túnel. Los protones del ADN y el ARN también son capaces de emplear el efecto de túnel, al menos a través del puente de hidrógeno. De modo que podríamos imaginar que nuestro autorreplicador primordial era algo parecido a una molécula de proteína o ARN que se mantenía íntegra de manera laxa mediante enlaces de hidrógeno y enlaces electrónicos débiles que permitían que sus partículas (protones y electrones) se desplazaran libremente a través de su estructura para formar una superposición de sus billones de configuraciones diferentes.

¿Existe alguna prueba de tal situación hipotética? Apoorva D. Patel, un físico del Centro para la Física de Altas Energías del Instituto Indio de Ciencia, en Bangalore, es uno de los expertos mundiales en algoritmos cuánticos: el equipo lógico de los ordenadores cuánticos. Apoorva sugiere que hay aspectos del código genético (las secuencias de bases del ADN que codifican un aminoácido u otro) que delatan su origen como un código cuántico. <sup>4</sup> No es este el lugar para entrar en detalles técnicos (porque ello nos llevaría a profundizar demasiado en las matemáticas de la teoría de la información cuántica), pero su idea no debería suponer ninguna sorpresa. En el capítulo 4 vimos cómo, en la fotosíntesis, la energía del fotón se transfiere al centro de reacción siguiendo múltiples rutas a la vez: un paseo cuántico aleatorio. Después, en el capítulo 8 discutimos la idea de la computación cuántica y si la vida podía hacer uso de algoritmos cuánticos para mejorar la eficiencia de determinados procesos biológicos. De manera parecida, situaciones hipotéticas sobre el origen de la vida que implican mecánica cuántica, aunque meras especulaciones, no son nada más que una extensión de estas ideas: la posibilidad de que la coherencia cuántica en el campo de la biología desempeñara el tipo de papel en el origen de la vida que actualmente desempeña en las células vivas.

Desde luego, cualquier situación hipotética que implique la participación de la mecánica cuántica en el origen de la vida hace tres mil millones de años sigue siendo mera especulación. Pero, como hemos visto, incluso las explicaciones clásicas del origen de la vida están repletas de problemas: ¿no es fácil crear la vida a partir de la nada! Al proporcionar estrategias de búsqueda más eficientes, la mecánica cuántica pudo haber conseguido que la tarea de construir un autorreplicador fuera un poco más fácil. Casi con toda seguridad, esto no lo

explica todo; pero la mecánica cuántica pudo haber hecho que la aparición de la vida en aquellas rocas antiguas de Groenlandia fuera mucho más probable.

## BIOLOGÍA CUÁNTICA: LA VIDA EN EL LÍMITE DE UNA TEMPESTAD

«Extraño» es el adjetivo que con mayor frecuencia se usa para describir el campo de la mecánica cuántica. Y es extraño. Cualquier teoría que permita a objetos pasar a través de barreras impenetrables, estar en dos lugares a la vez, o poseer «conexiones fantasmales» no puede describirse como ordinaria. Pero en realidad su estructura matemática es absolutamente lógica y consistente, y describe de manera precisa la manera en que el mundo es al nivel de las partículas y las fuerzas fundamentales. La mecánica cuántica es así el cimiento de la realidad física. Los niveles discretos de energía, la dualidad onda-partícula, la coherencia, el enmarañamiento y el efecto de túnel no son solo ideas interesantes relevantes únicamente para científicos que trabajan dentro de laboratorios de física enrarecidos. Son tan reales y tan normales como la tarta de manzana de la abuela y, de hecho, están dentro de la tarta de manzana de la abuela. La mecánica cuántica es normal. Es el mundo que describe lo que es extraño.

Pero, tal como hemos descubierto, la mayoría de las características de la materia a la escala cuántica que son contrarias al sentido común desaparecen en los turbulentos interiores termodinámicos de los objetos grandes por el proceso que denominamos decoherencia, y dejan solo nuestro mundo clásico familiar. De modo que podemos considerar que la realidad física consiste en tres niveles (véase figura 10.1). En la superficie están los objetos macroscópicos cotidianos, como balones de fútbol, trenes y planetas, cuyo comportamiento general se ajusta a las leyes del movimiento de la mecánica newtoniana, que implican conceptos tan familiares como velocidad, aceleración, momento y fuerzas. La capa intermedia es el estrato termodinámico que describe el comportamiento de los líquidos y los gases. Aquí se aplican las mismas reglas newtonianas clásicas; pero, tal como Schrödinger señaló y como describimos en el capítulo 2, estas leyes de la termodinámica subyacentes, que describen por ejemplo cómo se expande un gas cuando es calentado o cómo un motor de vapor hace que los trenes suban pendientes, se basan en el «orden a partir del desorden» que promedia el entorchocar desordenado, como el de bolas de billar, de billones de

átomos y moléculas. El tercer nivel, el más profundo, son los cimientos de la realidad: el mundo cuántico. Aquí es donde el comportamiento de átomos y moléculas y de las partículas de que están hechos obedece las reglas precisas y ordenadas de la mecánica cuántica, no de la clásica. Sin embargo, la mayoría de las extrañas cosas cuánticas suele permanecer invisible para nosotros. Solo cuando observamos con detenimiento moléculas individuales, por ejemplo en el experimento de la doble rendija, vemos las leyes cuánticas, que son más profundas. El comportamiento que describen nos parece raro porque, por lo general, vemos la realidad a través de un filtro de decoherencia que despoja todo el carácter extraño de los objetos mayores.

La mayoría de los organismos vivos son objetos relativamente grandes. Como los trenes, balones de fútbol y balas de cañón, su movimiento general se ajusta muy bien a las leyes newtonianas: un hombre disparado por un cañón tiene una trayectoria similar a la de una bala de cañón. A un nivel más profundo, la fisiología de tejidos y células también es bien descrita por las leyes de la termodinámica: la expansión y contracción de un pulmón no es tan diferente de la expansión y contracción de un globo. De modo que a primera vista tenderíamos a suponer, y la mayoría de los científicos han supuesto, que el comportamiento cuántico se ha eliminado asimismo en petirrojos, peces, dinosaurios, manzanos, mariposas y nosotros, tal como ocurre con otros objetos clásicos. Pero hemos visto que esto no es siempre cierto para la vida; sus raíces se adentran desde la superficie newtoniana, atraviesan las turbulentas aguas termodinámicas y penetran en los cimientos cuánticos, lo que permite que la vida utilice la coherencia, la superposición, el efecto de túnel cuántico o el entrelazamiento (véase figura 10.1). La pregunta que queremos plantear en este capítulo final es ¿cómo?

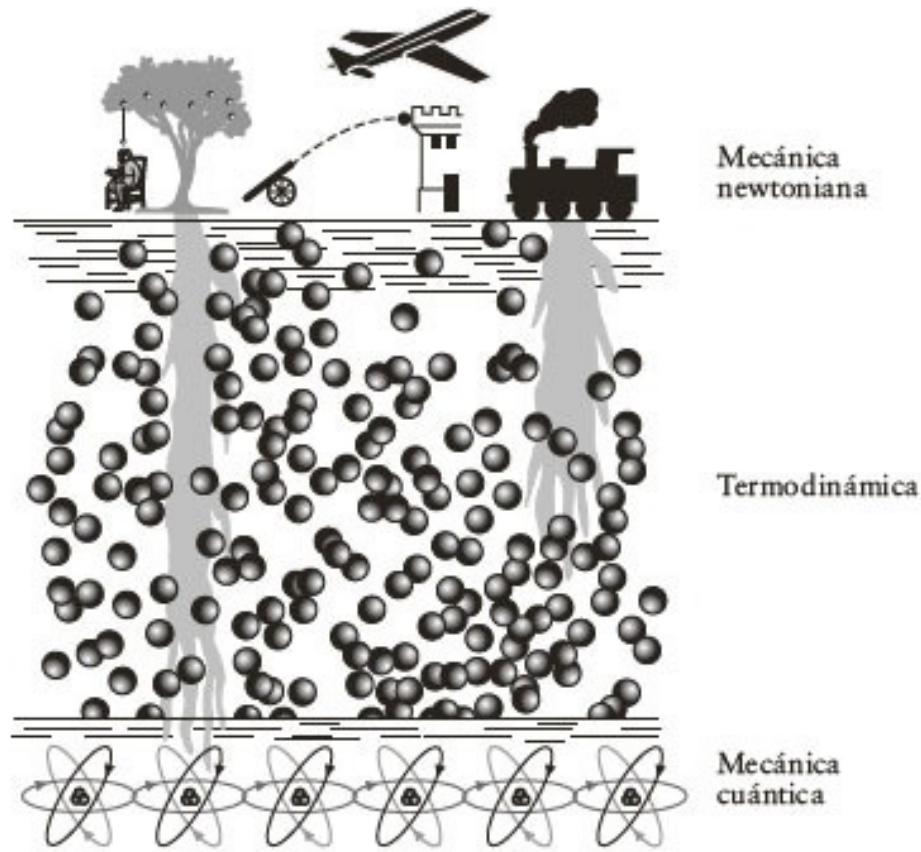


FIGURA 10.1. Los tres estratos de la realidad. La capa superior es el mundo visible, lleno de objetos tales como manzanas que caen del árbol, balas de cañón, trenes de vapor y aviones, cuyos movimientos son descritos por la mecánica newtoniana. Debajo de esta capa se halla la capa termodinámica de partículas parecidas a bolas de billar, cuyo movimiento es casi completamente aleatorio. Esta capa es responsable de generar las leyes de «orden a partir del desorden» que rigen el comportamiento de objetos tales como las máquinas de vapor. Debajo de esta capa nos encontramos con la de las partículas fundamentales, gobernadas por leyes cuánticas ordenadas. Las características visibles de la mayoría de los objetos que vemos a nuestro alrededor parecen estar arraigadas en las capas newtoniana o termodinámica, pero los organismos vivos poseen raíces que penetran directamente hasta la roca madre cuántica de la realidad.

Ya hemos explorado parte de la respuesta. Erwin Schrödinger indicó hace más de sesenta años que la vida es diferente del mundo inorgánico porque está estructurada y ordenada incluso a un nivel molecular. Este orden a todos los niveles dota a la vida de una especie de ventaja rígida que conecta lo molecular a lo macroscópico, de manera que los acontecimientos cuánticos que tienen lugar dentro de biomoléculas individuales pueden tener consecuencias para un organismo entero: el tipo de amplificación de lo cuántico a lo macroscópico que aseveró otro pionero cuántico, Pascual Jordan.

Desde luego, cuando Schrödinger y Jordan escribían sobre biología, nadie sabía de qué estaba hecho un gen o cómo funcionaban los enzimas o la

fotosíntesis. Pero medio siglo de investigación intensiva en biología molecular nos ha proporcionado un mapa extraordinariamente detallado de la estructura de las biomoléculas al nivel de los átomos individuales en el ADN o las proteínas. Y, como hemos descubierto, las intuiciones clarividentes de los pioneros cuánticos han sido vindicadas, aunque con retraso. Se conoce la estructura de fotosistemas, enzimas, cadenas respiratorias y genes hasta la posición de partículas concretas, y sus movimientos cuánticos suponen realmente una diferencia en la respiración que nos mantiene vivos, en los enzimas que construyen nuestro cuerpo o la fotosíntesis que produce casi toda la biomasa de nuestro planeta.

Pero continúan abiertas muchas preguntas, sobre todo con relación a cómo la vida consigue mantener la coherencia cuántica en el mar cálido y húmedo de las biomoléculas del interior de una célula viva. Las proteínas o el ADN no son máquinas de acero con partes rígidas, como los instrumentos usados para detectar efectos cuánticos en los laboratorios de física; son estructuras blandas y flexibles que se hallan constantemente sometidas a sus propias vibraciones térmicas, así como continuamente golpeadas por las sacudidas de las bolas de billar moleculares que las rodean, una descarga constante de ruido molecular. \* Cabría esperar que estas vibraciones y colisiones aleatorias destruyeran la delicada disposición de átomos y moléculas que estas partículas necesitan para mantener su comportamiento cuántico. Cómo esta coherencia se conserva en la biología sigue siendo un enigma; pero, como descubriremos, se trata de un enigma que está empezando a desvelarse para revelar fascinantes conocimientos acerca de cómo funciona la vida; conocimientos que incluso podrían explotarse para impulsar las tecnologías cuánticas del futuro.

BUENAS BUENAS BUENAS BUENAS VIBRACIONES (BOP BOP)

Pocos libros de divulgación científica requieren revisión mientras se escriben; pero en este capítulo final describiremos resultados que están apareciendo ahora mismo. De hecho, la ciencia de la biología cuántica se mueve tan deprisa y en tantos frentes diferentes que resulta inevitable pensar que este libro estará un poco anticuado cuando se publique. Las mayores sorpresas que surgirán de estudios recientes son nuevos conocimientos de cómo la vida se las arregla con vibraciones o ruido molecular.

Algunos de los nuevos resultados más apasionantes en esta área provienen de los últimos estudios de la fotosíntesis. El lector recordará del capítulo 4 que

microbios y hojas de plantas están repletos de cloroplastos llenos de bosques de moléculas del pigmento clorofila, y que el primer paso de la fotosíntesis implica la captación de un fotón de luz por una molécula de pigmento y su conversión en un excitón oscilante que es rápidamente enviado a través del bosque de clorofila hasta el centro de reacción. Recordará también que la rúbrica de la coherencia, la pulsación cuántica, se detectó en este proceso de transporte de energía: prueba de que su cerca del cien por cien de eficiencia se debe a los excitones que efectúan su paseo cuántico hasta el centro de reacción. Pero, hasta una fecha reciente, ha sido un enigma la manera en que los excitones mantienen su comportamiento ondulatorio coherente al tiempo que pasean a través del ambiente molecularmente ruidoso de una célula viva. Ahora hemos descubierto que la respuesta parece ser que los sistemas vivos no intentan evitar la vibración molecular: por el contrario, bailan a su ritmo.

En el capítulo 4 consideramos que la coherencia cuántica en la fotosíntesis era una especie de versión molecular de una orquesta que estaba «entonada» y «acompañada», con todas las moléculas de pigmento coherentes tocando al mismo ritmo. Pero el problema que el sistema debe superar es que el interior de la célula es muy ruidoso. Esta orquesta molecular no está tocando en una tranquila sala de conciertos, sino en algo más parecido a un atareado centro de ciudad, en medio de una cacofonía de ruido molecular que perturba a cada uno de los músicos, de modo que es probable que las oscilaciones de sus excitones pierdan su entonación, provocando que su delicada coherencia cuántica se pierda.

Este reto es conocido por los físicos e ingenieros que intentan construir dispositivos tales como ordenadores cuánticos. Estos suelen usar dos estrategias principales para mantener el ruido a raya. La primera es que, siempre que pueden, enfrían sus sistemas hasta que están muy cerca del cero absoluto. A estas bajísimas temperaturas, las vibraciones moleculares se amortiguan, lo que a su vez suaviza el ruido molecular. En segundo lugar, aíslan su equipo dentro del equivalente molecular de un estudio de grabación, con lo que mantienen a raya cualquier ruido ambiental. No hay estudios de grabación dentro de las células vivas, y las plantas y los microbios viven en ambientes cálidos; así pues, ¿cómo mantienen los fotosistemas su coherencia cuántica armoniosa durante tanto tiempo?

La respuesta parece estribar en que los centros de reacción fotosintéticos explotan dos variedades de ruido molecular para mantener la coherencia en lugar de destruirla. La primera es un ruido relativamente débil y de bajo nivel, llamado



a veces ruido blanco, que es algo así como la estática de televisión o radio que se extiende por todas las frecuencias. <sup>\*</sup> Este ruido blanco procede de los empujones térmicos moleculares de todas las moléculas circundantes, como el agua o iones metálicos, que se hallan empaquetadas dentro de las células vivas. El segundo tipo, que a veces se denomina ruido de color, es «más ruidoso» y se limita a determinadas frecuencias, del mismo modo que la luz de color (visible) se limita a una estrecha banda de frecuencias en el espectro electromagnético. El origen del ruido de color son las vibraciones de las mayores estructuras dentro del cloroplasto, como las moléculas de pigmento (clorofila) y los andamios proteínicos que las mantienen en su lugar, que están compuestas de hebras de cuentas de aminoácidos que están dobladas y retorcidas en formas adecuadas para albergar moléculas del pigmento. Sus curvas y giros son flexibles y pueden vibrar, pero solo lo hacen a determinadas frecuencias, algo así como las cuerdas de una guitarra. Las propias moléculas de pigmento tienen asimismo sus propias frecuencias de vibración. Estas vibraciones generan el ruido de color que, como una cuerda musical, apenas está compuesto por unas pocas notas. Tanto el ruido blanco como el de color parecen ser explotados por los sistemas de reacción fotosintéticos para ayudar a guiar al excitón coherente hasta el centro de reacción.

Una pista de cómo la vida explota este tipo de vibración molecular fue descubierta de manera independiente por dos grupos en 2008-2009. Uno era el equipo, que por aquel entonces tenía su base en el Reino Unido, de Martin Plenio y Susana Huelga, marido y mujer, que hacía tiempo que estaban interesados por los efectos del «ruido» externo sobre la dinámica de los sistemas cuánticos y, por ello, no se sorprendieron cuando supieron del experimento de Graham Fleming en 2007 sobre la fotosíntesis, que comentamos en el capítulo 4. Publicaron a toda prisa varios artículos, que ahora se citan una y otra vez, y que proporcionaban un modelo de lo que creían que ocurría. <sup>1</sup> Propusieron que el ruido interior de una célula viva podría actuar para impulsar la dinámica cuántica y mantener la coherencia cuántica en complejos fotosintéticos y otros sistemas biológicos, en lugar de destruirla.

El segundo grupo, que residía al otro lado del Atlántico, tenía la base en el MIT, trabajaba en información cuántica y lo dirigía Seth Lloyd, quien en un primer momento pensaba que la mecánica cuántica de las plantas era una idea loca. Junto a colegas de la vecina Universidad de Harvard, Lloyd estudió de manera más pormenorizada el complejo fotosintético algal en el que Fleming y Engel habían detectado pulsación cuántica. <sup>2</sup> Demostraron que el ruido

ambiental puede retardar o acelerar el transporte del excitón cuántico, en función de lo intenso que sea dicho ruido. Si el sistema es demasiado frío y silencioso, entonces el excitón tiende a oscilar al tuntún sin llegar a ningún sitio en particular; mientras que en un ambiente muy cálido y ruidoso aparece algo llamado el efecto Zenón cuántico, que retrasa el transporte cuántico. Entre estos dos extremos hay una «zona Ricitos de Oro» <sup>\*</sup> en la que las vibraciones son las adecuadas para el transporte cuántico.

El efecto Zenón cuántico se llama así por el antiguo filósofo griego Zenón de Elea, quien planteaba problemas filosóficos en forma de un conjunto de paradojas, una de las cuales se conoce como la paradoja de la flecha. Zenón consideraba una flecha en vuelo que, aseguraba, debía encontrarse en una posición determinada en el espacio en cada instante del tiempo. Si se pudiera entrever la flecha en determinado instante, entonces sería indistinguible de una flecha realmente inmóvil que estuviera suspendida en la misma posición. La paradoja estriba en que el vuelo de la flecha consiste en una secuencia de estas rebanadas de tiempo congeladas, con una flecha inmóvil en cada punto a lo largo de su recorrido. Pero cuando se ponen todas las rebanadas juntas, la flecha se mueve. Así pues, ¿cómo puede una secuencia de estos movimientos cero sumar para producir un movimiento real? Ahora sabemos la respuesta: una duración finita de tiempo no está hecha de una secuencia de unidades indivisibles de tiempo cero. Pero esta resolución tuvo que esperar hasta el invento del cálculo en el siglo XVII, más de dos mil años después de que Zenón planteara su enigma. No obstante, la paradoja de Zenón sobrevive, al menos en nombre, en una de las características más peculiares de la mecánica cuántica. Las flechas cuánticas pueden realmente congelarse en el tiempo por el acto de la observación.

En 1977, unos físicos de la Universidad de Texas publicaron un artículo que demostraba que algo parecido a la paradoja de la flecha de Zenón puede ocurrir en el mundo cuántico. <sup>3</sup> El efecto Zenón cuántico, como llegó a conocerse, describe que las observaciones continuas pueden impedir que ocurran acontecimientos cuánticos. Por ejemplo, un átomo radiactivo, si se observa de manera detenida y continua, nunca se desintegrará, un efecto que suele describirse en términos del viejo refrán «olla vigilada nunca hierve». Las ollas reales, desde luego, acaban por hervir; pero parece que el tiempo se hace más lento cuando uno necesita desesperadamente una taza de té. Sin embargo, como Heisenberg indicó, en el ámbito cuántico el acto de observar (medir) altera de manera inevitable el estado de lo que se está observando.

Para ver en qué medida puede la paradoja de Zenón ser relevante para la vida,

volveremos al paso de transporte de energía de la fotosíntesis. Imaginemos que una hoja acaba de captar un fotón solar y ha convertido su energía en un excitón. Considerado de manera clásica, el excitón es una partícula que está localizada en el espacio y en el tiempo. Pero, tal como reveló el experimento de doble rendija, las partículas cuánticas poseen asimismo un carácter ondulatorio difuso que les permite existir en múltiples lugares simultáneamente como una superposición cuántica. El carácter ondulatorio del excitón es esencial para un transporte cuántico eficiente, porque este le permite, como una onda de agua, explorar múltiples rutas de manera simultánea. Pero si su ondulación cuántica rompe en las rocas molecularmente ruidosas de la decoherencia del interior de la hoja, entonces su carácter ondulatorio se perderá y se convertirá en una partícula localizada y fija en una única posición. El ruido actúa esencialmente como una especie de medición continua, y si es muy intensa entonces la decoherencia tendrá lugar de manera muy rápida, antes de que la coherencia cuántica tenga la oportunidad de ayudar a la onda del excitón a alcanzar su destino. Este es el efecto Zenón cuántico: desplomar una y otra vez la onda cuántica en el mundo clásico.

Cuando el equipo del MIT valoró la influencia del ruido o vibraciones moleculares en el complejo fotosintético bacteriano, se descubrió que el transporte cuántico era óptimo a temperaturas cercanas a aquellas a las que los microbios y las plantas realizan la fotosíntesis. Esta correspondencia perfecta entre la eficiencia óptima de transporte y el tipo de temperaturas en el que viven los organismos vivos es notable y, según afirma el equipo, sugiere que tres mil millones de años de selección natural han ajustado el diseño evolutivo a nivel cuántico del transporte del excitón para optimizar la reacción bioquímica más importante de la biosfera. Tal como indican en un artículo posterior, «la selección natural tiende a conducir a los sistemas cuánticos hasta el grado de coherencia cuántica “perfecto” para conseguir la máxima eficiencia». <sup>4</sup>

Sin embargo, las buenas vibraciones moleculares no se limitan a la variedad del ruido blanco. Ahora se piensa que también el ruido «de color», generado por un conjunto limitado de vibraciones de las propias moléculas de clorofila, o incluso de las proteínas circundantes, desempeña un papel clave en mantener a raya la decoherencia. Si imaginamos que el ruido blanco térmico es una versión molecular de la estática en un aparato de radio mal sintonizado, entonces las buenas vibraciones del ruido de color equivalen a un ritmo simple, como el «bop bop» de los Beach Boys en su canción «Good Vibrations». Pero recuérdese que el excitón se comporta asimismo de una manera ondulatoria para generar estas

pulsaciones cuánticas coherentes que detectó el grupo de Graham Fleming. Dos artículos recientes del grupo de Martin Plenio, de la Universidad de Ulm, en Alemania, en 2012 y 2013, demostraron que si la oscilación del excitón y las oscilaciones de las proteínas circundantes (el ruido de color) pulsan al mismo compás, entonces, cuando el excitón coherente pierde el ritmo debido al ruido blanco, puede adquirirlo de nuevo por las oscilaciones de las proteínas. <sup>5</sup> En efecto, en un artículo de 2014 en *Nature*, Alexandra Olaya-Castro, del University College de Londres, demostró con un magnífico estudio teórico que el excitón y las vibraciones moleculares (el ruido de color) comparten un único cuanto de energía de una manera que simplemente no puede explicarse sin recurrir a la mecánica cuántica. <sup>6</sup>

Para apreciar de manera cabal la contribución de los dos tipos de ruido molecular al transporte del excitón, volvamos una vez más a una metáfora musical e imaginemos que el fotosistema es una orquesta, con los diversos instrumentos que tocan el papel de las moléculas de pigmento, y que el excitón es una melodía musical. Imaginamos que la música se inicia con un solo de violín, que representa la molécula de pigmento que capta el fotón y convierte su energía en un excitón vibrante. A continuación, la música del excitón es ejecutada por los demás instrumentos de cuerda, después por los de viento y, finalmente, por la percusión, cuyo ritmo desempeña el papel del centro de reacción. Además, imaginaremos que esta música se ejecuta en un teatro lleno de un público que proporcionará el ruido blanco de envoltorios crujientes que se abren, sillas que son arrastradas, toses y estornudos. El director de la orquesta será el ruido de color.

Imaginemos primero que hemos llegado en una noche muy alborotada, y que el público forma tal barullo que los músicos no pueden oírse a sí mismos ni a sus colegas. En medio de la algarabía, el primer violín inicia la pieza, pero los otros músicos no pueden oírlo y por ello son incapaces de seguir la melodía. Este es el escenario del Zenón cuántico, en el que demasiado ruido impide el transporte cuántico. Sin embargo, a niveles muy bajos de ruido, digamos que en un teatro vacío sin público presente, los músicos solo se oyen los unos a los otros, de manera que todos siguen la primera melodía, como una canción que no podemos quitarnos de la cabeza, y continúan tocándola. Este es el escenario opuesto de demasiada coherencia cuántica, en el que el excitón permanece oscilando a través de todo el sistema pero no termina en ningún lugar en concreto.

En la zona Ricitos de Oro, con solo el nivel justo de ruido que emite una audiencia que se controla, la perturbación es suficiente para hacer que los

músicos se aparten de su repetición monótona para ejecutar la pieza completa con toda su dinámica. Algunos instrumentos cambian todavía de ritmo cuando un espectador revoltoso ocasional abre un envoltorio crujiente, pero, con un movimiento de su batuta, el director puede hacerlos volver a la sincronía para ejecutar la música de la fotosíntesis.

#### REFLEXIONES SOBRE LA FUERZA MOTRIZ DE LA VIDA

En el capítulo 2 echamos un vistazo al interior de una máquina de vapor para descubrir que su fuerza motriz implicaba captar el movimiento aleatorio del mar de moléculas parecidas a bolas de billar y dirigir la turbulencia molecular para que accionara el pistón dentro del cilindro. Después preguntamos si la vida puede explicarse totalmente por el mismo principio termodinámico que impulsa las máquinas de vapor, de «orden a partir del desorden». ¿Acaso la vida no es más que una máquina de vapor compleja?

Muchos científicos están convencidos de que lo es, pero de una manera sutil que necesita una explicación. La teoría de la complejidad estudia la tendencia de determinadas formas de movimiento aleatorio caótico para generar orden a través del fenómeno de la autoorganización. Por ejemplo, como ya hemos comentado, las moléculas del interior de los líquidos se mueven de manera totalmente caótica, pero cuando nuestra bañera se vacía, el agua fluye de manera espontánea alrededor del desagüe en una dirección ordenada, o bien en el sentido de las agujas del reloj o bien en el sentido contrario. Este orden macroscópico puede verse también en los patrones de flujo de convección en un puchero de agua que se calienta al fuego, en los huracanes, los tornados, la mancha roja de Júpiter y otros muchos fenómenos naturales. La autoorganización se halla asimismo implicada en varios fenómenos biológicos, como el comportamiento de enjambrazón de aves, peces o insectos, o en el patrón de bandas de una cebra, o en la compleja estructura fractal de algunas hojas.

Lo más notable de todos estos sistemas es que el orden macroscópico que podemos ver no se refleja al nivel molecular. Si dispusiéramos de un microscopio muy potente que pudiera revelar las moléculas individuales que fluyen desagüe abajo, nos sorprendería ver que sus movimientos son casi totalmente al azar, con solo un ligerísimo sesgo en la aleatoriedad hacia una dirección en el sentido de las agujas del reloj o en el sentido contrario. A un nivel molecular, solo hay caos...; pero es un caos con un ligero sesgo, que puede generar orden a un nivel macroscópico: orden a partir del caos, como a veces se

denomina este principio. [7](#)

Conceptualmente, el orden a partir del caos es bastante parecido al «orden a partir del desorden» de Erwin Schrödinger que, como ya hemos descrito, se halla detrás de la fuerza motriz de las máquinas de vapor. Pero, como hemos descubierto, la vida es diferente. Aunque dentro de las células hay una gran cantidad de movimiento molecular desordenado, la acción real de la vida es un movimiento fuertemente coreografiado de partículas fundamentales dentro de enzimas, sistemas fotosintéticos, ADN y en otros lugares. La vida tiene un orden intrínseco a un nivel microscópico; de modo que el «orden a partir del caos» no puede ser la única explicación para las características fundamentales de la vida y que la distinguen. La vida no es nada que se parezca a un tren de vapor.

Sin embargo, investigaciones recientes sugieren que la vida puede operar a lo largo de las líneas de una versión cuántica de la máquina de vapor.

El principio de cómo funcionan las máquinas o motores de vapor lo esbozó por primera vez en el siglo XIX un francés, Sadi Carnot. Era hijo del ministro de la Guerra de Napoleón, Lazare Carnot, quien obtuvo un cargo en el cuerpo de ingenieros del ejército de Luis XVI. Una vez que hubieron depuesto al rey, Lazare Carnot no huyó del país, como muchos de sus colegas aristócratas, sino que se unió a la revolución; y, como ministro de la Guerra, fue responsable en gran medida de crear el ejército revolucionario francés que repelió la invasión prusiana. Pero, además de ser un brillante estratega militar, Lazare era también matemático, amante de la música y la poesía (le puso a su hijo el nombre del poeta persa medieval Saadi Shirazi) e ingeniero. Escribió un libro acerca de cómo las máquinas convierten una forma de energía en otra.

Sadi demostró algo del fervor revolucionario y nacionalista de su padre, y tomó parte en la defensa de París como estudiante en 1814, cuando los prusianos volvieron a asediar la ciudad. También demostró algo de la intuición ingenieril de su padre al escribir un libro notable titulado *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1823), que se suele reconocer que inició la ciencia de la termodinámica.

Sadi Carnot se inspiró en el diseño de las máquinas de vapor. Creía que Francia había sido derrotada en las guerras napoleónicas porque no había empleado la potencia del vapor para construir industria pesada de la misma manera que Inglaterra había hecho. Sin embargo, aunque el motor de vapor había sido inventado y comercializado con éxito en Inglaterra, su diseño se había conseguido principalmente mediante prueba y error y la intuición de ingenieros tales como el inventor escocés James Watt. Lo que le faltaba era un fundamento

teórico. Carnot quiso rectificar esta situación al describir en términos matemáticos la manera en que cualquier motor de vapor, como los que impulsaban los trenes de vapor, puede emplearse para hacer trabajo mediante un proceso cíclico que hasta el día de hoy se conoce como ciclo de Carnot.

El ciclo de Carnot describe cómo una máquina de vapor transfiere energía de un lugar caliente a uno frío y emplea parte de esta energía para hacer trabajo útil, antes de retornar a su estado inicial. Por ejemplo, una máquina de vapor transfiere calor desde la caldera caliente hasta el condensador, donde se enfría, y en el proceso utiliza parte de la energía térmica como vapor para efectuar el trabajo de mover un pistón y, con ello, las ruedas de una locomotora. Después se devuelve a la caldera el vapor enfriado, listo para ser caldeado de nuevo y comenzar otra vuelta del ciclo de Carnot.

El principio del ciclo de Carnot es de aplicación a todo tipo de motores que emplean calor para hacer cualquier clase de trabajo, desde las máquinas de vapor que impulsaron la revolución industrial hasta el motor de combustión que hace andar nuestro coche o la bomba eléctrica que enfría nuestro frigorífico. Carnot demostró que la eficiencia de cada uno de estos motores (en realidad, de «cualquier motor térmico imaginable», como él escribió) depende de unos pocos principios fundamentales. Además, demostró que la eficiencia de cualquier motor térmico clásico no puede exceder de un máximo teórico, ahora llamado límite de Carnot. Por ejemplo, un motor eléctrico que emplea cien vatios de potencia eléctrica para suministrar veinticinco vatios de potencia mecánica tiene una eficiencia del 25%: pierde el 75% de la energía suministrada en forma de calor. Los motores térmicos clásicos no son muy eficientes.

Los principios y limitaciones de los motores térmicos de Carnot son extraordinariamente amplios y pueden aplicarse incluso a las fotocélulas o células fotoeléctricas, como las que se encuentran en el techo de algunos edificios, que captan energía luminosa y la convierten en electricidad. Lo mismo ocurre con las fotocélulas biológicas en los cloroplastos de las hojas que hemos descrito en este libro. Un motor térmico cuántico de este tipo hace un trabajo similar al de un motor térmico clásico, pero con electrones en lugar de vapor y fotones de luz en lugar de la fuente de calor. Los electrones absorben primero los fotones y son excitados a una energía superior. Pueden ceder esta energía, cuando es necesario, para efectuar trabajo químico útil. Esta idea se remonta al trabajo de Albert Einstein y posteriormente sería el fundamento de los principios del láser. El problema es que muchos de dichos electrones perderán su energía como calor sobrante antes de que tengan oportunidad de usarla. Esto pone un

límite a la eficiencia de este motor térmico cuántico.

El lector recordará que el centro de reacción es el destino final de todos aquellos excitones oscilantes en los complejos fotosintéticos. Hasta aquí, nos hemos centrado en el proceso de entrega de energía; pero la verdadera acción de la fotosíntesis tiene lugar en el mismo centro de reacción. Aquí la frágil energía de los excitones es convertida en la energía química estable de la molécula portadora de electrones que plantas o microbios usan para efectuar gran cantidad de trabajo útil, como fabricar más plantas y microbios.

Lo que tiene lugar en el centro de reacción es igual de notable que el paso del transporte del excitón, e incluso más misterioso. La oxidación es el proceso químico por el que los electrones son movidos entre los átomos. En muchas oxidaciones, los electrones saltan activamente de un átomo (que entonces se oxida) a otro. Pero en otras oxidaciones, como la combustión de carbón, madera o cualquier combustible basado en el carbono, los electrones que, en un inicio, son poseídos únicamente por un átomo terminan compartidos con otros átomos: una pérdida neta de electrones para el donante de electrones, de la misma manera que compartir nuestra tableta de chocolate supone una pérdida neta de chocolate. Así, cuando se quema carbono en el aire, los electrones de sus órbitas externas terminan compartidos con el oxígeno para formar enlaces moleculares de dióxido de carbono. En estas reacciones de combustión los electrones externos del carbono están enlazados solo de manera laxa, de modo que son relativamente fáciles de compartir. Pero en el centro de reacción de la fotosíntesis de una planta o microbio, la energía se usa para extraer electrones de moléculas de agua, en las que los electrones están enlazados de manera mucho más fuerte. Esencialmente, se separa un par de moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  para producir una molécula de  $\text{O}_2$ , cuatro iones hidrógeno, con carga positiva, y cuatro electrones. Así, puesto que las moléculas de agua pierden sus electrones, el centro de reacción es el único lugar natural en el que el agua se oxida.

En 2011, el físico estadounidense Marlan Scully, quien en la actualidad compatibiliza la docencia en la Universidad de Texas A&M y en la de Princeton, junto con sus colaboradores en varias universidades de Estados Unidos, describió una ingeniosa manera de construir un motor térmico cuántico hipotético que excediera de los límites de eficiencia de un motor térmico cuántico estándar. <sup>8</sup> Para hacerlo, se emplea ruido molecular para hacer saltar un electrón a una superposición de dos estados energéticos al mismo tiempo. Cuando en tal caso dicho electrón absorbe la energía de un fotón y es «excitado», permanece en una superposición de dos energías (que ahora son



superiores) a la vez. Ahora puede reducirse la probabilidad de que el electrón retorne a su estado original y pierda su energía como calor que se desperdicia, gracias a la coherencia cuántica de sus dos estados energéticos. Esto se parece al ejemplo del patrón de interferencia producido por el experimento de doble rendija que describimos en el capítulo 4. Allí, determinadas posiciones en la pantalla posterior que están al alcance del átomo cuando solo se abre una rendija se hacen inaccesibles debido a la interferencia destructiva cuando ambas rendijas están abiertas. Aquí, la delicada colaboración entre el ruido molecular y la coherencia cuántica pone a punto un motor térmico cuántico para reducir el desperdicio ineficiente de energía térmica y, por lo tanto, aumentar su eficiencia más allá del límite de Carnot cuántico.

Pero ¿es posible este fino ajuste al nivel cuántico? Habría que diseñar a una escala subatómica tanto la posición como las energías de los electrones individuales para producir tan solo la cantidad adecuada de interferencia para aumentar el flujo de energía a lo largo de rutas eficientes y eliminar el flujo a lo largo de las derrochadoras. También se necesitaría afinar el ruido blanco molecular circundante de manera que hiciera que los electrones que pulsan de manera arrítmica lo hicieran con el mismo ritmo, pero sin un exceso de vigor, o de lo contrario serían empujados a ritmos diferentes y la coherencia se perdería. ¿Existe algún lugar en el universo donde podamos esperar encontrar este grado finamente ajustado de orden molecular capaz de explotar efectos cuánticos delicados en el mundo subatómico?

El artículo de 2011 de Scully era pura teoría. Nadie ha construido todavía un motor térmico cuántico que pueda captar la energía extra con la que se esperaría traspasar el límite de Carnot. Pero en 2013 otro artículo del mismo equipo señalaba un hecho curioso relacionado con los centros de reacción fotosintéticos. [9](#) Todos están equipados con moléculas de clorofila, pero no con una sola, que podría ser capaz de operar un motor térmico cuántico directo, sino con dos: las conocemos como un «par especial».

Aunque las moléculas de clorofila en el par especial son idénticas, están embutidas en ambientes diferentes en el andamiaje de proteína. Lo que hace que no vibren a la misma frecuencia: están ligeramente desafinadas. En su último artículo, Scully y sus colegas señalaban que esta estructura proporciona a los centros de reacción fotosintéticos la arquitectura molecular precisa necesaria para que trabajen como motores térmicos cuánticos. Los investigadores demostraron que el par especial de la clorofila parece estar ajustado para explotar la interferencia cuántica para inhibir las rutas energéticas derrochadoras

e ineficientes y, por lo tanto, para ceder energía a la molécula aceptora con una eficiencia que supera el límite descubierto por Carnot hace doscientos años por un margen de entre el 18 y el 27%. Podría parecerles una cantidad exigua a quienes no sepan que la estimación actual es que el consumo de energía mundial aumentará en torno al 56% entre 2010 y 2040. En este caso, desarrollar una tecnología capaz de aumentar la producción de energía en un margen comparable podría ser muy interesante. Estos hallazgos siguen siendo polémicos en un campo como este, que evoluciona con tal rapidez. Sin embargo, un estudio más reciente de la Universidad de Ulm [10](#) confirma muchos aspectos de la hipótesis del motor térmico cuántico.

Este extraordinario resultado proporciona otro ejemplo notable de cómo los organismos vivos basados en el mundo cuántico parecen tener capacidades que les son negadas a las máquinas macroscópicas inanimadas. Desde luego, para que este escenario funcione es necesaria la coherencia cuántica; pero en otro resultado publicado en julio de 2014 que apareció en los titulares de la prensa general, un equipo de investigadores de Holanda, Suecia y Rusia detectó pulsación cuántica en el centro de reacción del fotosistema II \* de plantas, y declaró que estos centros funcionan como «trampas de luz de diseño cuántico». [11](#) Y recuérdese que los centros de reacción fotosintéticos evolucionaron hace entre dos mil y tres mil millones de años. De modo que, durante casi toda la historia de nuestro planeta, las plantas y los microbios parecen haber estado utilizando motores térmicos con mejoras cuánticas (un proceso tan complejo e ingenioso que todavía tratamos de resolver cómo reproducirlo por medios artificiales) para bombear energía al carbono y, con ello, producir toda la biomasa que formó a microbios, plantas, dinosaurios y, desde luego, a nosotros. De hecho, todavía estamos cosechando energía cuántica antigua en la forma de combustibles fósiles que caldean nuestros hogares, hacen marchar nuestros coches e impulsan la mayor parte de la industria actual. Los beneficios potenciales de que la moderna tecnología humana aprenda de la antigua tecnología cuántica natural son enormes.

Así, en lo relativo a la fotosíntesis, parece que el ruido se utiliza tanto para mejorar la eficiencia de entrega de los excitones al centro de reacción como para captar esta energía derivada de la solar una vez que llega al centro de reacción. Pero esta capacidad de hacer una virtud cuántica de un vicio molecular (el ruido) no se limita a la fotosíntesis. En 2013, el grupo de Nigel Scrutton, de la Universidad de Mánchester, el equipo que estudió el efecto de túnel de los protones en los enzimas en los experimentos que analizamos en el capítulo 3,

sustituyó los átomos regulares de un enzima con isótopos más pesados. El intercambio de isótopos tuvo el efecto de añadir un peso adicional a los muelles moleculares de la proteína, de manera que vibraron (su ruido de color) a diferentes frecuencias. Los investigadores encontraron que el efecto de túnel de los protones y la actividad de los enzimas resultaron perturbados en el enzima más pesado, [12](#) lo que sugería que en el estado natural con los isótopos naturales, más ligeros, las oscilaciones de tipo de metrónomo de su espinazo proteínico contribuyen al efecto de túnel y a la actividad del enzima. El grupo de Judith Klinman, de la Universidad de California, ha obtenido resultados similares con otros enzimas. [13](#) Así, además de guiar la fotosíntesis, parece que el ruido está asimismo implicado en aumentar la acción de los enzimas. Y recuérdese que los enzimas son los motores de la vida que han producido todas y cada una de las moléculas del interior de cada célula de cada ser vivo de nuestro planeta. Las buenas vibraciones pueden estar desempeñando un papel fundamental en mantenernos vivos a todos.

#### LA VIDA EN EL LÍMITE CUÁNTICO DE UNA TEMPESTAD CLÁSICA

En un barco en el mar: fragor de tormenta.

WILLIAM SHAKESPEARE, *La tempestad*,  
Acto I, escena 1, dirección de escena inicial

¿Proporciona alguno de estos hallazgos una respuesta a la pregunta que Schrödinger planteó hace décadas acerca de la naturaleza de la vida? Ya hemos tenido en cuenta su intuición de que la vida es un sistema dominado por el orden que se encuentra en todas partes, desde organismos enteros muy organizados hasta el fundamento cuántico inferior, pasando por el tempestuoso océano termodinámico (véase figura 10.1). Y, de manera crucial, estas dinámicas de la vida están delicadamente preparadas y en equilibrio de modo que los acontecimientos al nivel cuántico puedan suponer una diferencia para el mundo macroscópico, tal como Pascual Jordan predijo en la década de 1930. Esta sensibilidad macroscópica para el ámbito cuántico es única de la vida, y permite que esta explote de manera potencial fenómenos de nivel cuántico, como el efecto de túnel, la coherencia y el enmarañamiento, lo cual supone una diferencia para todos nosotros.

Pero, y este es un gran pero, esta explotación del mundo cuántico solo puede tener lugar si se puede tener a raya la decoherencia. De otro modo el sistema pierde su carácter cuántico y se comporta de manera totalmente clásica o termodinámica, basándose en las reglas del «orden a partir del desorden». Los

científicos han eludido la decoherencia aislando sus reacciones cuánticas del «ruido» intrusivo. Este capítulo ha revelado que la vida parece haber adoptado una estrategia muy diferente. En lugar de permitir que el ruido entorpezca la coherencia, la vida emplea el ruido para mantener su conexión con el ámbito cuántico. En el capítulo 6 imaginamos la vida como un bloque de granito en un delicado equilibrio para hacerla susceptible a acontecimientos de nivel cuántico. Por razones que resultarán claras dentro de un momento, haremos un cambio metafórico y sustituiremos nuestro bloque de granito por un buque de vela, una fragata.

Al principio, nuestra fragata imaginaria se hallará en dique seco, con su estrecha quilla exquisitamente bien centrada sobre una única línea de átomos alineados con sumo cuidado. En ese estado en un equilibrio peligroso, nuestro buque, como una célula viva, es sensible a acontecimientos de nivel cuántico que tienen lugar en su quilla atómica. El efecto de túnel de un protón, la excitación de un electrón o el entrelazamiento de un átomo pueden influir en todo el buque, quizás afectando al delicado balance sobre el dique seco. Sin embargo, imaginaremos también que su capitán ha encontrado maneras ingeniosas y sorprendentes de hacer buen uso de estos delicados fenómenos cuánticos como la coherencia, el efecto de túnel, la superposición o el enmarañamiento para ayudar a navegar a su nave una vez que esta se hace a la vela.

Pero recuérdese que seguimos en dique seco: este buque no va a ir a ninguna parte todavía. Y aunque en su delicado estado de equilibrio podría aprovechar algunos fenómenos de nivel cuántico, su precaria situación lo hace vulnerable incluso a la brisa más débil imaginable (quizá si lo toca solo una única molécula de aire), que podría derribar al buque. El enfoque ingenieril del problema de cómo mantener la nave derecha, y de este modo conservar su sensibilidad a los acontecimientos cuánticos en la quilla, sería rodear el buque con una caja aislante y bombear hacia fuera todo el aire para impedir que ninguna molécula que actuara como una bola de billar aislada perturbara al buque. El ingeniero también enfriaría todo el sistema hasta acercarse al cero absoluto, de modo que ni siquiera una vibración molecular pudiera perturbar su delicado equilibrio. Pero los capitanes expertos saben que hay otra manera de mantener un barco vertical: primero hay que lanzarlo a aguas termodinámicamente turbulentas.

Damos por sentado que es más fácil mantener un barco en posición vertical en el agua que en tierra, pero si pensamos en ello a nivel molecular descubriremos que la razón para su aumento de estabilidad no es evidente en un primer momento. Acabamos de decir que la estrategia de un ingeniero para mantener en

posición vertical un buque de quilla estrecha en dique seco sería proteger la nave de cualquier perturbación potencial procedente de átomos o moléculas extraviados. Pero ¿no está acaso el mar lleno de átomos y moléculas extraviados que se golpean de manera aleatoria entre ellas y que golpean la quilla de cualquier buque como bolas de billar, tal como veíamos en el capítulo 2? ¿Cómo es que este buque de precario equilibrio puede ser derribado por minúsculos impactos en tierra pero permanece impasible ante ellos cuando se halla en el mar?

La respuesta nos lleva a las reglas de «orden a partir del desorden» que Schrödinger describió. El buque será bombardeado, en efecto, por billones de impactos moleculares tanto en su costado de babor como en el de estribor. Desde luego, ya no se halla en equilibrio sobre su quilla ultradelgada, sino que se mantiene a flote gracias a la capacidad para flotar en el agua, y con tantos impactos en ambos costados del buque, la fuerza media en la proa y en la popa o en babor y estribor será la misma. De modo que los buques que flotan no son derribados porque los sostienen billones de bombardeos moleculares aleatorios: orden (la orientación vertical del buque) a partir del desorden (billones de impactos moleculares del tipo de bolas de billar).

Pero, desde luego, los buques pueden venirse abajo, incluso en alta mar. Imagine el lector que el capitán ha lanzado su barco a un mar tempestuoso, pero que todavía no ha izado su vela. Las olas que golpean al buque ya no lo hacen al azar, y a un costado y otro llegan grandes oleadas capaces de derribar a un buque inestable. Pero nuestro ingenioso capitán sabe cómo aumentar la estabilidad de su buque: iza las velas de manera que puedan aprovechar la fuerza del viento para que el buque mantenga la quilla nivelada (véase figura 10.2).

De nuevo, a primera vista esta estratagema puede parecer contradictoria. Cabe esperar que los vientos caóticos y las ráfagas impredecibles actuarán para derribar un buque ya inestable, en vez de estabilizarlo, sobre todo porque no serán aleatorios sino que tenderán a llegar con más fuerza sobre un costado del barco o sobre el otro. Pero el capitán sabe cómo ajustar el ángulo de la vela y la caña del timón de manera que la acción del viento y las corrientes actúen contra las ráfagas y el temporal para corregir cualquier escora a uno u otro costado. De esta manera, puede aprovechar la tormenta circundante para mantener su buque estable.

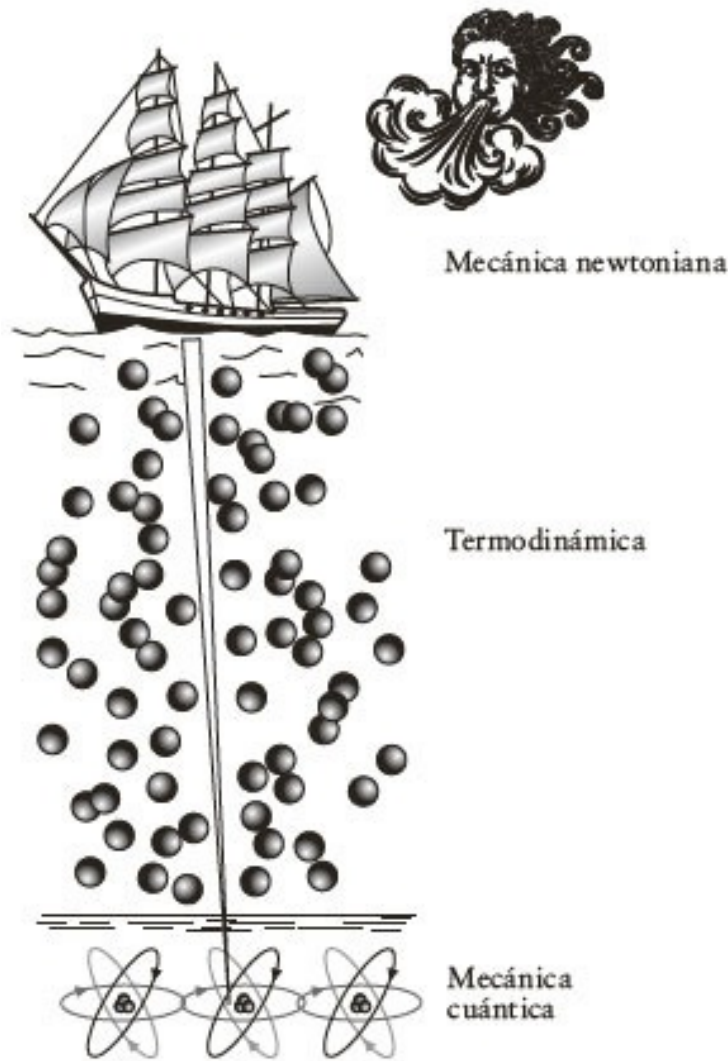


FIGURA 10.2. La vida navega en el límite entre los mundos cuántico y clásico. La célula viva es como un barco cuya estrecha quilla penetra directamente hasta la capa cuántica de la realidad y por lo tanto puede captar fenómenos tales como el efecto de túnel o el enmarañamiento para mantenerse viva. Esta conexión con el ámbito cuántico tiene que ser sostenida activamente por células vivas que utilicen las tormentas termodinámicas (ruido molecular) para mantener, en lugar de desbaratar, la coherencia cuántica.

Da la impresión de que la vida es como este buque metafórico que navega a través de aguas tormentosas clásicas con un avezado capitán a bordo: el programa genético, afinado por casi cuatro mil millones de años de evolución, es capaz de navegar las variadas profundidades de los ámbitos cuántico y clásico. En lugar de rehuir las tempestades, la vida las aprovecha, dirigiendo sus borrascas y ventarrones moleculares para que hinchen sus velas y mantengan el buque vertical de manera que su estrecha quilla surque las aguas termodinámicas para conectar con el mundo cuántico (véase figura 10.2). Las raíces profundas de la vida le permiten aprovechar estos extraños fenómenos que rondan por el

límite cuántico.

¿Nos proporciona esto una nueva comprensión de lo que es realmente la vida? Bueno, todavía nos queda otra especulación, y subrayamos que es eso, una especulación, pero que, después de haber llegado hasta aquí, no podemos resistirnos a hacerla. ¿Recuerda el lector la pregunta que planteamos en el capítulo 2, relacionada con la diferencia entre lo vivo y lo inanimado; esta diferencia que los antiguos describieron como nuestra alma? Según ellos, la muerte se producía cuando el alma abandonaba el cuerpo. La filosofía mecanicista de Descartes expulsó el vitalismo y descartó el alma, al menos en plantas y animales, pero la diferencia entre lo vivo y lo muerto siguió siendo misteriosa. ¿Puede nuestra nueva comprensión de la vida sustituir el alma con una chispa vital cuántica? Muchos considerarán que el mero hecho de plantear esta pregunta es sospechoso, pues empuja las fronteras de la ciencia convencional más allá de la respetabilidad y la introduce en la esfera de la pseudociencia o incluso de una especie de espiritualidad. No es esto lo que proponemos aquí. Por el contrario, queremos ofrecer lo que esperamos que sea una idea que pueda sustituir las especulaciones místicas y metafísicas con al menos una pizca de una teoría científica.

En el capítulo 2, comparamos la capacidad de la vida de conservar su estado muy organizado con un artilugio de mesa de billar que podía mantener un triángulo de bolas en el centro de la mesa al detectar y sustituir cualquier bola apartada de su lugar por las colisiones de otras bolas en un sistema de tipo termodinámico. Ahora que el lector ha descubierto más cosas acerca de cómo funciona la vida, puede ver que esta autosostenibilidad se mantiene por la compleja maquinaria molecular de enzimas, pigmentos, ADN, ARN y otras biomoléculas, algunas de cuyas propiedades dependen de fenómenos mecánicos cuánticos como el efecto de túnel, la coherencia y el enmarañamiento.

Las pruebas recientes que hemos examinado en este capítulo sugieren que algunas de estas diversas actividades impulsadas cuánticamente, o todas, que podemos imaginar como las actividades que tienen lugar en la ajetreada cubierta de nuestro buque, se mantienen por la notable capacidad de la vida de aprovechar las tormentas y vendavales termodinámicos para conservar su conexión con el ámbito cuántico más profundo. Pero ¿qué ocurre si la tormenta termodinámica sopla demasiado fuerte y rompe (en términos metafóricos) el mástil del buque? Sin capacidad ya de emplear las ráfagas y ventarrones termodinámicos (el ruido blanco y de color) para mantener la quilla nivelada, la célula sin vela será golpeada por las olas y marejadas de su interior, haciendo

que nuestro barco metafórico cabecee y gire, y por último corte su conexión con el ordenado ámbito cuántico (véase figura 10.3). Sin esta conexión, la coherencia, el entrelazamiento, el efecto de túnel o la superposición ya no pueden influir sobre el comportamiento macroscópico de la célula, de manera que la célula cuánticamente desconectada se hundirá bajo las aguas termodinámicamente turbulentas y se convertirá en un objeto del todo clásico. Una vez que el barco se ha hundido, ninguna tormenta lo hará reflotar; y quizás, una vez que un organismo vivo haya sido captado por el océano tempestuoso del movimiento molecular, no habrá tempestad que pueda restaurar su conexión cuántica.

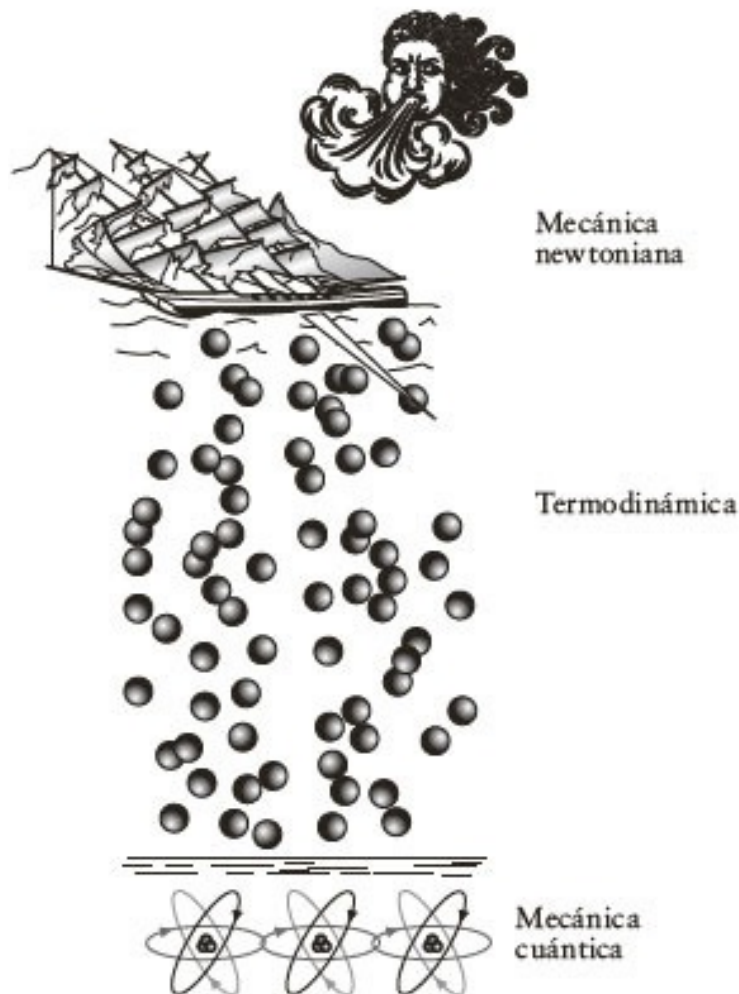


FIGURA 10.3. La muerte quizá representa la separación de la conexión del organismo vivo con el ámbito cuántico ordenado, lo que lo deja impotente para resistir las fuerzas aleatorizadoras de la termodinámica.

¿PODEMOS EXPLOTAR LA BIOLOGÍA CUÁNTICA PARA PRODUCIR NUEVA TECNOLOGÍA



VIVA?

Las tormentas pueden no ser capaces de hacer que un barco hundido vuelva a flotar, pero los humanos sí que pueden. El ingenio humano puede conseguir mucho más que las fuerzas aleatorias. Tal como discutimos en el capítulo 9, la probabilidad de que un tornado que soplara a lo tonto por un desguace de chatarra ensamblara por puro azar un reactor jumbo es tremendamente minúscula. Pero los ingenieros aeronáuticos pueden construir aviones. ¿Podemos también ensamblar la vida? Tal como hemos señalado en diversas ocasiones en este libro, nadie ha conseguido nunca producir vida a partir de sustancias químicas inertes; lo que, según la famosa máxima de Richard Feynman, significa que todavía no entendemos por completo el fenómeno de la vida. Pero quizá nuestro conocimiento recién descubierto de la biología cuántica puede proporcionarnos los medios de crear nueva vida e incluso de construir una forma revolucionaria de tecnología viva.

La tecnología viva nos es, desde luego, familiar. Dependemos por completo de ella, en la forma de agricultura, para producir nuestros alimentos. También nos basamos en los productos de la tecnología viva, como el pan, el queso, las cervezas y los vinos que han sido transformados por levaduras y bacterias a partir de harina, leche, grano y jugos de frutas. Nuestro mundo moderno se aprovecha asimismo de su cosecha de los productos no vivos de células que antaño estuvieron vivas, como los enzimas que Mary Schweitzer empleó para descomponer el hueso de dinosaurio. Enzimas similares se usan para descomponer fibras naturales para producir telas para vestidos; o se añaden a los detergentes biológicos que lavan estos vestidos. Las multimillonarias industrias biotecnológicas y farmacológicas producen cientos de productos naturales, como los antibióticos que nos protegen de las infecciones. La industria energética explota la capacidad de los microbios para transformar los excedentes de biomasa en biocombustibles; y muchos de los materiales que son necesarios para la vida moderna, como la madera y el papel, estuvieron otrora vivos, como los combustibles fósiles que caldean nuestros hogares y mueven nuestros coches. De modo que incluso en el siglo XXI mantenemos una dependencia extraordinaria de nuestra tecnología viva de milenios de antigüedad. Si al lector le queda alguna duda, que intente leer *La carretera*, \* de Cormac McCarthy, una novela distópica que describe el desolado mundo que nos quedaría si destruyéramos de forma negligente nuestra tecnología viva.

Pero la tecnología viva actual tiene sus limitaciones. Por ejemplo, aunque

(como hemos descubierto) algunos de los pasos en el proceso de la fotosíntesis son extraordinariamente eficientes, la mayoría no lo son, y la eficiencia energética total de la conversión de energía solar en energía química que podemos cosechar en la agricultura es muy baja. La razón es que las plantas y los microbios tienen una agenda distinta de la nuestra: realizan tareas rutinarias e ineficientes, como producir flores y semillas, que no son realmente necesarias para la captación de energía, pero que no obstante son esenciales para su propia supervivencia. De forma parecida, los microbios que producen antibióticos, enzimas o productos farmacéuticos lo hacen de forma muy derrochadora, porque su agenda, ajustada a la evolución, los obliga a realizar montones de cosas innecesarias, como más células microbianas.

¿Podemos fabricar vida que se ajuste a nuestra agenda? Claro que podemos, y ya nos beneficiamos muchísimo de la exitosa manera en que la humanidad ha transformado las plantas silvestres y los animales salvajes en la tecnología viva de plantas cultivadas y animales domésticos, optimizados para la explotación humana. Pero el proceso de selección artificial que nos dio plantas con semillas mayores o animales dóciles adecuados para su domesticación, aunque muy exitoso, tiene sus limitaciones. No podemos seleccionar lo que la naturaleza no ha producido previamente. Por ejemplo, todos los años se gastan miles de millones de dólares en fertilizantes que reponen el nitrógeno del suelo, que se ha perdido debido a la agricultura intensiva. Las plantas leguminosas, como los guisantes, no necesitan fertilizantes de nitrógeno, porque albergan bacterias en sus raíces que captan el gas directamente del aire. La agricultura podría ser mucho más eficiente si fuéramos capaces de producir cereales leguminosos que fijaran su propio nitrógeno como hacen los guisantes. Pero esta capacidad no ha aparecido evolutivamente en ningún cereal.

Sin embargo, incluso esta limitación puede ser superada, al menos en parte. La manipulación genética de plantas, microbios e incluso animales (ingeniería genética) se aceleró a finales del siglo xx . En la actualidad, gran parte de las cosechas de las principales plantas cultivadas, como la soja, procede de plantas modificadas genéticamente que son resistentes a las enfermedades o a los herbicidas, y se están realizando esfuerzos, por ejemplo, para insertar genes de captación de nitrógeno en cereales. De manera similar, la industria biotecnológica se basa en gran parte en microbios modificados genéticamente para que produzcan nuestros productos farmacéuticos y antibióticos.

Aun así, de nuevo existen limitaciones. La ingeniería genética, en general, solo mueve genes de una especie a otra. Por ejemplo, la planta de arroz produce

vitamina A (betacaroteno) en sus hojas pero no en su semilla, de modo que apenas existe dicha vitamina en esta planta esencial que alimenta a gran parte del mundo en vías de desarrollo. La vitamina A es esencial para nuestro sistema inmune y nuestra visión, de modo que su deficiencia en las regiones más pobres y dependientes del arroz del mundo hace que cada año millones de niños mueran debido a infecciones o se queden ciegos. En la década de 1990, Peter Beyer, de la Universidad de Friburgo, e Ingo Potrykus, del Instituto Federal Suizo de Tecnología, en Zúrich, insertaron genéticamente dos genes necesarios para producir vitamina A, uno procedente de narcisos y el otro de un microbio, en el genoma del arroz para producir arroz con niveles elevados de vitamina A en sus semillas. El «arroz dorado», como Beyer lo llamó debido al color amarillo de sus semillas, puede proporcionar ahora la mayoría de la vitamina A que los niños requieren a diario. Sin embargo, aunque la ingeniería genética es una tecnología de éxito, no es más que frangollar con la vida. La nueva ciencia de la biología sintética pretende producir una tecnología viva realmente revolucionaria al fabricar formas de vida por completo nuevas.

Hay dos aproximaciones complementarias a la biología sintética. Ya hemos visto la aproximación desde arriba cuando analizamos cómo Craig Venter, el pionero de la secuenciación del genoma, construyó la llamada «vida sintética» al reemplazar el genoma de una bacteria llamada *Mycoplasma* con una versión del mismo genoma sintetizada por medios químicos. Este trueque genómico permitió que su equipo hiciera modificaciones relativamente menores en el genoma completo del micoplasma. No obstante, seguía siendo un micoplasma: no introdujeron ningún cambio radical en la biología de la bacteria. A lo largo de los próximos años, el equipo de Venter planea producir cambios más radicales; pero dichos cambios se introducirán paso a paso en esta aproximación desde arriba a la biología sintética. El equipo no produjo una vida nueva: modificaron vida ya existente.

La segunda aproximación, desde abajo, es mucho más radical: en lugar de modificar un organismo vivo ya existente, la biología sintética desde abajo pretende fabricar por completo nuevas formas de vida a partir de sustancias químicas inertes. Para muchos es una empresa peligrosa, e incluso sacrílega. ¿Pero es siquiera realizable? Bueno, los organismos vivos, como nosotros, son máquinas extraordinariamente complejas. Como a cualquier máquina, se les puede aplicar un proceso de retroingeniería para descubrir sus principios de diseño, que pueden aprovecharse después para construir máquinas todavía mejores.

Los entusiastas de la vida sintética desde abajo sueñan con hacer formas de vida completamente nuevas que puedan transformar nuestro mundo. Por ejemplo, a los arquitectos actuales les preocupa, con motivo, la noción de sostenibilidad: casas, despachos, fábricas y ciudades sostenibles. Sin embargo, aunque a menudo se dice que los edificios o ciudades modernos son autosostenibles, se basan en su mayor parte en los esfuerzos y habilidades de seres verdaderamente autosostenibles, los humanos, para mantenerlos en forma: cuando una tormenta hace que las tejas del tejado de nuestra casa salgan volando, contratamos a un constructor para que suba y las sustituya; cuando las cañerías de nuestra casa pierden, llamamos al fontanero; cuando nuestro automóvil se estropea, lo hacemos remolcar hasta un mecánico. En esencia, todo este mantenimiento manual es necesario para reparar los daños infligidos a nuestras casas o máquinas por todos estos empujones moleculares parecidos a los de bolas de billar que les infligen el viento, la lluvia y otras ofensas ambientales.

La vida es diferente: nuestro cuerpo es capaz de mantenerse continuamente mediante la renovación, sustitución o reparación del tejido dañado o desgastado. Mientras estamos vivos somos realmente autosostenibles. La arquitectura moderna ha intentado imitar algunas características de la vida en muchos de los edificios distintivos de los últimos años. Por ejemplo, la torre Gherkin, de Norman Foster, que se incorporó a la línea del horizonte de Londres en 2003, posee una piel hexagonal inspirada en la esponja llamada canasta de Venus o regadera de Filipinas (*Euplectella aspergillum*), que distribuye con eficiencia las tensiones del edificio. El Centro Eastgate en Harare, Zimbabue, diseñado por el arquitecto Mick Pearce, imita el sistema de aire acondicionado de los termiteros para proporcionar ventilación y refrigeración. Rachel Armstrong, codirectora del grupo de investigación arquitectónica AVATAR, con sede en la Universidad de Greenwich, tiene una visión más atrevida: edificios realmente autosostenibles, lo último en arquitectura biométrica. Junto con otros visionarios de la arquitectura, Armstrong sueña con construir edificios a partir de células vivas artificiales que posean la capacidad de sostener, autorrepararse e incluso autorreplicarse. <sup>14</sup> Si el viento, la lluvia o las inundaciones dañaran tales edificios vivos, estos notarían sus lesiones, al igual que los organismos vivos, y se autorrepararían tal como lo hacen los cuerpos vivos.

Las ideas de Armstrong podrían extenderse para mejorar otras características sintéticas de nuestra vida. También podría usarse material vivo para construir

prótesis, como miembros o articulaciones artificiales, que serían capaces de autorrepararse y de protegerse de los ataques de microbios, al igual que los tejidos vivos. Incluso podrían inyectarse formas de vida artificiales en el cuerpo humano para que, por ejemplo, buscaran y destruyeran células cancerosas. Productos farmacéuticos, combustibles y alimentos podrían ser producidos por formas de vida sintéticas, fabricadas a medida y no limitadas por ninguna historia evolutiva. En un futuro más alejado está la visión de ciencia ficción de robots vivos, androides que podrían realizar las tareas domésticas de la sociedad o incluso «terraformar» Marte para hacerlo habitable para colonias humanas, o construir naves espaciales vivas que pudiesen explorar la galaxia.

La idea de la creación de vida sintética desde abajo puede hacerse remontar a principios del siglo xx , cuando el biólogo francés Stéphane Leduc escribió: «De la misma manera que la química sintética empezó con la formación artificial de los productos orgánicos más sencillos, la síntesis biológica debe contentarse al principio con la fabricación de formas que se parezcan a las de los organismos inferiores». <sup>15</sup> Tal como vimos en el capítulo 9, hoy en día incluso los «organismos inferiores» son bacterias extraordinariamente complejas constituidas por miles de partes que no pueden ser sintetizadas en la actualidad mediante ningún enfoque desde abajo que se pueda concebir. La vida debió de haber empezado a partir de algo mucho más simple que una bacteria. Las hipótesis más consistentes que tenemos hoy para nuestro antepasado último son, como sugerimos en dicho capítulo, moléculas de ARN o proteínas enzimáticas autorreplicantes (ribosomas) \* que se encerraron dentro de algún tipo de pequeña vesícula para formar una estructura celular simple y autorreplicante, una protocélula. La naturaleza de las primeras protocélulas, si es que existieron, no está en absoluto clara. Muchos científicos creen que se encontraban dentro de poros microscópicos de rocas, como las rocas de Isua que conocimos en el capítulo 9, llenos de sustancias bioquímicas simples capaces de sostener la vida. Otros creen que fueron burbujas o gotitas de sustancias bioquímicas rodeadas por algún tipo de membrana que flotaban en el océano primordial.

La mayoría de los entusiastas de la vida sintética desde abajo se inspiran en teorías sobre el origen de la vida para intentar construir sus propias protocélulas vivas artificiales capaces de nadar por un mar primordial basado en el laboratorio. Probablemente las más sencillas son los diversos tipos de gotitas o vesículas de aceite en agua o de agua en aceite. Estas son fáciles de hacer; en realidad, el lector habrá hecho millones de ellas cada vez que ha preparado un aliño para la ensalada. Es bien sabido que el aceite y el agua no se combinan, por

lo que se separarán de inmediato; pero si se añade una sustancia cuyas moléculas se integran entre el agua y el aceite, un surfactante como la mostaza, y se agita bien la mezcla, se obtiene un aliño para la ensalada. Aunque su aspecto puede ser regular y homogéneo, en realidad está lleno de billones de gotitas de aceite, diminutas y estables.

Martin Hanczyc, de la Universidad de Dinamarca Meridional, ha producido protocélulas de aspecto notablemente vivo a partir de gotitas de aceite en agua que son estabilizadas con detergente. Sus protocélulas son muy sencillas, a menudo creadas a partir de solo cinco sustancias químicas. Mezcladas en las proporciones correctas, se autoensamblan en gotitas de aceite. El interior de las gotitas sostiene una química simple que hace que la protocélula se mueva a través de su ambiente, impulsada por convección (circulación térmica) y el mismo tipo de fuerzas químicas que hacen que previamente se formen las gotitas de aceite. Incluso puede experimentar una forma simple de crecimiento y autorreplicación mediante la absorción de materias primas de su ambiente, lo que al final provoca que se dividan en dos. [16](#)

Las protocélulas de Hanczyc están al revés en comparación con las células vivas, pues tienen un interior de aceite, y agua en el exterior. La mayoría de los demás investigadores optan por producir protocélulas con un interior acuoso. Esto les permite también llenarlas con biomoléculas hidrosolubles preparadas al efecto. Por ejemplo, en 2005 el genetista Jack Szostak llenó protocélulas con ribozimas de ARN. [17](#) Recuérdese (capítulo 9) que los ribozimas son moléculas de ARN que pueden codificar información genética, al igual que el ADN, pero que también tienen actividad enzimática. El equipo demostró que las protocélulas llenas de ribozimas eran capaces de una forma simple de herencia, esencialmente dividiéndose en dos como las protocélulas de Hanczyc. En 2014, un equipo dirigido por Sebastien Lecommandoux, radicado en la Universidad de Radboud, en Holanda, produjo otro tipo de protocélula cuyos múltiples compartimentos estaban llenos de enzimas que podían, como las células vivas, soportar un metabolismo simple que iba en cascada de un compartimento a otro. [18](#)

Lo cierto es que estas protocélulas dinámicas y químicamente activas son construcciones intrigantes y nos impresionan..., pero ¿son vida? Para responder esta pregunta hemos de ponernos de acuerdo en una definición operativa de vida. La evidente, la autorreplicación, está bien para muchas finalidades, pero es demasiado estricta. La mayoría de las células en un cuerpo adulto, como los glóbulos rojos de la sangre y las neuronas, no se replican, pero es indudable que

están vivas. Incluso hay humanos, como los sacerdotes budistas o católicos, que (por lo general) no se preocupan por el conflictivo asunto de la autorreplicación, pero siguen estando muy vivos. Así, aunque la autorreplicación es desde luego necesaria para la supervivencia a largo plazo de cualquier especie, no es una propiedad obligatoria de la vida.

Ya hemos comentado una propiedad de la vida más fundamental que la autorreplicación, y que los arquitectos biomiméticos se esfuerzan por emular: la autosostenibilidad. La vida es capaz de sostener su estado vivo. De manera que los requerimientos mínimos que pediremos a nuestras protocélulas producidas desde abajo para que obtengan la clasificación de vivas es que han de ser capaces de sostenerse en mares termodinámicamente turbulentos.

Por desgracia, si se usa esta definición más limitada de vida, ninguna de las protocélulas de la generación actual está viva. Incluso las que pueden ejecutar unos pocos trucos, como una forma simple de replicación (dividirse en dos), producen hijas que en realidad no son lo mismo que sus progenitoras: poseen menos componentes de partida, como ribozimas o enzimas, de modo que, a medida que avanza el proceso de replicación, estos componentes acaban por agotarse. De forma análoga, aunque protocélulas como las producidas por el grupo de Lecommandoux son capaces de sostener un metabolismo que se parece al de un organismo vivo simple, necesitan que se las llene con biomoléculas activas, que no son capaces de rellenar por sí mismas. Las protocélulas de la generación actual son como relojes a los que se da cuerda: pueden mantener su estado químico inicial, sostenido por enzimas y sustratos preexistentes, hasta que la cuerda se acaba. Más tarde, el martilleo continuo recibido del movimiento molecular circundante erosiona la organización de estas protocélulas, de manera que cada vez se tornan más caóticas y aleatorias hasta que finalmente no son distintas de su entorno. A diferencia de la vida, las protocélulas artificiales no pueden volver a darse cuerda.

¿Acaso les falta un ingrediente? Desde luego, este es un campo muy joven y es probable que se hagan grandes avances en las próximas décadas. La idea que queremos explorar en este último apartado de nuestro libro es que la mecánica cuántica puede proporcionar la chispa que falta para animar la vida artificial y producir vida verdaderamente sintética. Al mismo tiempo, lanzar una tecnología revolucionaria, un progreso de este tipo, también podría proporcionarnos al fin los medios para responder la antigua pregunta que planteamos en el capítulo 2: ¿qué es la vida?

Nosotros, como ya han hecho otros, hemos argumentado que la descripción

termodinámica de la vida es inadecuada porque no incorpora la capacidad de la vida para aprovechar el ámbito cuántico. Creemos que la vida depende de la mecánica cuántica. Pero ¿estamos en lo cierto? Como ya hemos comentado, esto es difícil de demostrar con la tecnología de que disponemos en la actualidad, ya que no podemos limitarnos a desconectar y conectar la mecánica cuántica en una célula viva. Sin embargo, predecimos que la vida, sea natural o artificial, es imposible sin las extrañas características del mundo cuántico que hemos abordado en este libro. La única manera de descubrir si estamos en lo cierto es producir vida sintética con y (si es posible) sin el extraño carácter cuántico y ver cuál de ellas funciona mejor.

#### LANZAMIENTO DE LA PROTOCÉLULA CUÁNTICA PRIMORDIAL

Imaginemos que creamos una célula viva sencilla a partir de material totalmente inanimado; quizás una célula capaz de realizar tareas sencillas, como encontrar su propio alimento en una especie de mar primordial mantenido en el laboratorio. Nuestro objetivo será construir este dispositivo de dos maneras. Una buscará aprovechar las extrañas características de la mecánica cuántica; la llamaremos protocélula cuántica. La otra no; esta será la protocélula clásica.

Un buen punto de partida para ambas versiones serían las protocélulas multicompartimentadas, limitadas por membranas, de Sebastien Lecommandoux, cuyas diferentes secciones permiten separar las distintas funciones de la vida en compartimentos individuales. Después, necesitamos proporcionarle a nuestro recipiente una fuente de energía; utilicemos una fuente abundante de fotones muy energéticos: la luz solar. Cargaremos uno de sus compartimentos con un bosque de moléculas de pigmento y de proteínas de andamiaje, haciendo una especie de panel solar, capaz de captar fotones y de convertir su energía en excitones, como un cloroplasto artificial. Sin embargo, es improbable que las moléculas de pigmento entremezcladas produzcan el transporte de energía de alta eficiencia característico de la fotosíntesis, puesto que el revoltijo molecular será incapaz de mantener la coherencia cuántica necesaria para el transporte eficiente de energía. Para captar la pulsación cuántica necesitamos orientar las moléculas de pigmento de manera que la onda coherente pueda fluir a través del sistema.

En 2013, un grupo de la Universidad de Chicago dirigido por el pionero de la fotosíntesis cuántica, Greg Engel, abordó este problema al fijar químicamente entre sí las moléculas de pigmento en una alineación determinada. Al igual que



el complejo algal FMO en el que Engel había detectado por primera vez coherencia cuántica (véase capítulo 4), su sistema de pigmento artificial mostró pulsaciones cuánticas coherentes que continuaron decenas de femtosegundos, incluso a temperatura ambiente. <sup>19</sup> Así, para proporcionar al panel solar de nuestra protocélula cuántica excitones mejorados por la coherencia, lo llenaremos con un bosque de las moléculas de pigmento unidas de Engel. La fotocélula clásica contendrá los mismos pigmentos, pero estarán alineados aleatoriamente, de manera que el excitón tendrá que moverse serpenteando por el sistema. De esta manera podríamos comprobar si la coherencia cuántica es esencial o prescindible para el transporte de excitones en la fotosíntesis.

Sin embargo, como hemos descubierto, captar la luz no es más que el primer paso en la tarea de la fotosíntesis; a continuación necesitamos transformar la inestable energía del excitón en una forma química estable. De nuevo, ya se ha hecho algún progreso. Cuando el grupo de Scully demostró en su artículo de 2013 que el centro de reacción fotosintético parece ser un motor térmico cuántico, siguieron razonando que los motores térmicos cuánticos biológicos podrían inspirar el diseño de fotocélulas más eficientes. <sup>20</sup> Más avanzado el mismo año, un equipo de la Universidad de Cambridge les tomó la palabra y produjo un programa detallado de una fotocélula artificial de este tipo, que operaría como un motor térmico cuántico. <sup>21</sup> El grupo modelizó un centro de reacción artificial a partir de la molécula de pigmento fijada producida en el laboratorio de Engel, y demostró que podía ceder un electrón energético a una molécula aceptora con un aumento de la eficiencia para superar el límite de Carnot similar al que el grupo de Scully había descubierto para la fotosíntesis natural.

De modo que imaginemos nuestra célula solar aparejada sobre un centro de reacción artificial, inspirado por el modelo del equipo de Cambridge, que es capaz de captar electrones energéticos como energía química estable. De nuevo, prepararemos un sistema rival para nuestra protocélula clásica que intenta un proceso de transferencia de energía similar, pero sin la eficiencia para superar el límite de Carnot. Una vez que la energía luminosa ha sido captada, puede emplearse para construir biomoléculas complejas, como las moléculas de pigmento de la célula.

Sin embargo, al igual que los electrones, las reacciones biosintéticas necesitan un aumento adicional de energía, cosa que, en nuestras propias células, proporciona la respiración celular (véase capítulo 3). Nos basaremos en la respiración y desviaremos parte de los electrones muy energéticos cedidos por la

fotosíntesis a un compartimento de «central energética», donde pasarán de un enzima a otro mediante el efecto de túnel, como en las cadenas respiratorias naturales, para producir ATP, el transportador molecular de energía de la célula. De nuevo, nuestro objetivo será producir el compartimento respiratorio y explorar el papel de la mecánica cuántica en este proceso biológico vital.

Con una fuente de electrones y energía, nuestra protocélula cuántica se halla ahora equipada para producir todas sus propias sustancias bioquímicas; pero necesita una fuente de materias primas: alimento. De manera que le proporcionamos una fuente de alimento, un azúcar sencillo: glucosa disuelta en el mar primordial que tenemos en nuestro laboratorio. Tendremos que instalar transportadores de azúcar, alimentados por ATP, capaces de bombear la glucosa al interior de la célula, junto con otra serie de enzimas capaces de manipular sus átomos (ingeniería a nivel cuántico) para construir biomoléculas más complejas. Muchos de estos enzimas suelen utilizar el efecto de túnel de electrones y protones, tal como se explicó en el capítulo 3, pero nuestro objetivo será construir versiones que funcionen con y sin la capacidad de introducirse en el mundo cuántico para descubrir si la mecánica cuántica proporciona realmente un lubricante esencial para estos motores de la vida.

Otra característica que nos gustaría introducir en nuestra protocélula cuánticamente sostenida es la capacidad de emplear la tempestad de ruido molecular para mantener la coherencia cuántica. Hoy apenas sabemos cómo la vida gestiona este truco para tener alguna confianza en cómo podría construirse. Puede haber muchos factores implicados: por ejemplo, se sabe que el abarrotadísimo ambiente molecular de las células vivas modifica muchas reacciones bioquímicas, [22](#) y podría ayudar a restringir el impacto aleatorizador del ruido. De modo que empaquetaremos muy apretadamente las protocélulas con biomoléculas para simular este ambiente vivo atestado, en la esperanza de que ayude a aprovechar estos ventarrones y borrascas termodinámicos para mantener la coherencia cuántica.

Pero nuestra protocélula cuántica sigue siendo un navío muy necesitado, puesto que todos sus enzimas deben cargarse previamente a bordo. Para hacerla autosuficiente hemos de amueblar otro compartimento, su sala de control, con un genoma artificial basado en el ADN, capaz de codificar todo lo que necesite, junto con la maquinaria necesaria para transformar su código de protones a nivel cuántico en proteínas. Esto es parecido a la aproximación desde arriba que empleó Craig Venter; solo que nuestro genoma será inyectado en una protocélula no viva. Por último, podríamos incluso dotar a nuestra protocélula con un

sistema de navegación, quizás una nariz molecular para permitirle localizar su alimento utilizando el principio del receptor olfativo entrelazado cuánticamente que exploramos en el capítulo 5, y un motor molecular para impulsarse a través de su mar primordial. Incluso podríamos equiparlo con un sistema de navegación accionado cuánticamente, como el de nuestro petirrojo, que pudiera contribuir a que se orientara en el océano primordial situado en el laboratorio.

Lo que hemos descrito es poco más que un capricho biológico, no más real que el Ariel de Shakespeare. Hemos omitido una enorme cantidad de detalles y, en interés de la simplicidad y la inteligibilidad, no hemos mencionado los desafíos colosales a los que se enfrentaría cualquier proyecto de biología sintética abordado desde abajo. Incluso si un tal proyecto llegara a intentarse algún día, ciertamente no trataría de ejemplificar todos estos procesos en un único paso, como en nuestra receta imaginaria anterior, sino que, en cambio, procuraría primero instalar el proceso más simple o el mejor comprendido (quizá la fotosíntesis) en una protocélula. Esto, en sí mismo, ya sería un logro importante, y sería el perfecto sistema modelo a emplear para investigar el papel de la coherencia cuántica en la fotosíntesis. Si al final llegara a demostrarse que esta hazaña es posible, los pasos siguientes serían incluir componentes adicionales para poner en práctica una complejidad cada vez mayor, lo que acabaría por llevar, quizás, a una célula viva verdaderamente artificial. Pero predecimos que esto solo será posible a lo largo de la ruta cuántica a la vida: creemos que, sencillamente, la vida no funcionará sin estar conectada al ámbito cuántico.

Si un proyecto como este llegara a ponerse en marcha, entonces cabría por fin la posibilidad de producir vida nueva. Un progreso de esta índole podría poner en funcionamiento una tecnología viva realmente revolucionaria: la vida artificial capaz de navegar por el límite entre los mundos clásico y cuántico. Podrían construirse células vivas artificiales para que sirvieran como los ladrillos de edificios vivos realmente sostenibles; se podrían construir microcirujanos para que repararan y sustituyeran nuestros tejidos lesionados y gastados. Todas estas características fantásticas de la biología cuántica que hemos explorado en este libro, desde la fotosíntesis hasta la acción enzimática, y desde narices cuánticas hasta genomas cuánticos, brújulas cuánticas y quizás incluso cerebros cuánticos, podrían explotarse para construir potencialmente un mundo valiente y nuevo \* de organismos vivos sintéticos y cuánticos que podrían liberar a sus parientes nacidos de manera natural del trabajo fastidioso de proporcionar a la humanidad la mayoría de sus necesidades.

Pero, quizá más importante todavía, la capacidad de producir vida nueva a partir de cero le proporcionaría por fin a la biología una respuesta a la famosa máxima de Feynman de que «lo que no podemos hacer, no lo entendemos». Si tal proyecto tuviera de verdad éxito, entonces podríamos afirmar, finalmente, que por fin comprendemos la vida y su notable capacidad para aprovechar las fuerzas del caos para navegar por ese estrecho límite entre los mundos clásico y cuántico.

El sol de mediodía ha desatado fieros vientos  
y entre el verde mar y la bóveda azul  
ha encendido feroz guerra: al retumbante trueno...

WILLIAM SHAKESPEARE,  
*La tempestad* , Acto V, escena 1

## EPÍLOGO

# VIDA CUÁNTICA

La hembra de petirrojo que conocimos en el capítulo 1 ha pasado satisfactoriamente el invierno al sol del Mediterráneo, y ahora está dando saltitos por el bosque ralo y las antiguas piedras de Cartago, en Túnez, engordando a base de moscas, escarabajos, gusanos y semillas, todos ellos compuestos de biomasa tejida a partir del aire y la luz por las máquinas fotosintéticas accionadas cuánticamente que denominamos plantas y microbios. Pero ahora el sol está alto en el cielo del mediodía, y su intenso calor ha secado los arroyos someros que serpentean a través del bosque. Este se está volviendo reseco e inhóspito para nuestro pájaro europeo. Ya es hora de que emprenda la marcha.

Son las últimas horas del día, y el diminuto pájaro vuela para posarse en una rama situada en lo alto de un cedro. Se acicala primorosamente, al igual que hizo muchos meses antes, al tiempo que escucha los cantos de otros petirrojos que han sentido de manera parecida una necesidad aviar para prepararse en vistas a un vuelo prolongado. Cuando los últimos rayos del sol se hunden tras el horizonte, la hembra de petirrojo dirige su pico hacia el norte, extiende sus alas y se lanza al cielo del atardecer.

La hembra de petirrojo vuela hacia la costa de África del Norte y continúa a través del Mediterráneo, siguiendo exactamente la misma ruta (pero en dirección opuesta) que tomó hace seis meses, guiada de nuevo por su brújula aviar con su enmarañada aguja cuántica. Cada batir de alas está impulsado por la contracción de fibras musculares cuya energía ha producido el efecto de túnel cuántico de electrones y protones a través de enzimas respiratorios. Después de muchas horas alcanza la costa de España y desciende hasta un valle fluvial boscoso de Andalucía, donde descansa rodeada por abundante vegetación que incluye sauces, arces, olmos y alisos, árboles frutales y arbustos en flor, como adelfas, cada uno de ellos producto de la fotosíntesis, alimentada cuánticamente. Hasta sus conductos nasales llegan flotando moléculas odorantes, que se instalan sobre moléculas receptoras de olor y desencadenan acontecimientos de efecto de túnel cuántico que envían señales nerviosas, a través de canales iónicos cuánticamente coherentes, hasta su cerebro, y que le dicen que cerca hay flores de azahar, atendidas por abejas y otros insectos polinizadores que le proporcionarán un

sustento adicional para la siguiente fase de su viaje.

Después de muchos días de vuelo, la hembra petirrojo acaba encontrando el camino de vuelta al bosque de abetos de Escandinavia desde el que emprendió el viaje hace muchos meses. Su primera tarea será buscar una pareja. Los machos de petirrojo ya han llegado hace unos días, y la mayoría de ellos han encontrado lugares de anidación adecuados, de los que informan a las hembras con su canto. A nuestra hembra de petirrojo le atrae un pájaro particularmente melodioso y, como parte de su ritual de cortejo, disfruta de varias larvas que el macho ha recolectado. Después de una breve cópula, los espermatozoides del macho se unen con los óvulos de la hembra y la información genética de base cuántica, que codifica la forma, estructura, bioquímica, fisiología, anatomía e incluso el canto de cada par de aves se copia casi sin error en una nueva generación de petirrojos. Los pocos errores de efecto de túnel cuántico proporcionarán la materia prima para la futura evolución de la especie.

Desde luego, como hemos destacado en los capítulos anteriores, todavía no podemos estar seguros de que todas las características que acabamos de describir correspondan a una mecánica cuántica. Pero no cabe duda de que gran parte de lo que es (o era) maravilloso y único en los petirrojos, los peces payaso, las bacterias que sobreviven bajo el hielo antártico, los dinosaurios que deambulaban por las selvas del Jurásico, las mariposas monarca, las moscas del vinagre, las plantas y los microbios deriva del hecho de que, como nosotros, están basados en el mundo cuántico. Queda mucho por descubrir; pero la belleza de cualquier nueva área de investigación es lo totalmente desconocido. Tal como dijo Isaac Newton:

No sé qué es lo que puedo parecerle al mundo, pero a mí me parece que solo he sido como un muchacho que jugaba en la orilla del mar, y que de vez en cuando me he divertido al encontrar un guijarro más liso o una concha más bonita que de ordinario, mientras que el gran océano de la verdad se encuentra ante mí, todo por descubrir.

# 1. Introducción

- 1 . P. W. Atkins, «Magnetic field effects», *Chemistry in Britain* , 12, 1976, pág. 214.
- 2 . S. Emlen, W. Wiltschko, N. Demong y R. Wiltschko, «Magnetic direction finding: evidence for its use in migratory indigo buntings», *Science* , 193, 1976, págs. 505-508.

# 2. ¿Qué es la vida?

- 1 . S. Harris, «Chemical potential: turning carbon dioxide into fuel», *The Engineer* , 9 de agosto de 2012, disponible en: [http:// www.theengineer.co.uk/energy-andenvironment/in-depth/chemical-potential-turning-carbon-dioxide-into-fuel/1013459.article# ixzz2upriFA00](http://www.theengineer.co.uk/energy-andenvironment/in-depth/chemical-potential-turning-carbon-dioxide-into-fuel/1013459.article#ixzz2upriFA00).
- 2 . *Die Naturwissenschaften* , 20, 1932, págs. 815-821.
- 3 . Pascual Jordan, 1938, citado en P. Galison, M. Gordin y D. Kaiser (eds.), *Quantum Mechanics: Science and Society* , Londres, Routledge, 2002, pág. 346.
- 4 . H. C. Longuet-Higgins, «Quantum mechanics and biology», *Biophysical Journal* , 2, 1962, págs. 207-215.
- 5 . M. P. Murphy y L. A. J. O'Neil (eds.), *What is Life? The Next Fifty Years: Speculations on the Future of Biology* , Cambridge, Cambridge University Press, 1995.

# 3. Los motores de la vida

- 1 . R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. L. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* , Reading, MA, Addison-Wesley, 1964, 1, págs. 3-6.
- 2 . M. H. Schweitzer, Z. Suo, R. Avci, J. M. Asara, M. A. Allen, F. T. Arce y J. R. Horner, «Analyses of soft tissue from *Tyrannosaurus rex* suggest the presence of protein», *Science* , 316, 5822, 2007, págs. 277-280.
- 3 . J. Gross, «How tadpoles lose their tails: path to discovery of the first matrix metalloproteinase», *Matrix Biology* , 23: 1, 2004, págs. 3-13.
- 4 . G. E. Lienhard, «Enzymatic catalysis and transition-state theory», *Science* , 180: 4082, 1973, págs. 149-154.
- 5 . C. Tallant, A. Marrero y F. X. Gomis-Ruth, «Matrix metalloproteinases: fold and function of their catalytic domains», *Biochimica et Biophysica Acta (Molecular Cell Research)* , 1803: 1, 2010, págs. 20-28.
- 6 . A. J. Kirby, «The potential of catalytic antibodies», *Acta Chemica Scandinavica* , 50: 3, 1996, págs. 203-210.
- 7 . Don DeVault y Britton Chance, «Studies of photosynthesis using a pulsed laser: I. Temperature dependence of cytochrome oxidation rate in chromatium. Evidence for tunneling», *BioPhysics* , 6, 1966, pág. 825.
- 8 . J. J. Hopfield, «Electron transfer between biological molecules by thermally activated tunneling», *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 71, 1974, págs. 3640-3644.
- 9 . Yuan Cha, Christopher J. Murray y Judith Klinman, «Hydrogen tunnelling in enzyme reactions», *Science* , 243: 3896, 1989, págs. 1325-1330.
- 10 . L. Masgrau, J. Basran, P. Hothi, M. J. Sutcliffe y N. S. Scrutton, «Hydrogen tunneling in quinoproteins», *Archives of Biochemistry and Biophysics* , 428: 1, 2004, págs. 41-51; L. Masgrau, A.

Roujeinikova, L. O. Johannissen, P. Hothi, J. Basran, K. E. Ranaghan, A. J. Mulholland, M. J. Sutcliffe, N. S. Scrutton y D. Leys, «Atomic description of an enzyme reaction dominated by proton tunneling», *Science* , 312: 5771, 2006, págs. 237-241.

11 . David R. Glowacki, Jeremy N. Harvey y Adrian J. Mulholland, «Taking Ockham's razor to enzyme dynamics and catalysis», *Nature Chemistry* , 4, 2012, págs. 169-176.

## 4. La pulsación cuántica

1 . De la serie de televisión de la BBC *Fun to Imagine 2: Fire* (1983), disponible en YouTube: <http://www.youtube.com/watch?v=ITpDrdtGAmo>.

2 . Entrevista con CBC News, disponible en: <http://www.cbc.ca/news/technology/quantum-weirdness-used-by-plants-animals-1.912061>.

3 . G. S. Engel, T. R. Calhoun, E. L. Read, T-K. Ahn, T. Mančal, Y-C. Cheng, R. E. Blankenship y G. R. Fleming, «Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems», *Nature* , 446, 2007, págs. 782-786.

4 . I. P. Mercer, Y. C. El-Taha, N. Kajumba, J. P. Marangos, J. W. G. Tisch, M. Gabrielsen, R. J. Cogdell, E. Springate y E. Turc, «Instantaneous mapping of coherently coupled electronic transitions and energy transfers in a photosynthetic complex using angle-resolved coherent optical wave-mixing», *Physical Review Letters* , 102: 5, 2009, pág. 057402.

5 . E. Collini, C. Y. Wong, K. E. Wilk, P. M. Curmi, P. Brumer y G. D. Scholes, «Coherently wired light-harvesting in photosynthetic marine algae at ambient temperature», *Nature* , 463: 7281, 2010, págs. 644-647.

6 . G. Panitchayangkoon, D. Hayes, K. A. Fransted, J. R. Caram, E. Harel, J. Wen, R. E. Blankenship y G. S. Engel, «Long-lived quantum coherence in photosynthetic complexes at physiological temperature», *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 107: 29, 2010, págs. 12766-12770.

7 . T. R. Calhoun, N. S. Ginsberg, G. S. Schlau-Cohen, Y. C. Cheng, M. Ballottari, R. Bassi y G. R. Fleming , «Quantum coherence enabled determination of the energy landscape in light-harvesting complex II», *Journal of Physical Chemistry B* , 113: 51, 2009, págs. 16291-16295.

## 5. Buscando la casa de Nemo

1 . Éxodo 30: 34-5. [La versión española es de la *Sagrada Biblia* , versión de E. Nácar y A. Colunga (Madrid, Biblioteca de Autores Cristianos, 1972)].

2 . Citado en A. Le Guerier, *Scent: The Mysterious and Essential Power of Smell* , Nueva York, Kodasha America, 1994, pág. 12.

3 . R. Eisner, «Richard Axel: one of the nobility in science», *P&S Columbia University College of Physicians and Surgeons* , 25: 1, 2005.

4 . C. S. Sell, «On the unpredictability of odor», *Angewandte Chemie, International Edition* (inglés), 45: 38, 2006, págs. 6254-6261.

5 . K. Mori y G. M. Shepherd, «Emerging principles of molecular signal processing by mitral/tufted cells in the olfactory bulb», *Seminars in Cell Biology* , 5: 1, 1994, págs. 65-74.

6 . L. Turin, *The Secret of Scent: Adventures in Perfume and the Science of Smell* , Londres, Faber & Faber, 2006, pág. 4.

7 . L. Turin, «A spectroscopic mechanism for primary olfactory reception», *Chemical Senses* , 21: 6, 1996, págs. 773-791.

8 . L. Turin, *The Secret of Scent* , pág. 176.



9 . C. Burr, *The Emperor of Scent: A True Story of Perfume and Obsession* , Nueva: York Random House, 2003.

10 . A. Keller y L. B. Vosshall, «A psychophysical test of the vibration theory of olfaction», *Nature Neuroscience* , 7: 4, 2004, págs. 337-338.

11 . M. I. Franco, L. Turin, A. Mereshin y E. M. Skoulakis, «Molecular vibration-sensing component in *Drosophila melanogaster* olfaction», *Proceedings of the National Academy of Science* , 108: 9, 2011, págs. 3797-3802.

12 . J. C. Brookes, F. Hartoutsiou, A. P. Horsfield y A. M. Stoneham, «Could humans recognize odor by phonon assisted tunneling?», *Physical Review Letters* , 98: 3, 2007, pág. 038101.

## 6. La mariposa, la mosca del vinagre y el petirrojo cuántico

1 . F. A. Urquhart, «Found at last: the monarch's winter home», *National Geographic* , agosto de 1976.

2 . R. Stanewsky, M. Kaneko, P. Emery, B. Beretta, K. WagerSmith, S. A. Kay, M. Rosbash y J. C. Hall *et al.* , «The cryb mutation identifies cryptochrome as a circadian photoreceptor in *Drosophila* », *Cell* , 95: 5, 1998, págs. 681-692.

3 . H. Zhu, I. Sauman, Q. Yuan, A. Casselman, M. Emery-Le, P. Emery y S. M. Reppert, «Cryptochromes define a novel circadian clock mechanism in monarch butterflies that may underlie sun compass navigation», *PLOS Biology* , 6: 1, 2008, e4.

4 . D. M. Reppert, R. J. Gegear y C. Merlin, «Navigational mechanisms of migrating monarch butterflies», *Trends in Neurosciences* , 33: 9, 2010, págs. 399-406.

5 . P. A. Guerra, R. J. Gegear y S. M. Reppert, «A magnetic compass aids monarch butterfly migration», *Nature Communications* , 5: 4164, 2014, págs. 1-8.

6 . A. T. von Middendorf, *Die Isepiptesen Russlands Grundlagen zur Erforschung der Zugzeiten und Zugrichtungen der Vögel Russlands* , San Petersburgo, 1853.

7 . H. L. Yeagley y F. C. Whitmore, «A preliminary study of a physical basis of bird navigation», *Journal of Applied Physics* , 18: 1035, 1947.

8 . M. M. Walker, C. E. Diebel, C. V. Haugh, P. M. Pankhurst, J. C. Montgomery y C. R. Green *et al.* , «Structure and function of the vertebrate magnetic sense», *Nature* , 390: 6658, 1997, págs. 371376.

9 . M. Hanzlik, C. Heunemann, E. Holtkamp-Rotzler, M. Winklhofer, N. Petersen y G. Fleissner , «Superparamagnetic magnetite in the upper beak tissue of homing pigeons», *Biometals* , 13: 4, 2000, págs. 325-331.

10 . C. V. Mora, M. Davison, J. M. Wild y M. M. Walker, «Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon», *Nature* , 432, 2004, págs. 508-511.

11 . C. Treiber, M. Salzer, J. Riegler, N. Edelman, C. Sugar, M. Breuss, P. Pichler, H. Cadiou, M. Saunders, M. Lythgoe, J. Shaw y D. A. Keays, «Clusters of iron-rich cells in the upper beak of pigeons are macrophages not magnetosensitive neurons», *Nature* , 484, 2012, págs. 367-370.

12 . S. T. Emlen, W. Wiltschko, N. J. Demong, R. Wiltschko y S. Bergman, «Magnetic direction finding: evidence for its use in migratory indigo buntings», *Science* , 193: 4252, 1976, págs. 505508.

13 . L. Pollack, «That nest of wires we call the imagination: a history of some key scientists behind the bird compass sense», mayo de 2012, pág. 5, disponible en: <http://www.ks.uiuc.edu/History/magnetoreception>.

14 . *Ibid.* , pág. 6.

15 . K. Schulten, H. Staerk, A. Weller, H-J. Werner y B. Nickel, «Magnetic field dependence of the geminate recombination of radical ion pairs in polar solvents», *Zeitschrift für Physikalische Chemie* , s.l., 101, 1976, págs. 371-390.

- [16](#) . L. Pollack, «That nest of wires we call the imagination», *op. cit.* , pág. 11.
- [17](#) . K. Schulten, C. E. Swenberg y A. Weller, «A biomagnetic sensory mechanism based on magnetic field modulated coherent electron spin motion», *Zeitschrift für Physikalische Chemie* , s. l., 111, 1978, págs. 1-5.
- [18](#) . De P. Hore, «The quantum robin», *Navigation News* , octubre de 2011.
- [19](#) . N. Lambert, «Quantum biology», *Nature Physics* , 9: 10, 2013, y referencias que allí se citan.
- [20](#) . M. J. M. Leask, «A physicochemical mechanism for magnetic field detection by migratory birds and homing pigeons», *Nature* , 267, 1977, págs. 144-145.
- [21](#) . T. Ritz, S. Adem y K. Schulten, «A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds», *Biophysical Journal* , 78: 2, 2000, págs. 707-718.
- [22](#) . M. Liedvogel, K. Maeda, K. Henbest, E. Schleicher, T. Simon, C. R. Timmel, P. J. Hore y H. Mouritsen, «Chemical magnetoreception: bird cryptochrome 1a is excited by blue light and forms long-lived radical pairs», *PLOS One* , 2: 10, 2007, e1106.
- [23](#) . C. Nießner, S. Denzau, K. Stapput, M. Ahmad, L. Peichl, W. Wiltschko y R. Wiltschko, «Magnetoreception: activated cryptochrome 1a concurs with magnetic orientation in birds», *Journal of the Royal Society Interface* , 10: 88, 6 de noviembre de 2013, 20130638.
- [24](#) . T. Ritz, P. Thalau, J. B. Phillips, R. Wiltschko y W. Wiltschko, «Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass», *Nature* , 429, 2004, págs. 177-180.
- [25](#) . S. Engels, N-L. Schneider, N. Lefeldt, C. M. Hein, M. Zapka, A. Michalik, D. Elbers, A. Kittel, P. J. Hore y H. Mouritsen, «Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird», *Nature* , 509, 2014, págs. 353-356.
- [26](#) . E. M. Gauger, E. Rieper, J. J. Morton, S. C. Benjamin y V. Vedral, «Sustained quantum coherence and entanglement in the avian compass», *Physical Review Letters* , 106: 4, 2011, 040503.
- [27](#) . M. Ahmad, P. Galland, T. Ritz, R. Wiltschko y W. Wiltschko, «Magnetic intensity affects cryptochrome-dependent responses in *Arabidopsis thaliana* », *Planta* , 225: 3, 2007, págs. 615-624.
- [28](#) . M. Vacha, T. Puzova y M. Kvicalova, «Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroach», *Journal of Experimental Biology* , 212: 21, 2009, págs. 3473-3477.

## 7. Genes cuánticos

- [1](#) . Y. M. Shtarkman, Z. A. Kocer, R. Edgar, R. S. Veerapaneni, T. D'Elia, P. F. Morris y S. O. Rogers, «Subglacial Lake Vostok (Antarctica) accretion ice contains a diverse set of sequences from aquatic, marine and sediment-inhabiting bacteria and eukarya», *PLOS One* , vol. 8: 7, 2013, e67221.
- [2](#) . J. D. Watson y F. H. C. Crick, «Molecular structure of nucleic acids: a structure for deoxyribose nucleic acid», *Nature* , 171, 1953, págs. 737-738.
- [3](#) . C. Darwin, *El origen de las especies* , capítulo 4.
- [4](#) . J. D. Watson y F. H. C. Crick, «Genetic implications of the structure of deoxyribonucleic acid», *Nature* , 171, 1953, págs. 964-969.
- [5](#) . W. Wang, H. W. Hellenga y L. S. Beese, «Structural evidence for the rare tautomer hypothesis of spontaneous mutagenesis», *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 108: 43, 2011, págs. 17644-17648.
- [6](#) . A. Datta y S. Jinks-Robertson, «Association of increased spontaneous mutation rates with high levels of transcription in yeast», *Science* , 268: 5217, 1995, págs. 1616-1619.
- [7](#) . J. Bachl, C. Carlson, V. Gray-Schopfer, M. Dessing y C. Olsson, «Increased transcription levels induce higher mutation rates in a hypermutating cell line», *Journal of Immunology* , 166: 8, 2001, págs. 5051-5057.
- [8](#) . P. Cui, F. Ding, Q. Lin, L. Zhang, A. Li, Z. Zhang, S. Hu y J. Yu, «Distinct contributions of replication

and transcription to mutation rate variation of human genomes», *Genomics, Proteomics and Bioinformatics* , 10: 1, 2012, págs. 4-10.

[9](#) . J. Cairns, J. Overbaugh y S. Millar, «The origin of mutants», *Nature* , 335, 1988, págs. 142-145.

[10](#) . John Cairns sobre Jim Watson, Cold Spring Harbor Oral History Collection. Entrevista disponible en: <http://library.cshl.edu/oralhistory/interview/james-d-watson/meeting-jim-watson/watson/>.

[11](#) . J. Gribbin, *In Search of Schrödinger's Cat* , Londres, Wildwood House, 1984; reimpr. Black Swan, 2012. [Hay trad. cast.: *En busca del gato de Schrödinger* , Barcelona, Salvat, 1994.]

[12](#) . J. McFadden y J. Al-Khalili, «A quantum mechanical model of adaptive mutation», *Biosystems* , 50: 3, 1999, págs. 203-211.

[13](#) . J. McFadden, *Quantum Evolution* , Londres, HarperCollins, 2000.

[14](#) . Una reseña crítica se ha publicado en: <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101019>, y nuestra respuesta puede encontrarse en: <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0110083>.

[15](#) . H. Hendrickson, E. S. Slechta, U. Bergthorsson, D. I. Andersson y J. R. Roth *et al.* , «Amplification-mutagenesis: evidence that “directed” adaptive mutation and general hypermutability result from growth with a selected gene amplification», *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 99: 4, 2002, págs. 2164-2169.

[16](#) . Por ejemplo: J. D. Stumpf, A. R. Poteete y P. L. Foster, «Amplification of *lac* cannot account for adaptive mutation to Lac<sup>+</sup> in *Escherichia coli* », *Journal of Bacteriology* , 189: 6, 2007, págs. 2291-2299.

[17](#) . Por ejemplo: E. S. Kryachko, «The origin of spontaneous point mutations in DNA via Lowdin mechanism of proton tunneling in DNA base pairs: cure with covalent base pairing», *International Journal Of Quantum Chemistry* , 90: 2, 2002, págs. 910-923; Zhen Min Zhao, Qi Ren Zhang, Chun Yuan Gao y Yi Zhong Zhuo, «Motion of the hydrogen bond proton in cytosine and the transition between its normal and imino states», *Physics Letters A* , 359: 1, 2006, págs. 10-13.

[18](#) . A. D. Godbeer, J. S. Al-Khalili y P. D. Stevenson, «Modelling Proton Tunnelling in the Adenine-Thymine Base Pair», aceptado para publicación en *Physical Chemistry, Chemical Physics* , 2015.

## 8. La mente

[1](#) . Entrevista para *Los Angeles Times* , 14 de febrero de 1995.

[2](#) . J.-M. Chauvet, E. Brunel-Deschamps, C. Hillaire y J. Clottes, *Dawn of Art. The Chauvet Cave: The Oldest Known Paintings in the World* , Nueva York, Harry N. Abrams, 1996.

[3](#) . Citado en J. Hadamard, *Essay on the Psychology of Invention in the Mathematical Field* , Princeton, Princeton University Press, 1945. Sin embargo, según Daniel Dennett en «Memes and the exploitation of imagination», *Journal of Aesthetics and Art Criticism* , 48, 1990, págs. 127-135 (disponible en <http://ase.tufts.edu/cogstud/dennett/papers/memeimag.htm#5>), este pasaje que se cita con frecuencia probablemente no es de Mozart, y su origen es incierto. No obstante, hemos decidido conservarlo porque su autor, fuera quien fuese, consiguió describir de una manera muy adecuada un fenómeno familiar pero notable.

[4](#) . J. McFadden, «The CEMI field theory gestalt information and the meaning of meaning», *Journal of Consciousness Studies* , 20: 3-4, 2013, págs. 152-182.

[5](#) . J.-M. Chauvet *et al.* , *Dawn of Art* .

[6](#) . M. Kinsbourne, «Integrated cortical field model of consciousness», en *Experimental and Theoretical Studies of Consciousness* , CIBA Foundation Symposium, 174, Chichester (Reino Unido), Wiley, 2008.

[7](#) . K. Saeedi, S. Simmons, J. Z. Salvail, P. Dluhy, H. Riemann, N. V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, J. J. L. Morton y M. L. W. Thewalt, «Room-temperature quantum bit storage exceeding 29 minutes using ionized donors in silicon-28», *Science* , 342: 6160, 2013, págs. 830-833.

[8](#) . D. Hofstadter, *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* , Nueva York, Basic Books, 1999; 1.<sup>a</sup> ed., 1979. [Hay trad. cast.: *Gödel, Escher, Bach. Un eterno y grácil bucle* , Barcelona, Tusquets, 1987.]

<sup>9</sup> . R. Penrose, *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness* , Oxford, Oxford University Press, 1994. [Hay trad. cast.: *Las sombras de la mente. Hacia una comprensión científica de la conciencia* , Barcelona, Crítica, 1996.]

<sup>10</sup> . S. Hameroff, «Quantum computation in brain microtubules? The Penrose-Hameroff “Orch OR” model of consciousness», *Philosophical Transactions of the Royal Society Series A* , 356: 1743, 1998, págs. 1869-1895; S. Hameroff y R. Penrose, «Consciousness in the universe: a review of the “Orch OR” theory», *Physics of Life Reviews* , 11 (2014), págs. 39-78.

<sup>11</sup> . M. Tegmark, «Importance of quantum decoherence in brain processes», *Physical Review E* , 61, 2000, págs. 4194-4206.

<sup>12</sup> . Véase, por ejemplo: A. Litt, C. Eliasmith, F. W. Kroon, S. Weinstein y P. Thagard *et al.* , «Is the brain a quantum computer?», *Cognitive Science* , 30: 3, 2006, págs. 593-603.

<sup>13</sup> . G. Bernroider y J. Summhammer, «Can quantum entanglement between ion transition states effect action potential initiation?», *Cognitive Computation* , 4, 2012, págs. 29-37.

<sup>14</sup> . J. McFadden, *Quantum Evolution* ; J. McFadden, «Synchronous firing and its influence on the brain’s electromagnetic field: evidence for an electromagnetic theory of consciousness», *Journal of Consciousness Studies* , 9, 2002, págs. 23-50; S. Pockett, *The Nature of Consciousness: A Hypothesis* , Lincoln (Nebraska), Writers Club Press, 2000; E. R. John, «A field theory of consciousness», en *Consciousness and Cognition* , 10: 2, 2001, págs. 184-213; J. McFadden, «The CEMI field theory closing the loop», en *Journal of Consciousness Studies* , 20: 1-2, 2013, págs. 153-168.

<sup>15</sup> . J. McFadden, «The CEMI field theory gestalt information and the meaning of meaning».

<sup>16</sup> . C. A. Anastassiou, R. Perin, H. Markram y C. Koch, «Ephaptic coupling of cortical neurons», *Nature Neuroscience* , 14: 2, 2011, págs. 217-223; F. Frohlich y D. A. McCormick, «Endogenous electric fields may guide neocortical network activity», *Neuron* , 67: 1, 2010, págs. 129-143.

<sup>17</sup> . J. McFadden, «The CEMI field theory closing the loop».

<sup>18</sup> . W. Singer, «Consciousness and the structure of neuronal representations», *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* , 353: 1377, 1998, págs. 1829-1840.

## 9. Cómo empezó la vida

<sup>1</sup> . S. L. Miller, «A production of amino acids under possible primitive earth conditions», *Science* , 117: 3046, 1953, págs. 528-529.

<sup>2</sup> . G. Cairns-Smith, *Seven Clues to the Origin of Life: A Scientific Detective Story* , Cambridge, Cambridge University Press, 1985; nueva ed., 1990.

<sup>3</sup> . J. McFadden, *Quantum Evolution* ; J. McFadden y J. AlKhalili, «Quantum coherence and the search for the first replicator», en D. Abbott, P. C. Davies y A. K. Pati (eds.), *Quantum Aspects of Life* , Londres, Imperial College Press, 2008.

<sup>4</sup> . A. Patel, «Quantum algorithms and the genetic code», *Pramana Journal of Physics* , 56, 2001, págs. 367-381; disponible en: <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0002037.pdf>.

## 10. Biología cuántica: la vida en el límite de una tempestad

<sup>1</sup> . M. B. Plenio y S. F. Huelga, «Dephasing-assisted transport: quantum networks and biomolecules», *New Journal of Physics* , 10, 2008, 113019; F. Caruso, A. W. Chin, A. Datta, S. F. Huelga y M. B. Plenio , «Highly efficient energy excitation transfer in light-harvesting complexes: the fundamental role of noise-assisted transport», *Journal of Chemical Physics* , 131, 2009, págs. 105106-10521.

- [2](#) . M. Mohseni, P. Rebentrost, S. Lloyd y A. Aspuru-Guzik, «Environment-assisted quantum walks in photosynthetic energy transfer», *Journal of Chemical Physics* , 129: 17, 2008, pág. 174106.
- [3](#) . B. Misra y G. Sudarshan, «The Zeno paradox in quantum theory», *Journal of Mathematical Physics* , 18, 1977, pág. 746, disponible en: <http://dx.doi.org/10.1063/1.523304>.
- [4](#) . S. Lloyd, M. Mohseni, A. Shabani y H. Rabitz, «The quantum Goldilocks effect: on the convergence of timescales in quantum transport», arXiv preprint, arXiv:1111.4982, 2011.
- [5](#) . A. W. Chin, S. F. Huelga y M. B. Plenio, «Coherence and decoherence in biological systems: principles of noise-assisted transport and the origin of long-lived coherences», *Philosophical Transactions of the Royal Society A* , 370, 2012, págs. 3658-3671; A. W. Chin, J. Prior, R. Rosenbach, F. Caycedo-Soler, S. F. Huelga y M. B. Plenio, «The role of non-equilibrium vibrational structures in electronic coherence and recoherence in pigment-protein complexes», *Nature Physics* , 9: 2, 2013, págs. 113-118.
- [6](#) . E. J. O'Reilly y A. Olaya-Castro, «Non-classicality of molecular vibrations activating electronic dynamics at room temperature», *Nature Communications* , 5, 2014, artículo 3012.
- [7](#) . I. Stewart, *Does God Play Dice?: The New Mathematics of Chaos* , Harmondsworth, Penguin UK, 1997. [Hay trad. cast.: *¿Juega Dios a los dados? La nueva matemática del caos* , Barcelona, Crítica, 2001.] S. Kauffman, *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution* , Nueva York, Oxford University Press, 1993. J. Gleick, *Chaos: Making a New Science* , Nueva York, Random House, 1997.
- [8](#) . M. O. Scully, K. R. Chapin, K. E. Dorfman, M. B. Kim y A. Svidzinsky, «Quantum heat engine power can be increased by noiseinduced coherence», *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 108: 37, 2011, págs. 15097-15100.
- [9](#) . K. E. Dorfman, D. V. Voronine, S. Mukamel y M. O. Scully, «Photosynthetic reaction center as a quantum heat engine», *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 110: 8, 2013, págs. 2746-2751.
- [10](#) . N. Killoran, S. F. Huelga y M. B. Plenio, «Enhancing lightharvesting power with coherent vibrational interactions: a quantum heat engine picture», arXiv preprint, [arxiv.org/abs/1412.4136](http://arxiv.org/abs/1412.4136), 2014.
- [11](#) . M. Ferretti, V. I. Novoderezhkin, E. Romero, R. Augulis, A. Pandit, D. Zigmantas y R. Van Grondelle, «The nature of coherences in the B820 bacteriochlorophyll dimer revealed by two-dimensional electronic spectroscopy», *Physical Chemistry Chemical Physics* , 16, 2014, págs. 9930-9939.
- [12](#) . C. R. Pudney, A. Guerriero, N. J. Baxter, L. O. Johannissen, J. P. Waltho, S. Hay y N. S. Scrutton, «Fast protein motions are coupled to enzyme H-transfer reactions», *Journal of the American Chemical Society* , 135, 2013, págs. 2512-2517.
- [13](#) . J. P. Klinman y A. Kohen, «Hydrogen tunnelling links protein dynamics to enzyme catalysis», *Annual Review of Biochemistry* , 82, 2013, págs. 471-496.
- [14](#) . R. Armstrong y N. Spiller, «Living quarters», *Nature* , 467, 2010, págs. 916-919.
- [15](#) . S. Leduc, *The Mechanism of Life* , Londres, William Heinemann, 1914.
- [16](#) . T. Toyota, N. Maru, M. M. Hanczyc, T. Ikegami y T. Sugawara, «Self-propelled oil droplets consuming “fuel” surfactant», *Journal of the American Chemical Society* , 131: 14, 2009, págs. 5012-5013.
- [17](#) . I. A. Chen, K. Salehi-Ashtiani y J. W. Szostak, «RNA catalysis in model protocell vesicles», *Journal of the American Chemical Society* , 127: 38, 2005, págs. 13213-13219.
- [18](#) . R. J. Peters, M. Marguet, S. Marais, M. W. Fraaije, J. C. van Hest y S. Lecommandoux , «Cascade reactions in multicompartimentalized polymersomes», *Angewandte Chemie International Edition (inglés)* , 53: 1, 2014, págs. 146-150.
- [19](#) . D. Hayes, G. B. Griffin y G. S. Engel, «Engineering coherence among excited states in synthetic heterodimer systems», *Science* , 340: 6139, 2013, págs. 1431-1434.
- [20](#) . Dorfman *et al.* , «Photosynthetic reaction center as a quantum heat engine», *op. cit.*
- [21](#) . C. Creatore, M. A. Parker, S. Emmott y A. W. Chin, «An efficient biologically-inspired photocell enhanced by quantum coherence», arXiv preprint, arXiv:1307.5093, 2013.
- [22](#) . C. Tan, S. Saurabh, M. P. Bruchez, R. Schwartz y P. Leduc, «Molecular crowding shapes gene expression in synthetic cellular nanosystems», *Nature Nanotechnology* , 8: 8, 2013, págs. 602608; M. S. Cheung, D. Klimov y D. Thirumalai, «Molecular crowding enhances native state stability and refolding rates of globular proteins», *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 102: 13, 2005, págs. 4753-

4758.

\* Convencionalmente, a las teorías físicas deterministas que precedieron a la mecánica cuántica, incluida la relatividad especial y general, se las conoce en conjunto como «física clásica», que es distinta de la mecánica cuántica no clásica.

\* Pero sería erróneo pensar que el efecto de túnel cuántico implica el paso de ondas físicas a través de barreras; más bien, se debe a ondas matemáticas abstractas que nos proporcionan la probabilidad de encontrar instantáneamente la partícula cuántica al otro lado de la barrera. En este libro intentamos, siempre que es posible, proporcionar analogías intuitivas para explicar fenómenos cuánticos, pero la realidad es que la mecánica cuántica es absolutamente contraria al sentido común y existe el peligro de simplificar en exceso con la finalidad de aclarar las cosas.



\* Todos los elementos químicos se presentan en variedades diferentes llamadas isótopos. Un elemento viene definido por el número de protones en los núcleos de sus átomos: el hidrógeno tiene uno, el helio dos, y así sucesivamente. Pero el número de neutrones que el núcleo contiene puede variar. Así, el hidrógeno se presenta en tres variedades (isótopos): los átomos del hidrógeno normal contienen un único protón, mientras que los de los isótopos más pesados, el deuterio y el tritio, contienen uno y dos neutrones, respectivamente.

\*\* Término que deriva de *spin* , que significa «girar» en inglés. (*N. del t .*)

\* Variedad rápida de jazz. (*N. del t.*)

\*\* Técnicamente, el deuterón debe su estabilidad a una característica de la fuerza nuclear que mantiene juntos al protón y el neutrón, llamada «interacción de tensor», que obliga a la pareja a hallarse en una superposición cuántica de dos estados de momento angular, llamados onda S y onda D.

\* Debemos aclarar que los físicos cuánticos no emplean este tipo de lenguaje simplista. De manera más correcta, se dice que dos partículas distantes pero enmarañadas se hallan conectadas no localmente porque son partes del mismo estado cuántico. Pero, claro, decirlo de esta manera no ayuda mucho, ¿verdad?

\* Sin embargo, puesto que puede considerarse que la luz es tanto una onda como una partícula, la idea de polarización (a diferencia del espín cuántico) es más fácil de entender como la dirección en la que oscila una onda luminosa.

\* De nuevo, en pro de la claridad, aquí simplificamos deliberadamente sobremanera. Medir una determinada propiedad de una partícula cuántica, pongamos por caso su posición, significa que ya no estamos inseguros acerca de dónde se halla; en cierto sentido, la partícula se enfoca y deja de ser borrosa. Sin embargo, esto no significa que ahora se comporte como una partícula clásica. Debido al principio de incertidumbre de Heisenberg, ahora ya no tiene una velocidad fija. De hecho, una partícula en una posición definida se hallará, en aquel momento del tiempo, en una superposición de movimientos a todas las velocidades posibles y en todas las direcciones posibles. Y en lo que respecta al espín cuántico, puesto que dicha propiedad solo se encuentra en el mundo cuántico, medirlo no hace ciertamente que la partícula se comporte de la manera clásica.

\* Polvo de estrellas. (*N. del t.*)



\* A finales del siglo xix, el físico escocés James Clerk Maxwell demostró que las fuerzas eléctrica y magnética eran dos facetas de la misma fuerza electromagnética.

\* Nos referimos aquí al juego del billar americano, de troneras o *pool* .

\* «Energía libre» es uno de los conceptos más importantes de la termodinámica, y corresponde perfectamente a la descripción que aquí se presenta.

\* Hooke describió «pequeñas celdas» (*cellulae* , diminutivo de *cellae* , celdas). En las lenguas románicas, el término biológico deriva del diminutivo (como célula, en español, de *cellula* ), mientras que en las anglosajonas deriva directamente del término latino original (como *cell* , en inglés, de *cella* ). (N. del t .)

\* Y animales y plantas en general. (*N. del t.*)

\* Aunque debe aclararse que algunos bioquímicos eran también vitalistas.

\* Sin embargo, en aquella época, los experimentos de Avery no se consideraron pruebas definitivas de que el ADN era el material genético; dicho debate todavía resonaba en la época de Crick y Watson.

\*\* Estas estructuras químicas consisten en bases nucleotídicas compuestas de carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno, junto con al menos un grupo fosfato, que están fijadas químicamente a la hebra de ADN.



\* Un microlitro de agua tiene un volumen de un milímetro cúbico.

\* De hecho, la relación se resume en la ecuación propuesta por Max Planck en 1900, que se escribe  $E = h\nu$ , en la que  $E$  es la energía,  $\nu$  es la frecuencia y  $h$  es la llamada constante de Planck. Adviértase que, según esta ecuación, la energía es proporcional a la frecuencia.

\* A este proceso se le denomina a veces «desplome de la función de onda», y en los manuales modernos al uso se refiere a un cambio en la descripción matemática del electrón y no a un desplome físico de una onda real.

\* Fue Max Born quien estableció por primera vez la conexión entre la función de onda de Schrödinger y las probabilidades en mecánica cuántica.

\* Trad. cast.: Barcelona, Tusquets, 2007. (*N. del t.*)

\* La ley se resume en la ecuación  $PV = nRT$ , en la que  $n$  es la cantidad de gas en la muestra,  $R$  es la constante universal de los gases,  $P$  es la presión,  $V$  es el volumen de un gas y  $T$  es la temperatura.

\* «Nano» se refiere a estructuras en la escala de nanómetros. Un nanómetro es una milmillonésima de metro.

\* Tierras yermas, malpaíses. (*N. del t .*)



\* Las levaduras son hongos unicelulares.

\*\* Timoteo II, 4:1. (*N. del t.*)

\* Existen, desde luego, excepciones muy importantes: principalmente, hay sustancias químicas como el oxígeno que, aunque reactivas, se renuevan continuamente por procesos que tienen lugar en nuestro planeta, de manera más notable los de los organismos vivos, como las plantas, que vierten oxígeno a nuestra atmósfera.

\* La sustancia química inicial en una reacción se denomina reactante; sin embargo, cuando la reacción es mediada por un catalizador tal como un enzima, entonces su sustancia química inicial se denomina sustrato.

\* La mayoría de los nombres de enzimas empiezan con el de la molécula inicial, el «sustrato», que se consume en la reacción, y terminan con *-asa* ; de manera que la colagenasa es un enzima que actúa sobre el colágeno.

\* Este tipo de enlace se denomina enlace covalente.

\* *Fantastic Voyage* , dirigida por Richard Fleischer. (N. del t .)

\* Un ion es un átomo que porta una carga eléctrica como resultado de haber perdido electrones (ion positivo) o de haberlos ganado (ion negativo).



\* En español; en el original inglés se distingue entre *respiration* y *breathing* . (N. del t .)

\*\* Como el lector recordará del capítulo 2, los orgánulos son los «órganos» de las células: estructuras internas que realizan funciones particulares, como la respiración.

\* Forma reducida del dinucleótido de nicotinamida y adenina. (*N. del t.*)

\* La mayoría de los científicos utilizan el kelvin como unidad de temperatura. Un cambio de 1 K en temperatura corresponde a un cambio de 1 °C. Sin embargo, la escala Kelvin empieza en lo que se denomina el cero absoluto, que equivale a  $-273\text{ °C}$ . Así, por ejemplo, la temperatura del cuerpo humano es de 310 K.

\* El lector podría preguntarse, por lo tanto, por qué el efecto de túnel cuántico es necesario para explicar los procesos de fusión que se producen en el interior del Sol. Pero allí, incluso las temperaturas y presiones increíblemente elevadas no son suficientes para superar la repulsión eléctrica que impide la fusión de los dos protones cargados positivamente, de manera que se necesita que la mecánica cuántica eche un cable.

\* Se trata de fluctuaciones en el volumen (una especie de pulso) que crean dos notas que son casi de la misma frecuencia y, por lo tanto, cercanas en tono.

\* Es necesario que las rendijas sean muy estrechas y estén muy juntas. En los experimentos realizados en la década de 1990, la pantalla era una hoja de pan de oro y las rendijas tenían una anchura del orden de un solo micrómetro (una milésima de milímetro).

\* Aquí suponemos que el detector tiene una eficiencia del cien por cien y que es seguro que se disparará si un átomo pasa a través de la rendija que está vigilando, pero que no interfiere con la trayectoria del átomo. Desde luego, en la práctica esto no es posible puesto que inevitablemente perturbamos el paso del átomo mediante el acto de observación, como veremos a continuación.



\* Un femtosegundo es una milésima de una billonésima de segundo, o  $10^{-15}$  segundos.

\* El problema del viajante de comercio estriba en encontrar la ruta más corta que pasa por un gran número de ciudades. Desde el punto de vista matemático se describe como «un problema NP-difícil»: es decir, un problema para el que no existe una solución rápida, ni siquiera en teoría; la única manera de encontrar la solución óptima es realizar una búsqueda de todas las rutas posibles, intensiva y exhaustiva desde el punto de vista del cómputo.

\* De hecho, la descripción de Feynman es en realidad incorrecta, pues el oxígeno no es arrancado del carbono en la fotosíntesis.

\* Cuando decimos que «el agua se quema» no queremos dar a entender, desde luego, que el agua sea un combustible como el carbón. En cambio, empleamos el término de manera laxa para denotar el proceso molecular de la oxidación.

\*\* Forma reducida del dinucleótido fosfato de nicotinamida y adenina. (*N. del t.*)

\* Abreviación de ribulosa 1,5 bifosfato carboxilasa-oxigenasa. (*N. del t.*)

\* Aquí tendríamos que añadir una reserva, puesto que la mecánica cuántica, hasta el presente, no puede explicar la fuerza gravitatoria, de la misma manera que la relatividad general (que es como comprendemos la gravedad) parece ser incompatible con la mecánica cuántica. Unificar la mecánica cuántica y la relatividad general para construir una teoría cuántica de la gravedad sigue siendo uno de los mayores retos a los que se enfrenta la física.

\* Por desgracia, dicha popularidad amenaza ahora a estos animales en la naturaleza, pues se han convertido en favoritos de los recolectores furtivos, que los capturan en exceso para suministrar peces payaso al mercado en auge de los aficionados a los acuarios. De manera que, lector, no mantengas a Nemo en tu hogar: pertenece a los arrecifes de coral.



\* Se cree que las mareas más intensas en esta época ayudan a la dispersión.

\* La gran diferencia entre el número de animales marcados cuando jóvenes y el de capturados de nuevo al cabo de algunos años puede explicarse por la elevadísima mortalidad a que se hallan sometidas todas las especies de peces, especialmente en las fases iniciales de su vida. (*N. del t.*)

\* « A rose by any other name would smell as sweet». De *Romeo y Julieta* , de William Shakespeare (Acto II, escena II). (*N. del t .*)

\* Adviértase el racismo implícito.

\* 1-metil-4-(1-metiletenil)-ciclohexano.

\* Un picoampere es una billonésima ( $10^{-12}$ ) de ampere.

\* En este contexto, «expresadas» significa un gen que es activo en el sentido de que su información se copia en ARN, que después se incorpora a la maquinaria de síntesis proteínica para producir la proteína codificada por este gen, como un enzima o un receptor olfativo determinado.

\* Tradicionalmente, el almizcle se obtenía de varias fuentes naturales, entre ellas las glándulas sexuales del ciervo almizclero, las glándulas faciales del buey almizclero, las heces de la marta y la orina del damán de El Cabo. Pero en la actualidad casi todo el almizcle para perfumería es sintético.



\* Una molécula quiral no tiene una imagen especular superponible. figura 5.3. El limoneno (a) y el dipenteno (b) son moléculas cuyas estructuras son imágenes especulares la una de la otra, y que tienen olores muy diferentes. Las moléculas difieren solo en la orientación del grupo químico inferior, que se representa dirigido hacia la parte inferior de la página (enlace que apunta hacia abajo) en el limoneno, pero hacia la parte superior (enlace que apunta hacia arriba) en el dipenteno. Desde luego, podría hacerse que la molécula de dipenteno diera la vuelta, de manera que su grupo químico se dirigiera hacia la parte inferior de la página como el limoneno, pero entonces su doble enlace saltaría hacia la izquierda, y no hacia la derecha, de modo que seguiría siendo diferente. Las moléculas son como los guantes de la mano derecha y de la izquierda.

\* En realidad, Hendrix tocaba una guitarra diestra invertida pero cambiaba la posición de las cuerdas, de manera que la cuerda prima se hallaba en la misma posición que si tocara en una guitarra siniestra.

figura 5.4. Moléculas que tienen las mismas partes químicas básicas, como la vainillina (o vanilina) y la isovainillina (o isovanilina), que se muestran aquí, pueden tener, no obstante, olores muy diferentes.

\* Por ejemplo, la (4S,4aS,8aR)-(K)-geosmina y la molécula que es su imagen especular, la (4R,4aR,8aS)-(C)-geosmina.

\* De anosmia, la incapacidad de detectar olores: una condición que, en los humanos, suele estar asociada con trauma en el epitelio nasal, aunque se conocen algunas formas genéticas raras.

\* Doble sentido en el original que se pierde en español, pues *sniff* también puede traducirse por esnifar (una droga), término este que deriva, directamente, del inglés. (*N. del t.*)

<sup>\*</sup> Véase, por ejemplo, J. Baker, *50 cosas que hay que saber sobre física cuántica*, Barcelona, Ariel, 2014. (*N. del t.*)

\* De *spin* , «girar». (*N. del t .*)

\* El término «triplete» que utilizamos aquí puede confundir al no experto en mecánica cuántica, sobre todo porque se refiere tan solo a un par de electrones, de modo que aquí va una breve explicación: se dice que un electrón tiene un espín de  $1/2$ . Así, cuando un par de electrones tienen un espín opuesto, estos valores se anulan:  $1/2 - 1/2 = 0$ . Se dice que este es el estado singlete de espín. Pero cuando sus espines señalan en la misma dirección, estos valores se suman:  $1/2 + 1/2 = 1$ . El término «triplete» se refiere al hecho de que un espín combinado de 1 puede estar señalando en tres direcciones posibles (arriba, abajo y hacia un lado).



\*\* Los dos electrones no emparejados en una molécula de oxígeno que mantiene juntos sus dos átomos se hallan normalmente en un estado triplete de espín.

\* Ni los gallos ni las gallinas migran, desde luego, ni siquiera en estado salvaje. Pero parece que todavía conservan la magnetoecepción.

\* Pteridospermatófitos, *Ginkgo biloba* y cicadáceas, respectivamente. (N. del t.)

\* Tranquilo, pacífico. (*N. del t .*)

\*\* Este, oriente. (*N. del t .*)

\* La actual base del glaciar situado sobre el lago se depositó hace más de cuatrocientos mil años, pero el lago pudo haber estado helado durante más tiempo. No está claro si el glaciar actual sustituyó a glaciares anteriores o si el lago experimentó períodos libres de hielo entre las edades del hielo.

\* Organismos que viven en ambientes extremos (desde nuestra perspectiva).

\* Pero véase más adelante lo que postula la teoría de la panspermia. (*N. del t.*)



\* Los cánceres los causan las mutaciones en genes que controlan el crecimiento celular, lo que produce un crecimiento celular incontrolado y, con ello, tumores.

\* Desde luego, se la podría llamar con la misma facilidad teoría de la selección natural de Wallace, por el gran naturalista y geógrafo británico Alfred Russel Wallace, quien, durante un acceso de malaria mientras viajaba por los trópicos, dio prácticamente con la misma idea que Darwin.

\* En el sentido de «bromas». (*N. del t.*)

\* Su aldea natal, que formaba parte del imperio austrohúngaro, se encuentra ahora en la República Checa. (*N. del t.*)

\* El término «genética» lo inventó en 1905 William Bateson, un genetista inglés y defensor de las ideas de Mendel; el término «gen» lo sugirió cuatro años después el botánico danés Wilhelm Johannsen para distinguir entre el aspecto externo de un individuo (su fenotipo) y sus genes (su genotipo).

figura 7.2. a) Un par de bases A-T estándar con los protones en sus posiciones normales; b) los protones emparejados han saltado a través de la doble hélice para constituir la forma tautómera de A y T.

\* Las formas tautómeras alternativas de la guanina y la timina se conocen como enol o ceto, según la posición de los protones codificadores; mientras que los tautómeros de la citosina y la adenina se conocen como formas imino o amino.

\* Es decir, que carecía de un marco matemático riguroso.

\*\* En realidad, habrá más de un enlace de hidrógeno que mantenga unidos el par de bases, pero la argumentación funciona igualmente bien si simplificamos el ejemplo a solo uno.



\* Las células hambrientas y estresadas pueden continuar intentando copiar su ADN, pero es probable que la replicación resulte abortada debido a los limitados recursos disponibles, de modo que solo se producen cortos fragmentos correspondientes a unos pocos genes.

\* Esta cuestión es actualmente objeto de intenso debate en biología cuántica, es decir, ¿descubrió la vida sus ventajas cuánticas, o bien la mecánica cuántica se subió simplemente al carro?

\* Aunque resulte ofensivo para muchos aficionados al cine, la película de Herzog se hizo en 3D.

\* Poseedores de membrana amniótica, o amnios. (*N. del t.*)

\* El tamaño de internet no es fácil de estimar, pero cada página web se conecta actualmente, en promedio, a menos de cien páginas, mientras que las neuronas tienen conexiones sinápticas con miles de neuronas. Así, en términos de conexiones, hay del orden de un billón entre páginas web, y cerca de cien veces esta cifra entre neuronas en el cerebro humano. Pero la Red se duplica en tamaño cada pocos años, de modo que se prevé que dentro de una década rivalice en complejidad con el cerebro humano. ¿Se hará consciente entonces internet?

\* Trad. cast.: Madrid, Mondadori, 1991. (*N. del t.*)

\* Para el lector físico, lo que describimos aquí es una esfera de Bloch.

\* En realidad, los cordeles representan la relación matemática entre la fase y la amplitud de los cubits enmarañados ejemplificados en la ecuación de Schrödinger.



\* Johnjoe quiere aprovechar la oportunidad para pedir disculpas a Stuart Hameroff por escribir mal su nombre en su libro *Quantum Evolution* .

\* Este es otro concepto difícil, pero Penrose propuso una interpretación totalmente idiosincrásica del problema de la medición en la mecánica cuántica al postular que para sistemas cuánticos suficientemente complejos (y, por lo tanto, más voluminosos), su efecto gravitatorio sobre el espacio-tiempo crea una perturbación que desploma la función de onda, transformando los sistemas cuánticos en clásicos, y que este proceso genera nuestros pensamientos. Los detalles de esta extraordinaria teoría están bien descritos en los libros de Penrose, pero es justo decir que, hasta la fecha, su propuesta tiene pocos defensores en la comunidad de la física cuántica.

\* Un picosegundo es una billonésima (o  $10^{-12}$ ) de segundo.

\* Literalmente, *Greenland* o *Grønland* es «País verde». (N. del t.)

\* Ofiolita metamorfizada. (*N. del t .*)

\*\* Se cree que la Tierra se condensó a partir de residuos solares hace unos cuatro mil quinientos millones de años, pero que solo formó una corteza sólida alrededor de quinientos millones de años después.

\* Esto excluye a los virus, que solo pueden replicarse con la ayuda de una célula viva.

\* El término que se suele usar para describir vibraciones moleculares incoherentes.



\* La amplitud de las vibraciones es relativamente pequeña, de modo que no emiten mucha energía.

\* Personaje de «Ricitos de Oro y los tres osos», cuento popular infantil; señala el justo medio: ni demasiado, ni demasiado poco. (*N. del t.*)

\* Las plantas poseen dos fotosistemas, I y II. figura 10.3. La muerte quizá representa la separación de la conexión del organismo vivo con el ámbito cuántico ordenado, lo que lo deja impotente para resistir las fuerzas aleatorizadoras de la termodinámica.

\* Llevada al cine por John Hillcoat en 2009. (*N. del t.*)

\* Los ribosomas pueden no ser simplemente los traductores pasivos de genes, como se creía hasta ahora. Los biólogos Root-Bernstein, padre e hija, creen que son el eslabón perdido entre las moléculas prebióticas sencillas y el primer ser vivo que existió en la Tierra (LUCA, el último antepasado común universal): A. Root-Bernstein, y R. Root-Bernstein, «The ribosome as a missing link in the evolution of life», *Journal of Theoretical Biology* , 367 (2015), págs. 130-158. (N. del t .)

\* *Brave New World* (1932) es el título de la famosa novela de Aldous Huxley, traducida generalmente en los países hispanohablantes como *Un mundo feliz*. (N. del t.)

CONSULTE OTROS TÍTULOS DEL CATÁLOGO EN:  
[www.rbalibros.com](http://www.rbalibros.com)