

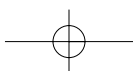
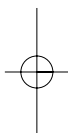
Orígenes



Drakontos

Director:

José Manuel Sánchez Ron



Orígenes

La datación científica del pasado

Matthew Hedman

Traducción castellana de
Javier García Sanz

CRÍTICA
Barcelona

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del *copyright*, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

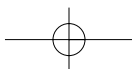
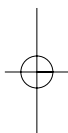
Título original:
THE AGE OF EVERYTHING
How Science explores the Past
The University of Chicago Press

Diseño de la cubierta:
Ilustración de la cubierta:
Realización: Átona, SL

©
© 2008 de la traducción castellana para España y América:
Editorial Crítica, SL, Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona
ISBN: 9

Depósito legal:
Impreso en España
2008. – BROSMAC, SL, Polígono Industrial, 1, calle C, Móstoles (Madrid)

*A mi madre y a mi padre,
y a Judy Burns,
por ayudarme a llevar a buen término este proyecto*



Agradecimientos

Muchas personas me han ayudado en este libro durante años. Bruce Winstein y James Pilcher me animaron a impartir la serie de conferencias públicas que formaron la base de este libro. El personal del Enrico Fermi Institute y el Kalvi Institute for Cosmological Physics, en especial Nanci Carrothers, Charlene Neal y Dennis Gordon, me ayudó en las cuestiones prácticas de dichas conferencias. También debo dar las gracias a todos los miembros de la colaboración CAPMAP, en especial a Dorotea Samtleben, que me aguantó mientras trabajaba en las charlas e incluso asistió a algunas conferencias. Al final de las conferencias, Bruce Winstein y Christie Henry, de la University of Chicago Press, me convencieron para desarrollar mis notas y darles forma de libro, y el personal de la Cornell University, en especial J. A. Burns y P. D. Nicholson, ha sido muy tolerante con mis esfuerzos por hacerlo. En la preparación de este texto me he beneficiado de los comentarios de Christie Henry, Michael Koplow y varios revisores.

Todd Telander me proporcionó muchas de las excelentes ilustraciones para este libro. Mi hermano, Kevin, también leyó el texto y me hizo muchas sugerencias útiles para mejorar la prosa. Durante todo este proceso, mis padres, Curt y Sally Hedman, me ofrecieron ánimo y apoyo constante. Las siguientes personas proporcionaron referencias y otras informaciones para este libro o me ayudaron a entender mejor algunos de los conceptos discutidos: John Harris, los miembros de la

10 Orígenes

Chicago Maya Society, K. E. Spence, John C. Whittaker, Wen-Hsiung Li, J. David Archibald, Robert Clayton, Stephen Simon, Andrey Kravstov, James Truran, David Chernoff, Ira Wasserman, Stephan Meyer, Erin Sheldon, Rick Kline y Wayne Hu. Por supuesto, cualquier error en estas páginas es únicamente de mi responsabilidad.

Introducción

Desde nuestra perspectiva del siglo XXI, los sucesos del pasado pueden parecer a veces increíblemente lejanos. Con la compleja tecnología actual y las redes económicas y políticas en constante cambio, resulta a veces difícil imaginar cómo era la vida hace tan sólo cien años, y mucho menos comprender los enormes períodos de tiempo que precedieron a la aparición de los seres humanos sobre este planeta. Sin embargo, gracias a avances recientes en los campos de la historia, la arqueología, la biología, la química, la geología, la física y la astronomía, incluso el pasado lejano está, en cierta manera, más cerca de nosotros que nunca. Los símbolos elegantemente grabados que se han encontrado en el interior recóndito de las selvas tropicales de América Central, ininterpretables durante siglos, nos revelan ahora las maquinaciones políticas de los señores mayas. Recientes estudios interdisciplinarios de las Grandes Pirámides de Egipto están proporcionando ideas fascinantes acerca de cómo y cuándo fueron construidas estas increíbles estructuras. Al mismo tiempo, los restos de humildes árboles están esclareciendo cómo ha cambiado la superficie del Sol durante los últimos diez milenios. Otros fragmentos antiguos de madera nos están ayudando a entender mejor la vida de los primeros habitantes del Nuevo Mundo. Restos fósiles, junto con muestras de tejidos de animales modernos (personas incluidas), sugieren que los antropólogos pueden estar cerca de resolver el viejo rompecabezas de cuándo y cómo empezaron nuestros ancestros a caminar sobre dos piernas. Un trabajo simi-

12 Orígenes

lar podría también ayudar a los biólogos a descubrir cómo un grupo de pequeñas criaturas parecidas a musarañas que vivieron a la sombra de los dinosaurios, dio lugar a criaturas tan diversas como gatos, conejos, murciélagos, caballos y ballenas. Los orígenes de la Tierra y del Sistema Solar están siendo explorados con gran detalle gracias en parte a las rocas que caen del cielo, mientras que la historia del universo puede leerse en la luz de estrellas lejanas. Incluso el ruido cósmico que se manifiesta en nuestros televisores permite a los cosmólogos mirar hacia atrás hasta el mismo principio de nuestro universo.

Para conseguir todo esto (y mucho más), estudiosos y científicos han tenido que desarrollar muchas maneras ingeniosas de averiguar cuándo han sucedido las cosas. Sin esta información, las reliquias de eras pasadas —desde impresionantes monumentos de piedra a débil luz estelar, pasando por humildes ramitas— sólo pueden proporcionar atisbos del pasado dispersos y casi incomprensibles. Sin embargo, una vez que estas claves pueden ordenarse y organizarse en el tiempo, la imagen se hace mucho más clara. Se hace posible evaluar las causas, las consecuencias, la naturaleza y la importancia de sucesos antiguos, y lo que antes era meramente un conjunto de hechos aleatorios toma forma en una historia coherente.

Este libro explora los métodos de que se valen investigadores en una amplia variedad de campos para determinar la edad de las cosas. Surgió de una serie de conferencias que impartí en la primavera de 2004 mientras era un investigador del Instituto Kavli de Física Cosmológica de la Universidad de Chicago. Las charlas eran parte del programa Compton Lectures dedicado a ofrecer al público información sobre descubrimientos recientes en ciencias físicas. Entonces yo estaba trabajando como radioastrónomo y cosmólogo, de modo que hubiera sido natural que describiera los muchos avances excitantes que habían tenido lugar en esos campos. Sin embargo, varios expertos habían dado ya muy buenas conferencias sobre estos temas, y eso me animó a seguir un camino diferente. Siempre he tenido un apasionado interés en un amplio abanico de disciplinas académicas —incluyendo historia antigua, arqueología, biología evolutiva, paleontología y ciencia planetaria— y esto me dio la oportunidad de ofrecer una serie de charlas multidisciplinarias, cada una de ellas centrada en un método

Introducción 13

diferente de datar objetos y sucesos antiguos, y en cómo se está utilizando esto para revisar y reconstruir nuestra visión del pasado.

Como las conferencias originales, este libro no pretende ofrecer un catálogo exhaustivo de todas las técnicas de datación. Tampoco presenta una especie de revisión general de la historia de la humanidad, la Tierra y el universo. Más bien se centrará en unos pocos momentos específicos en el tiempo y en una muestra de métodos de medir la edad. Espero que este enfoque permita al lector obtener una comprensión más profunda de las técnicas utilizadas en muchos campos diferentes y apreciar los retos especiales que supone el hacer investigación en temas que van desde el origen del universo a la política de las llanuras mayas. Además, todos los temas incluidos en este libro son áreas de estudio muy activas. Por consiguiente, los capítulos que siguen también deberían proporcionar formación e ideas sobre algunos de los interesantes descubrimientos históricos, arqueológicos, biológicos y astronómicos que se están haciendo actualmente.

Sin embargo, dado que los temas incluidos en este libro siguen siendo objeto de activa investigación, es muy probable que en el momento en que usted lo lea hayan salido a la luz nuevos descubrimientos. Además, varios de los temas aquí considerados —tales como la colonización del Nuevo Mundo y la utilización de datos genéticos para medir el tiempo— son aún muy controvertidos. Por esta razón, he incluido listas de artículos, libros y páginas web al final de cada capítulo. Éstos deberían permitir a los lectores curiosos buscar información y perspectivas adicionales sobre las cuestiones que le interesen.

Hay otra razón por la que animo a cualquier lector interesado a sumergirse en estas referencias: yo no soy ni mucho menos un experto en todos los temas cubiertos aquí. Tengo un conocimiento en temas como historia antigua y cosmoquímica suficientemente bueno para seguir la literatura publicada y apreciar los artículos técnicos, pero mi formación básica es en radioastronomía y cosmología observacional. Aunque tengo grados en física y en antropología, y a pesar de que mi trabajo actual implica el procesamiento de datos de la sonda espacial Cassini en órbita alrededor de Saturno, no tengo una gran experiencia profesional en historia antigua, arqueología, biología evolutiva, ciencia planetaria y astronomía óptica.

14 Orígenes

También soy plenamente consciente de las dificultades que pueden surgir cuando un científico —particularmente un físico— empieza a escribir sobre temas ajenos a su campo. Demasiado a menudo, tales científicos parecen estar bajo la impresión errónea de que su propia formación les da una perspectiva privilegiada sobre un tema que otros han estado estudiando durante décadas. No quiero caer en esa trampa, pues tengo el mayor respeto por aquellos que han hecho su carrera trabajando en estas áreas. Por ello, pasaré con cuidado por los territorios de otros investigadores y señalaré a los lectores interesados aquellas fuentes que les permitirán explorar con más detalle cualquiera de los temas tratados en este libro.

Este libro empieza con sucesos de la historia humana y de allí retrocederemos al pasado hasta llegar al *big bang*. En el camino cubriremos un amplio rango de escalas de tiempo, desde simples siglos hasta miles de millones de años. Para ayudar a dar sentido a todo esto, he ofrecido series de líneas temporales en la Figura 1.1 para que sirvan como perspectiva general de los sucesos que consideraremos.

La línea temporal más a la izquierda en la figura representa los cien últimos años, un período que la mayoría de nosotros podemos comprender e interpretar fácilmente. En la línea temporal están marcados sucesos importantes como las dos guerras mundiales y la llegada a la Luna. La segunda guerra mundial y las misiones Apolo, junto con muchos momentos intermedios o posteriores, están aún en la memoria viva de la gente, pero los tiempos anteriores están pasando lentamente al dominio de la historia.

Cada una de las sucesivas líneas temporales abarca un período de tiempo cincuenta veces mayor que la línea temporal que la precede. Por lo tanto, la segunda línea temporal representa 5.000 años, lo que incluye la mayor parte de la historia humana registrada. El siglo xx ocupa sólo una minúscula fracción de este período. Incluso la firma de la Declaración de Independencia en 1776 y la expedición de Colón en 1492 son acontecimientos relativamente recientes en esta escala de tiempo. Aquí llegamos a los dos primeros temas cubiertos en este libro: la política de la civilización maya clásica de América Central (hace unos 1.500 años); y la construcción de las Grandes Pirámides del Antiguo Egipto (hace 4.500 años). Los registros históri-

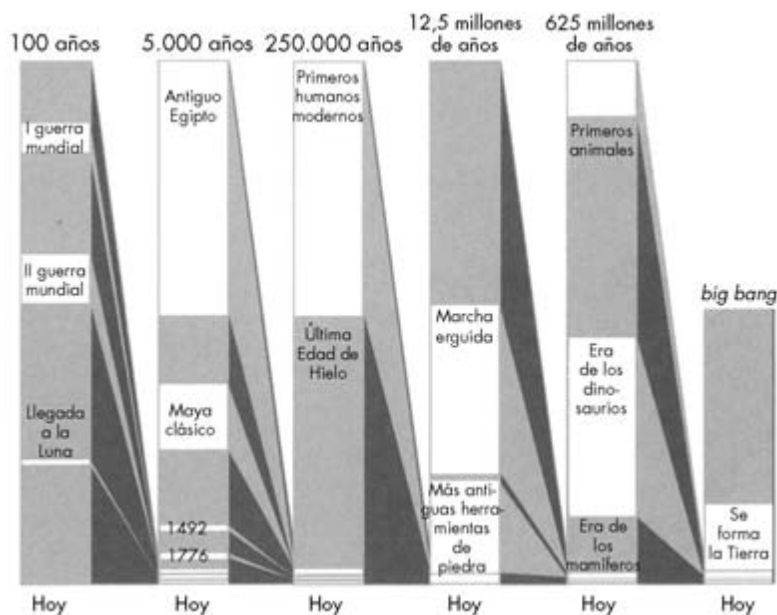


FIGURA 1.1. Las escalas de tiempo del universo.

cos desempeñan un papel crucial en nuestra comprensión de estos dos temas.

Antes del período iniciado hace unos 5.000 años, no obstante, no había registros históricos. Por ello, los científicos deben encontrar otros medios para medir las edades. Esta era prehistórica se cubre en la siguiente línea temporal, que representa 250.000 años. Los seres humanos anatómicamente modernos —criaturas físicamente indistinguibles de las personas que viven hoy— aparecieron por primera vez hace unos 200.000 años, cerca de la parte superior de esta línea temporal. Esta era incluye la última gran Edad de Hielo y la expansión de los seres humanos desde su primer hogar en África al resto del mundo. Para la parte inferior de este período de tiempo, la datación por carbono-14 es un método clave para medir las edades. Una serie de tres capítulos describe esta famosa técnica de datación y cómo se está utilizando para estudiar temas tan diferentes como la física del Sol y la llegada de pueblos al Nuevo Mundo.

Mucho antes de que hiciera su aparición el *Homo sapiens*, había criaturas que reconoceríamos como de tipo humano: caminaban sobre

16 Orígenes

dos piernas, como hacemos nosotros, y algunos incluso fabricaban herramientas de piedra. Los orígenes de estos rasgos están incluidos en la siguiente línea de tiempo, que cubre un período de 12,5 millones de años. Una combinación de evidencia fósil y datos de ADN indica que nuestros ancestros empezaron a caminar erguidos hace unos seis millones de años. Este momento capital en nuestra evolución es tema del capítulo 7.

La siguiente línea de tiempo abarca 625 millones de años, es decir, toda la era de los dinosaurios e incluso el origen de la vida animal multicelular. Durante este largo período aparecieron y se extinguieron muchas especies, y las características de la vida en la Tierra sufrieron muchos cambios. Por ejemplo, alrededor del final de la era de los dinosaurios, un grupo de animales similares a musarañas se convirtieron en el conjunto de criaturas diversas que ahora llamamos mamíferos. Como veremos en el capítulo 8, los análisis del ADN de animales vivos permiten arrojar nueva luz sobre esta extraordinaria transformación.

Nótese que la última línea de tiempo es más corta que las otras. Si la prolongáramos hasta que tuviera la misma longitud que las demás, representaría 31.250 millones de años. Nuestro universo no es tan viejo, de modo que esta barra se ha contraído para que empiece en el *big bang*, que ocurrió hace menos de 15.000 millones de años. Mucho después de este punto en la línea de tiempo podemos ver la formación de la Tierra y del Sistema Solar, que es el tema del capítulo 9. Viajando aún más hacia el pasado, los tres últimos capítulos discutirán la edad de las más viejas estrellas conocidas e incluso el nacimiento del propio universo.

Además de esta representación visual de la historia del universo, he aquí algunas reglas prácticas útiles para seguir estas diferentes escalas de tiempo:

- La historia registrada es más de veinte veces más larga que la historia de Estados Unidos.
- Los seres humanos han existido durante un período de tiempo cincuenta veces mayor que el de la historia registrada.
- Los ancestros de los humanos han estado caminando erguidos

Introducción 17

durante un período de tiempo treinta veces mayor que el de la existencia de los seres humanos.

- Los últimos dinosaurios gigantes son unas diez veces más viejos que los primeros ancestros de los humanos que caminaban erguidos.
- Los primeros animales pluricelulares son unas diez veces más viejos que los últimos dinosaurios gigantes.
- La Tierra y el Sistema Solar son unas diez veces más viejos que los primeros animales pluricelulares.
- El universo es unas diez veces más viejo que la Tierra y el Sistema Solar.

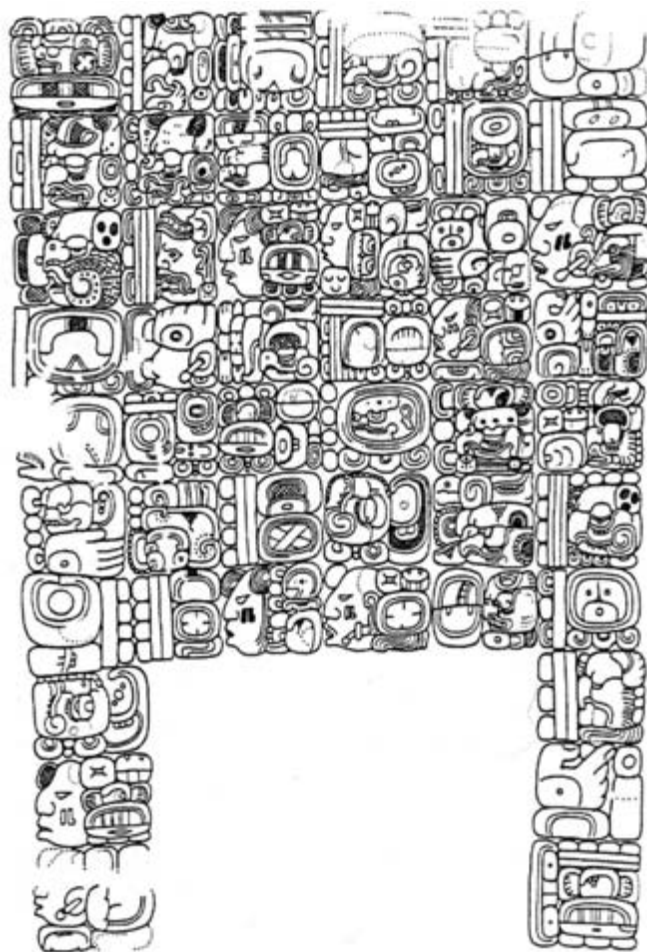


FIGURA 2.1. Un texto maya, de la Estela 3 de Piedras Negras (dibujado por L. Schele © David Schele, cortesía de la Foundation for the Advancement of Mesoamerican Studies Inc., www.famsi.org).

Los calendarios de los mayas clásicos

Empezamos este viaje a través del pasado en las planicies de la península de Yucatán, una región de América Central hoy repartida entre Guatemala, Belice, el oeste de Nicaragua y el sudeste de México. Aquí, desperdigadas a lo largo de la selva tropical, hay centenares de piedras y construcciones en donde hay grabadas diversas combinaciones de partes del cuerpo humano, fragmentos de animales, trozos de plantas y un montón de símbolos más abstractos (véase Figura 2.1). Durante cientos de años estas inscripciones fueron casi desconocidas para el mundo exterior y, en cualquier caso, resultaban prácticamente incomprensibles. Sin embargo, durante el último siglo se hizo claro que estos grabados son de hecho una singular forma de escritura, y durante los treinta últimos años los estudiosos han conseguido descifrar un gran número de signos jeroglíficos en estos textos. Esta investigación ha revelado que la mayoría de estas inscripciones se escribieron hace más de mil años —durante lo que ahora se conoce como el período clásico (250-900 d.C.)— por un pueblo que hablaba una lengua maya. De hecho, estos monumentos fueron probablemente obra de algunos de los ancestros del pueblo maya que todavía vive hoy en la región.

Cada año se descubren nuevos textos que arrojan más luz sobre la religión, la cultura y la política de estos antiguos mayas. En 2001, arqueólogos que trabajaban en las ruinas de una ciudad ahora llamada Dos Pilas encontraron partes de una escalera de piedra cubierta con jeroglíficos. El texto de uno de los escalones dice, en parte:

20 Orígenes

la guerra llegó [a un lugar asociado con Dos Pilas], supervisada por Yuknoom Ch'een, el señor sagrado de Calakmul. B'alah Chan K'awiil, el señor sagrado de Dos Pilas, escapó, bajando a un lugar llamado K'inich Pa'Witz.

El significado de esta inscripción está claro: Dos Pilas fue atacada por otra ciudad, y su rey se vio obligado a huir. Sin embargo, la importancia de este conflicto no es fácil de captar. ¿Quiénes eran Yuknoom Ch'een y B'alah Chan K'awiil? ¿Qué les llevó a luchar entre sí? ¿Cuáles fueron las consecuencias de esta batalla? Esta corta inscripción no puede por sí sola responder a estas preguntas. Hay otros textos que registran las actividades de estos dos reyes y que podrían ayudar a revelar la importancia de esta batalla, pero todavía necesitamos descubrir qué relación guarda este conflicto con los sucesos y las actividades registradas en otros lugares.

Por fortuna, como sucede con muchos textos mayas clásicos, la inscripción anterior está asociada con una serie de signos jeroglíficos que proporcionan una fecha exacta basada en uno de los calendarios más elaborados y sofisticados nunca concebidos. Una fecha tan precisa puede decirnos cómo encaja esta batalla en la vida de Yuknoom Ch'een y B'alah Chan K'awiil, y fechas similares han permitido a los modernos estudiosos de los mayas esbozar las biografías de Yuknoom Ch'een, B'alah Chan K'awiil y docenas de otros reyes y nobles mayas que vivieron y murieron siglos antes de que Colón llegara al Nuevo Mundo.

Sección 2.1: El calendario maya

Las complejidades del calendario maya se ilustran mejor utilizando un ejemplo como el de la fecha mostrada en la Figura 2.2. Como todos los escritos mayas, esta fecha está escrita en una serie de bloques cuadrados compuestos de múltiples jeroglíficos. Dentro de cada bloque, los signos se leen normalmente empezando por la parte superior izquierda y continuando hasta la parte inferior derecha, aunque hay muchas excepciones a esta regla. Los propios bloques se leen en un orden bastante extraño. Los textos están organizados en pares de columnas; el lector empieza en la parte superior izquierda del primer par de columnas, lee

Los calendarios de los mayas clásicos 21

FIGURA 2.2. Un ejemplo de una fecha maya clásica. De la Estela 3 de Piedras Negras (dibujo de Linda Schele).

ambas columnas, luego pasa a la fila de abajo hasta que alcanza la parte inferior del texto y entonces continúa en el siguiente par de columnas.

Como	Ejemplo	En	El mismo
Esta	Frase	Tipo de	Pauta
Está	Escrita	Que	Encontramos
Con	Las palabras	En textos	Mayas

22 Orígenes

Siguiendo este orden de lectura convencional, esta fecha empieza con el bloque en la parte superior izquierda:



FIGURA 2.3.

Aunque el símbolo en el centro de este bloque contiene alguna información del calendario, su función básica es señalar que hay una fecha en los jeroglíficos que siguen.

Los cinco signos que siguen al signo inicial forman algo llamado la Cuenta Larga. Por claridad, podemos poner estos signos en un orden familiar de izquierda a derecha.



FIGURA 2.4.

Cada uno de estos signos consiste en una combinación de barras y puntos de forma ovalada delante de la cabeza de una criatura de aspecto muy extraño. A pesar de los elaborados detalles grabados en las cabezas, son las barras y los puntos los que contienen la mayor parte de la información. Cada combinación de barras y puntos representa un número entre 0 y 19. Cada punto corresponde a un 1, mientras que cada barra corresponde a un 5. En el borde izquierdo del primer glifo hay una columna de cuatro puntos ovalados y una barra vertical; en conjunto esto hace 9. En el segundo glifo hay dos barras y dos puntos separados por un espaciador (sin significado numérico) con la forma de una U tumbada, y por lo tanto tiene un valor 12. El tercer glifo sólo tiene dos puntos (entre dos espaciadores) y por lo tanto corresponde a

Los calendarios de los mayas clásicos 23

nuestro 2. El cuarto glifo no tiene barras ni puntos. En su lugar hay un signo que consiste en un disco rodeado de tres pétalos, un símbolo que se sabe que es equivalente a nuestro cero. El glifo final, con tres barras y un punto entre dos espaciadores, tiene un valor de 16. Los estudiosos de los mayas escriben convencionalmente esta secuencia de números de esta manera: 9.12.2.0.16.

Las cabezas unidas a estos números indican cómo deberían combinarse para expresar una cuenta de días concreta. Sin embargo, esta información es redundante para nuestros propósitos porque el orden de los números también establece el número total de días. A este respecto, la Cuenta Larga tiene algunas notables similitudes con nuestro propio sistema de recuento. Recordemos que nuestro número 482 representa una combinación de 4 centenas, 8 decenas y 2 unidades. La Cuenta Larga utiliza un similar sistema «posicional» para expresar números grandes. Pero hay una diferencia importante entre los números modernos y las Cuentas Largas mayas. En nuestros números cada numeral corresponde a una potencia de 10 diferente: 1, 10, 100, 1.000 y así sucesivamente. Por el contrario, en la Cuenta Larga maya los números corresponden a unidades de 1, 20, 360, 7.200 y 144.000. La lógica de esta secuencia se hace más obvia si se reescribe como una serie de productos: 1, 20, 18×20 , $20 \times 18 \times 20$ y $20 \times 20 \times 18 \times 20$. Así, La Cuenta Larga utiliza principalmente potencias de 20 en lugar de potencias de 10, que es una alternativa perfectamente razonable a nuestro propio sistema. El 18 introducido en el tercer término es claramente la excepción a esta regla, y esto ocurre porque la Cuenta Larga es un número de días, y $360 = 18 \times 20$ es el múltiplo de 20 más cercano a los 365,25 días del año. Utilizando este sistema podemos calcular que la Cuenta Larga 9.12.2.0.16 corresponde al siguiente número de días (nótese que, como sucede en nuestro sistema, el primer número corresponde a la unidad más grande):

$$(9 \times 144.000) + (12 \times 7.200) + (2 \times 360) + (0 \times 20) + 16 = 1.383.136 \text{ días}$$

Esto es casi 3.800 años, de modo que «Cuenta Larga» no es un mal nombre, y nos sugiere que este número indica cuántos días han trans-

24 Orígenes

currido desde algún importante acontecimiento del pasado. Por fortuna, los elementos de este sistema aún eran utilizados cuando los españoles entraron en contacto con los mayas, y documentos de este período mucho más tardío permiten a los estudiosos coordinar la cuenta maya de los días con nuestro calendario. Estos análisis sugieren que la fecha 0.0.0.0.1 de la Cuenta Larga corresponde a algún momento en agosto del año 3114 a.C. Esto es milenios antes que cualquier texto conocido, de modo que cualquier interpretación histórica de esta fecha es sospechosa. Sin embargo, tales tiempos pasados son mencionados en numerosas ocasiones en textos mitológicos, de modo que esta fecha tenía un profundo significado religioso para los mayas. En un nivel más práctico, y dado que las Cuentas Largas siempre utilizan esta misma fecha antigua como punto de referencia, ellas especifican exactamente cuándo ocurrió cualquier suceso. Por ejemplo, los cinco números dados antes se refieren al 7 de julio de 674 d.C.

En principio, la Cuenta Larga ofrece toda la información que necesitarían, bien los mayas o bien los estudiosos modernos de los mayas, para determinar exactamente cuándo ocurrió un suceso. Sin embargo, la Cuenta Larga es sólo una parte de una fecha maya completa. La fecha de la Figura 2.2, por ejemplo, contiene ocho bloques además de la Cuenta Larga. La mayoría de los jeroglíficos ofrecen información sobre la fase de la Luna y el estatus del mes lunar, elementos del calendario maya que no se discutirán aquí en detalle. En su lugar, nos centraremos en el signo que sigue inmediatamente a la Cuenta Larga y en el último signo en la fecha:



FIGURA 2.5.

Por separado, estos signos se conocen como el *Tzolkin* y el *Haab*, respectivamente. Juntos se llaman la Rueda Calendárica y se utilizan con frecuencia como abreviatura de una fecha completa.

El Tzolk'in tiene dos partes: un número y un signo de día. Como en la Cuenta Larga, el número se representa por barras y puntos, pero este número sólo puede tener un valor de 1 a 13. En este caso es 5. Hay veinte signos de días posibles en el Tzolk'in, cada uno de los cuales está representado por una figura única grabada en el óvalo (véase Figura 2.6). En este ejemplo tenemos el signo conocido como Kib. Por consiguiente, esta fecha Tzolk'in es 5 Kib. Tanto el número como el signo de día de los Tzolk'in cambian de un día a otro. Con cada nuevo día el número aumenta en uno hasta que llega a 13, momento en que el ciclo vuelve a uno. Al mismo tiempo, el signo de día cambia siguiendo una secuencia concreta de sus veinte valores posibles. Así, la siguiente fecha Tzolk'in después de 5 Kib es 6 Kaban, seguida por 7 Etz'nab, 8 Kawak, 9 Ahaw, 10 Imix, 11 Ik' y así sucesivamente. Nótese que 13 y 20 no tienen factores comunes, de modo que la próxima vez

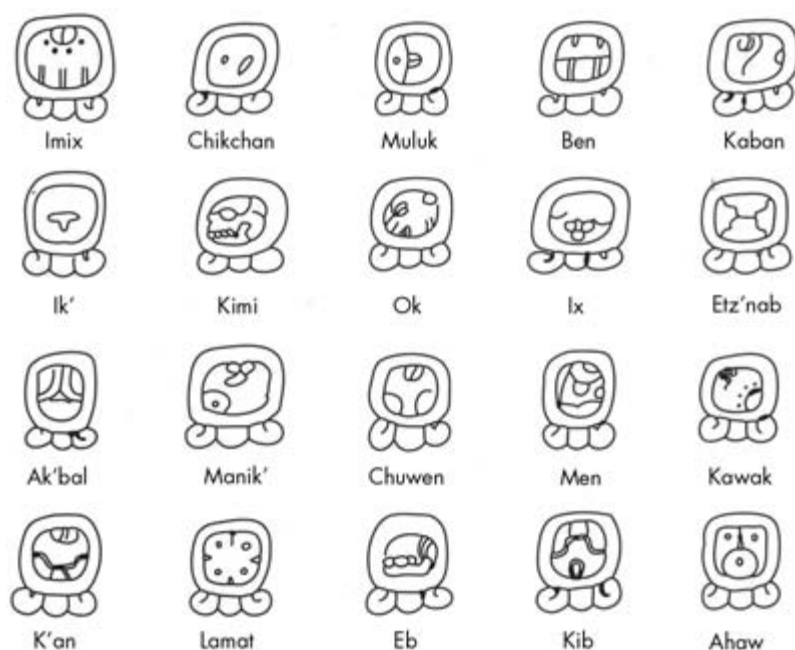


FIGURA 2.6. Los veinte signos de día posibles que pueden aparecer en el Tzolk'in. (El orden en esta figura es vertical; p. ej., Ik' sigue a Imix, Chikchan sigue a K'an, y así sucesivamente.)

26 Orígenes



FIGURA 2.7. Los signos de mes del Haab. (El orden en esta figura es vertical; p. ej., Wo sigue a Pohp, Sek sigue a Sotz', y así sucesivamente.)

que el número sea 5, el signo de día no será Kib sino Muluk. La misma combinación de número y signo de día ocurre sólo cada 260 días.

El Haab, por otra parte, es un ciclo de 365 días formado por dieciocho «meses» de veinte días cada uno (numerados de 0 a 19) más un mes «corto» de cinco días (Figura 2.7). Aquí, el número indica el día del mes, y el signo unido a él es el nombre del mes. En este ejemplo tenemos el número 14 unido al signo para el mes Yaxk'in. El día siguiente sería entonces 15 Yaxk'in, luego 16 Yaxk'in, y así sucesivamente hasta llegar a 19 Yaxk'in, después del cual tenemos el día 0 Mol.

Tanto los Tzolk'in como los Haab avanzan cada día, de modo que todos los componentes de la Rueda Calendárica están cambiando constantemente. Una manera popular de visualizar cómo funciona esta fecha utiliza engranajes, como se muestra en la Figura 2.8. Cada

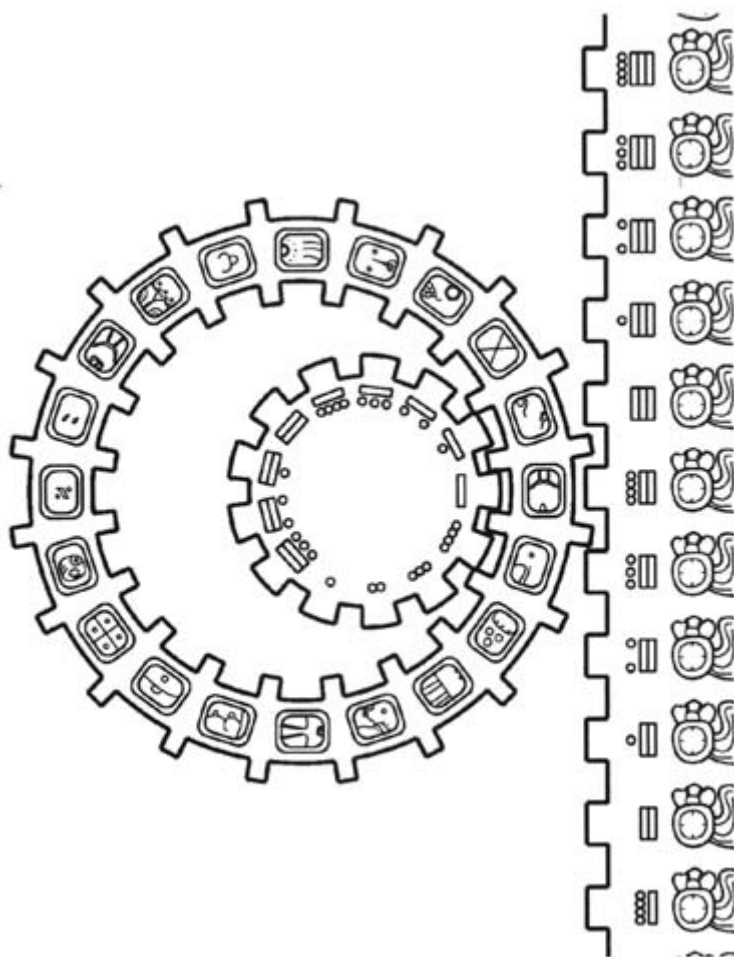


FIGURA 2.8. La mecánica de la Rueda Calendárica maya ilustrada mediante el uso de engranajes, uno para el número y signo de día del Tzolk'in y otro para el Haab. El día actual corresponde al lugar donde los engranajes están alineados. Cada nuevo día los engranajes avanzan juntos una posición.

día se corre un diente de las ruedas del engranaje para generar la fecha de la Rueda Calendárica para ese día.

Tanto el Tzolk'in como el Haab son ciclos bastante cortos y sólo especifican en qué momento sucedió algo dentro de un intervalo de un año. Sin embargo, puesto que el Tzolk'in es un ciclo de 260 días, y el

28 Orígenes

Haab es un ciclo de 365 días, la misma combinación de Tzolk'in y Haab se da sólo una vez cada 18.980 días ($260 \times 365 = 94.900$, dividido por el factor común 5), que es aproximadamente 52 años.

Esto significa que si conocemos la Rueda Calendárica para un suceso, conocemos exactamente en qué día sucedió dentro de un ciclo dado de 52 años, de modo que es posible extraer la fecha exacta de un suceso de la Rueda Calendárica con sólo una Cuenta Larga parcial o una referencia a un rey que viviera durante un ciclo concreto. Recíprocamente, la fecha de la Rueda Calendárica puede reconstruirse sólo con conocer la Cuenta Larga. Por consiguiente, incluso si la inscripción está parcialmente erosionada, las partes restantes de la Cuenta Larga y la Rueda Calendárica suelen contener suficiente información cronológica para determinar cuándo ocurrieron los sucesos registrados.

Sección 2.2: El calendario maya y la naturaleza de los textos mayas

El elaborado calendario maya ha sido una herramienta poderosa para los modernos estudiosos de los mayas porque casi todo suceso singular que registraron los mayas en sus monumentos de piedra está datado o bien con una Rueda Calendárica o bien con una Cuenta Larga. Por lo tanto, podemos calcular casi los días exactos en que ocurrieron todos y cada uno de los sucesos registrados. Esta información cronológica se ha mostrado de valor incalculable en muchos trabajos para entender la vida y la historia de los mayas clásicos. De hecho, estas fechas fueron fundamentales para establecer la verdadera naturaleza y el contenido de las inscripciones mayas clásicas. En los años sesenta del siglo pasado, Tatiana Proskouriakoff estudió los textos de la ciudad de Piedras Negras y encontró seis grupos diferentes de textos, asociado cada uno de ellos con un lugar concreto en el emplazamiento. Cada uno de estos grupos contenía fechas que abarcaban varias décadas, y los dos primeros sucesos registrados en un grupo dado estaban casi siempre indicados por los siguientes signos:

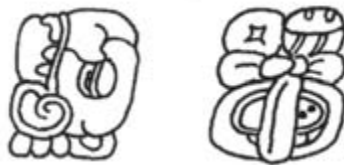
Los calendarios de los mayas clásicos 29

FIGURA 2.9.

El primer signo se denomina a veces la «rana tumbada» (ponga la página horizontal para ver la cabeza de la rana), mientras que el segundo signo se conoce como el glifo «dolor de muelas» porque el elemento anudado parece una especie de diente vendado. En los grupos estudiados por Proskouriakoff, el suceso «rana tumbada» ocurría siempre unas pocas décadas antes que el suceso «dolor de muelas». Todos los demás sucesos registrados en un grupo dado ocurrían después del suceso «dolor de muelas», y el último suceso del grupo siempre ocurría antes de que el siguiente suceso «dolor de muelas» esté registrado en uno de los otros grupos.

Proskouriakoff estudió estas sospechosas relaciones temporales y argumentó que las pautas que encontraba podían explicarse si los sucesos de cada grupo, que cubren un período de tiempo comparable a una vida humana, se refieren a sucesos en la vida de un gobernante concreto de Piedras Negras. Esto significa que la «rana tumbada», como primer suceso en cada secuencia dada, marca el nacimiento del gobernante, y el suceso «dolor de muelas» indica la coronación del gobernante cuando estaba en su tercera o cuarta década de vida. El período de tiempo cubierto por los otros sucesos corresponde entonces al gobierno del rey.

Estudios adicionales de los últimos sucesos asociados con varios gobernantes dieron otro par de signos:



FIGURA 2.10.

30 Orígenes

Cuando estos dos símbolos están presentes, el suceso indicado por el cráneo está siempre anotado como si hubiera tenido lugar días o semanas antes que el otro suceso. Puesto que estos sucesos ocurrían próximos a la coronación del siguiente gobernante, es casi seguro que marcan la muerte del gobernante actual y su entierro, respectivamente. El uso de un cráneo para marcar el primer suceso es consistente con tal interpretación.

El análisis de Proskouriakoff demostraba claramente que los textos mayas contenían información histórica. Esta idea espoleó un renovado interés en los textos mayas como documentos históricos. Además, al adscribir significados específicos a ciertos jeroglíficos, este trabajo servía a los intentos de traducir las inscripciones mayas. Por lo tanto, el calendario maya ha desempeñado desde el primer momento un papel central en los estudios históricos sobre los mayas.

Sección 2.3: La vida y la época de Yuknoom Ch'een

De la misma forma que el calendario maya ayudó en los años sesenta del siglo pasado a esclarecer la naturaleza de las inscripciones mayas, hoy se está utilizando para desvelar la compleja vida política de la élite maya clásica. Al parecer, los mayas del período clásico no estuvieron nunca unidos bajo una única entidad política, sino que más bien vivían en varias ciudades más o menos independientes, algunas de las cuales se muestran en la Figura 2.11. Estas ciudades y sus gobernantes interaccionaban a través de una compleja red de rituales, diplomacia, matrimonio y guerras. Si esta desconcertante maraña de sucesos puede ordenarse es sólo porque hay una fecha registrada para casi todas las batallas y rituales. Por lo tanto, estos sucesos pueden disponerse en orden cronológico, lo que permite a los estudiosos de los mayas evaluar y explorar sus causas y consecuencias con gran detalle.

Un maya influyente, cuya historia ha empezado recientemente a emerger de los textos, es Yuknoom Ch'een, uno de los reyes mencionados en la inscripción referida al principio de este capítulo. Este señor (cuyo retrato y nombre se muestran en la Figura 2.12) gobernaba una ciudad ahora conocida como Calakmul —los mayas clásicos la



FIGURA 2.11. La región de la América Central ocupada por los mayas clásicos, con algunas de las ciudades más importantes indicadas por sus nombres modernos.

denominaban Chan, o «Serpiente»— pero tuvo impacto sobre ciudades en toda la región maya, y sus actividades están registradas en textos dispersos por toda Yucatán. Al mismo tiempo, la selva tropical ha dañado considerablemente muchos monumentos de Calakmul, de modo que la mayoría de los textos que encargó el propio Yuknoom Ch'een para hacer la crónica de su vida están demasiado erosionados para poderse leer. Los pocos textos que sobreviven en y alrededor de la ciudad de Calakmul sólo nos dicen que Yuknoom Ch'een nació el 600 a.C.; que se convirtió en gobernante de Calakmul cuando tenía treinta y seis años, y que probablemente murió alrededor de 686. Los registros de otras ciudades mayas proporcionan la mayor parte de la información disponible acerca de las actividades de Yuknoom Ch'een, y las fechas asociadas con estos sucesos son especialmente importantes para componer una historia coherente de su vida.

La Figura 2.13 y el apéndice a este capítulo resumen los sucesos conocidos de la larga vida de Yuknoom Ch'een. Yuknoom Ch'een na-

32 Orígenes

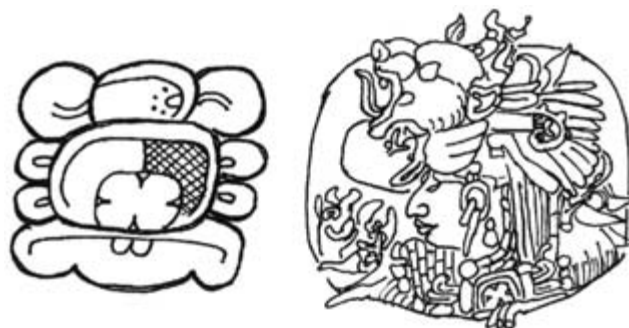


FIGURA 2.12. Nombre (izquierda) y retrato (derecha) de Yuknoom Ch'een. Dibujo de Simon Martin y Nikolai Grube, *Chronicle of the Maya Kings and Queens* (Thames and Hudson, 2000), 108.

ció durante el gobierno de otro importante rey de Calakmul, a quien hoy se le llama la Serpiente Enrollada porque su nombre real todavía no ha sido traducido. Cuando Yuknoom Ch'een tenía once años, la Serpiente Enrollada lanzó un memorable ataque sobre Palenque, situada casi 300 kilómetros al oeste. Saquear una ciudad tan alejada era una hazaña impresionante. De hecho, ésta era la segunda vez que Calakmul golpeaba a Palenque, pues un ataque previo había tenido lugar en el 599. Esta segunda campaña tuvo un gran impacto sobre Palenque y era recordada en inscripciones grabadas más de setenta años después. Con toda probabilidad, este suceso fue también celebrado en Calakmul como ejemplo del gran poder que ejercían la ciudad y su rey.

Serpiente Enrollada murió a los pocos años, aproximadamente veinte años antes de que Yuknoom Ch'een ascendiera al trono. Los sucesos ocurridos durante este período intermedio fueron documentados en un lugar llamado Caracol, situado a unos 200 kilómetros al sudeste de Calakmul. Tres señores de Calakmul son mencionados en los registros de Caracol durante este período: Yuknoom Chan, Tajoom Uk'ab K'ak' y Yuknoom Head. Cada uno de estos reyes gobernó durante menos de diez años. Aunque una serie semejante de reinados cortos no es especialmente inusual, Yuknoom Head también estuvo implicado en algún tipo de conflicto sólo dos meses antes de que concluyera su reinado y Yuknoom Ch'een asumiera el trono. Esta coinci-

Los calendarios de los mayas clásicos 33

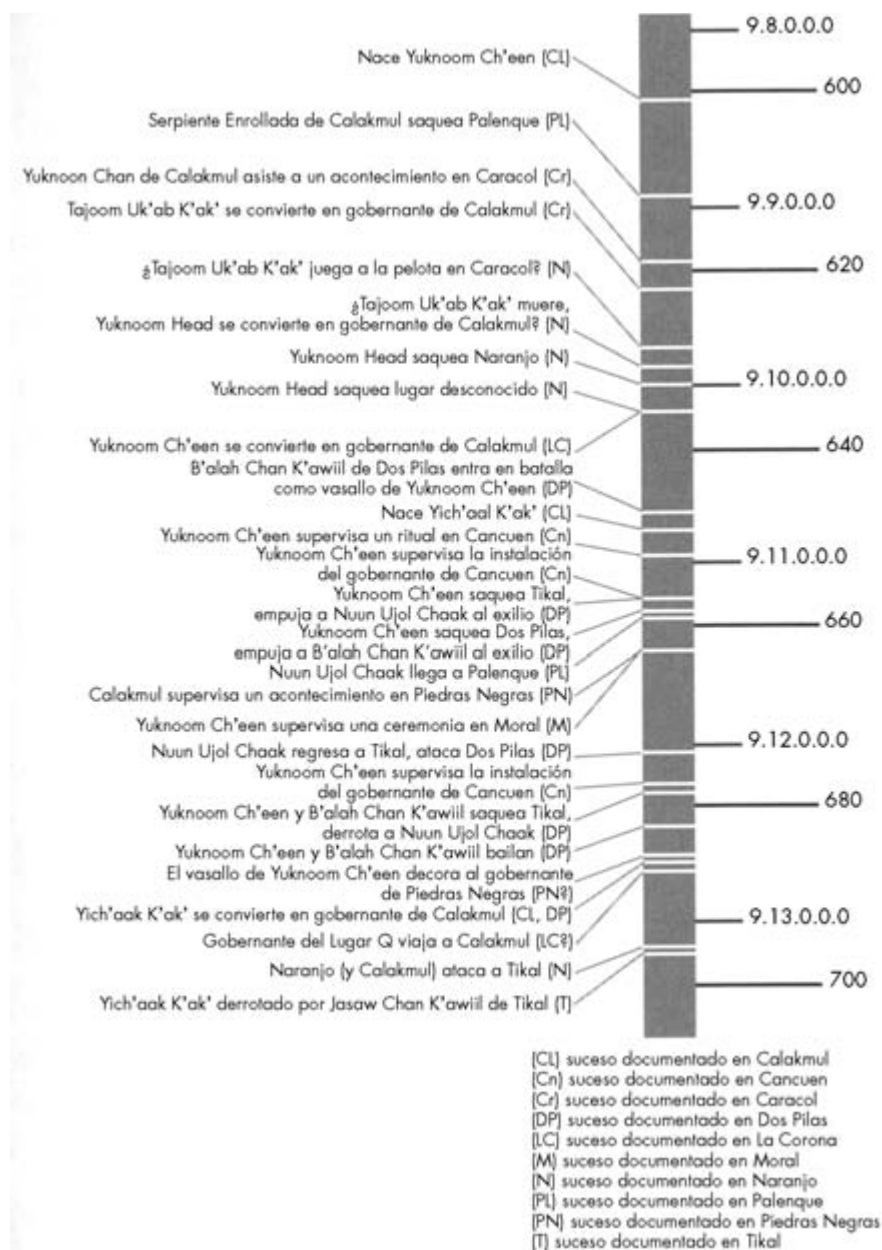


FIGURA 2.13. Un resumen de los sucesos importantes en la vida de Yuknoom Ch'een.

34 Orígenes

dencia, junto con el hecho de que Yuknoom Ch'een tenía más de treinta y cinco años cuando se convirtió en rey, sugiere que hubo algunas turbulencias en la casa real de Calakmul en esta época.

Si Calakmul estaba teniendo problemas cuando Yuknoom Ch'een empezó su reinado, parece que habían quedado resueltos para el final de su primera década en el trono. Unos diez años después de que se convirtiera en gobernante, Yuknoom Ch'een es mencionado en ciudades muy al sur de Calakmul como Cancuen y Dos Pilas. Las actividades de Yuknoom Ch'een en esta región demuestran no sólo que Calakmul aún podía seguir operando en ciudades lejanas sino que también podía influir en la política del sur sin mucha interferencia de su mayor rival, Tikal.

Tikal —conocida como Mutul para los mayas del período clásico— era una ciudad cuyo poder sobre otros lugares mayas rivalizaba a menudo con el de Calakmul. De hecho, buena parte de la política maya giraba alrededor de las fortunas cambiantes de estos dos centros. Al parecer, durante el reinado de Yuknoom Ch'een la casa gobernante de Tikal había caído en dificultades, pues dos personas afirmaban ser «el gobernante de Tikal»: Nuun Ujol Chaak, que gobernaba el propio Tikal, y B'alah Chan K'awiil, que fundó una «nueva Tikal» en el lugar ahora llamado Dos Pilas. Yuknoom Ch'een habría sacado ventaja de este cisma entre los dos señores, utilizándolo como una oportunidad para extender la influencia de Calakmul hacia el sur. De hecho, Yuknoom Ch'enn (o quizá sus representantes) pudo viajar varias veces durante un período de veinticinco años a la ciudad sureña de Cancuen para supervisar rituales y para la coronación de gobernantes. En cada uno de estos viajes Yuknoom Ch'een pudo atravesar el territorio de Tikal sin que haya quedado registrada ninguna dificultad.

Yuknoom Ch'een no se limitó a observar la pelea entre los señores de Tikal sino que se comprometió activamente y exacerbó el conflicto. Hasta época reciente, los textos disponibles indicaban que Yuknoom Ch'een forjó rápidamente una alianza duradera con B'alah Chan K'awiil frente a Nuun Ujol Chaak. Durante el duodécimo año de Yuknoom Ch'een en el trono, B'alah Chan K'awiil —que era descrito como un vasallo del rey de Calakmul— estuvo implicado en algún tipo de conflicto con un oscuro personaje de Tikal. Según textos pos-

teriores, Yuknoom Ch'een y B'alah Chan K'awiil colaboraron varias veces en contra de Nuun Ujol Chaak, el «verdadero» señor de Tikal.

Esta imagen de una alianza natural y estable entre los reyes de Calakmul y Dos Pilas quedó hecha añicos por el descubrimiento de la inscripción citada al principio de este capítulo, que dice que Yuknoom Ch'een atacó Dos Pilas y empujó a B'alah Chan K'awiil al exilio. Esto sucedió en el vigésimo segundo año del gobierno de Yuknoom Ch'een, sólo dos años después de una campaña en la que saqueó Tikal y empujó a Nuun Ujol Chaak al exilio. Parece que durante este período Calakmul era hostil a los dos señores de Tikal. Los expertos aún no saben muy bien qué hacer con esta nueva información. Quizá B'alah Chan K'awiil y Yuknoom Ch'een habían roto, o quizá la conexión anterior de B'alah Chan K'awiil con Calakmul era sólo una ficción introducida retroactivamente en los textos. Sólo podemos confiar en que nuevos textos e investigación futura lleguen a aclarar la relación entre Calakmul y Dos Pilas durante estos primeros años.

Aunque los vasallajes previos de los señores de Tikal son inciertos, tras su derrota a manos de Yuknoom Ch'een la situación política se hizo más clara. En algún momento después de que fueran expulsados de sus respectivas ciudades, B'alah Chan K'awiil y Nuun Ujol Chaak aparecen implicados en un ritual con el sucesor de Yuknoom Ch'een. Aunque, por desgracia, el texto relevante está tan erosionado que la naturaleza exacta del suceso es insegura, probablemente se refería a los dos señores de Tikal jurando lealtad a Calakmul. Apparentemente B'alah Chan K'awiil aceptó la situación, y desde entonces fue un aliado de Calakmul. Parece, sin embargo, que Nuun Ujol Chaak pensaba de forma diferente.

Unos dos años después de ser expulsado de su ciudad, Nuun Ujol Chaak llegó a Palenque, la ciudad que Serpiente Enrollada había saqueado casi cincuenta años antes. Casi al mismo tiempo, ciudades de la misma región, tales como Moral y Piedras Negras, registran que Yuknoom Ch'een y sus representantes estaban presentes para supervisar varios rituales. Ésta es una coincidencia bastante sospechosa, y es fácil imaginar que la rivalidad entre estos dos reyes estaba guiando sus intereses en esta región. Nuun Ujol Chaak podía haber estado recabando apoyo para su causa en Palenque, una ciudad que también ha-

36 Orígenes

bía sufrido en manos de Calakmul, y también estaba suficientemente alejada para servir como una base de operaciones bastante segura. Yuknoom Ch'een, por otra parte, puede haber estado forjando alianzas con Moral y Piedras Negras para aislar a Palenque de otros grupos simpatizantes con Tikal.

Las maniobras geopolíticas, si eso es lo que eran, dieron paso finalmente a un conflicto abierto cuando, quince años después de que empezara su exilio, Nuun Ujol Chaak regresó finalmente a la región de Tikal y consiguió expulsar a B'alah Chan K'awiil de Dos Pasos. Sin embargo, la victoria de Nuun Ujol Chaak no duró mucho, puesto que cinco años más tarde B'alah Chan K'awiil y Yuknoom Ch'een unidos expulsaron a Nuun Ujol Chaak de Tikal; un poco más tarde, B'alah Chan K'awiil le derrotó y probablemente le mató. Para entonces Yuknoom Ch'een tendría más de setenta y siete años y seguramente no tomó parte directa en ninguna batalla.

La vejez de Yuknoom Ch'een no parece haber comprometido la amplia influencia de Calakmul. Él y sus representantes siguieron participando en varias ceremonias en ciudades alejadas como Dos Pilas y Piedras Negras incluso cuando él llevaba casi cincuenta años en el trono. Este gran rey de Calakmul murió probablemente el año 686 ya octogenario, pues es entonces cuando su sucesor subió al poder. Al nuevo gobernante de Calakmul, un hombre llamado Yich'aak K'ak', no le fue tan bien frente a las fuerzas de Tikal y su enérgico nuevo señor, Jasaw Chan K'awiil, pero estos sucesos pertenecen a otro capítulo en la historia de los mayas.

Tras este repaso de los sucesos en la vida de Yuknoom Ch'een podemos empezar a apreciar cuán importantes pueden ser las fechas exactas para reconstruir la historia de los mayas clásicos. No conoceríamos la llegada de Yuknoom Ch'een al trono de Calakmul, la compleja naturaleza de su relación con Dos Pilas, o los posibles motivos tras sus posteriores actividades políticas en el oeste si no tuviéramos esta precisa información cronológica codificada en los textos mayas. Por consiguiente, el calendario maya mejora enormemente nuestra comprensión de la vida de Yuknoom Ch'een. De hecho, enriquece toda la historia de los mayas clásicos. Como veremos en el capítulo siguiente, muchos pueblos no fueron tan meticulosos como los mayas

Los calendarios de los mayas clásicos 37

en registrar las fechas de los sucesos. Por ello, habitualmente los historiadores tienen que trabajar de forma mucho más ardua para ordenar y organizar los sucesos en el tiempo, utilizando una variedad de indicadores de edad más indirectos, y a veces sorprendentes.

Sección 2.4: Lecturas adicionales

Dos de las más útiles páginas web que tratan de los mayas clásicos y de Mesoamérica son www.famsi.org y www.mesoweb.com. La primera contiene un informe de Frederico Ashen (www.famsi.org/reports/01098/index.html) que describe el descubrimiento del texto traducido al principio de este capítulo.

El calendario maya es tratado en la mayoría de los libros sobre la escritura maya, tales como: Michael D. Coe y John D. Stone, *Reading the Maya Glyphs* (Thames and Hudson, 2001); John F. Harris y Stephen K. Stearns, *Understanding Mayan Inscriptions*, 2.^a ed. (University of Pennsylvania Museum Press, 1997), y John Montgomery, *How to Read Mayan Hieroglyphs* (Hippocrene Books, 2002).

Para una historia del desciframiento maya, que incluye el trabajo de Proskouriakoff, véase Michael D. Coe, *Breaking the Maya Code* (Thames and Hudson, 1992).

Una revisión muy completa y razonablemente actualizada de la historia maya es Simon Martin y Nikolai Grube, *Chronicle of the Maya Kings and Queens* (Thames and Hudson, 2000).

38 *Orígenes*

Apéndice: Fuentes para la vida y la época de Yuknoom Ch'een

Para el lector curioso, los textos que ofrecen información sobre la vida de Yuknoom Ch'een son los siguientes:

<i>Cuenta Larga</i>	<i>Rueda Calendárica</i>	<i>Fecha Gregoriana</i>	<i>Suceso</i>	<i>Fuente</i>
9.8.7.2.17	8 Kaban 5 Yax	11 sep. 600	Nace Yuknoom Ch'een	Calakmul Estela 33
9.8.17.15.14	4 Ix 7 Wo	4 abril 611	Serpiente Enrollada saquea Palenque	Palenque Templo de las Inscripciones
9.9.5.13.8	4 Lamat 6 Pax	6 enero 619	Yuknoom Chan de Calakmul supervisa un acontecimiento en Caracol	Caracol Estela 3
9.9.9.0.5	11 Chikchan 3 Wo	28 mar. 622	Tajoom Uk'ab K'ak' se convierte en gobernante de Calakmul	Caracol Estela 22
9.9.15.3.10	13 Ok 18 Sip	30 abril 628	Tajoom Uk'ab K'ak' ejecuta un ritual (¿en Caracol?)	Naranjo Escalinata
9.9.17.11.14	13 Ix 12 Sak	1 oct. 630	Tajoom Uk'ab K'ak' muere	Naranjo Escalinata
9.9.19.16.3	7 Ak'bal 16 Muwan	24 dic. 631	Yuknoom jefe de Calakmul ataca y derrota a Naranjo	Naranjo Escalinata
9.10.3.2.12	2 Eb 0 Pohp	4 mar. 636	Yuknoom jefe ataca y derrota un emplazamiento desconocido	Naranjo Escalinata
9.10.3.5.10	8 Ok 18 Sip	28 abril 636	Yuknoom Ch'een se convierte en gobernante de Calakmul	La Corona Altar

Los calendarios de los mayas clásicos 39

<i>Cuenta Larga</i>	<i>Rueda Calendárica</i>	<i>Fecha Gregoriana</i>	<i>Suceso</i>	<i>Fuente</i>
9.10.15.4.9	4 Muluk 2 Kumk'u	4 feb. 648	B'alah Chan K'awiil de Dos Pilas actúa como vasallo de Yuknoom Ch'een	Dos Pilas Escalinata 4
9.10.19.5.14	3 Ix 7 Kumk'u	8 feb. 652	Yuknoom Ch'een supervisa un acontecimiento en Cancuen	Cancuen Panel
9.11.4.4.0	11 Ahaw 8 Muwan	9 dic. 656	Yuknoom Ch'een supervisa la instalación del gobernante de Cancuen	Cancuen Panel
9.11.4.5.14	6 Ix 2 K'ayab	12 enero 657	Yuknoom Ch'een ataca Tikal y empuja a su gobernante Nuun Ujol Chaak al exilio	Dos Pilas
9.11.6.4.19	9 Kawak 17 Muwan	18 dic. 658	Yuknoom Ch'een ataca Dos Pilas y empuja a su gobernante B'alah Chan K'awiil al exilio	Dos Pilas Escalinata 2
9.11.6.16.17	13 Kaban 10 Chen	16 ago. 659	Nuun Ujol Chaak llega a Palenque Calakmul supervisa un suceso en Piedras Negras	Palenque Templo de las Inscripciones Piedras Negras
9.11.9.8.6	12 Kimi 9 Kumk'u	7 feb. 662		Estela 35
9.11.9.11.3	4 Ak'bal 1 Sip	5 abril 662	Yuknoom Ch'een supervisa la instalación del gobernante de Moral	Moral Estela 4
9.12.0.8.3	4 Ak'bal 11 Muwan	8 dic. 672	Nuun Ujol Chaak regresa y ataca a Dos Pilas	Dos Pilas Escalinata 2

40 Orígenes

<i>Cuenta Larga</i>	<i>Rueda Calendárica</i>	<i>Fecha Gregoriana</i>	<i>Suceso</i>	<i>Fuente</i>
9.12.4.11.1	7 Imix 9 K'ayab	14 enero 677	Yuknoom Ch'een supervisa la instalación del gobernante de Cancuen	Cancuen Panel
9.12.5.10.1	9 Imix 4 Pax	20 dic. 677	Yuknoom Ch'een y B'alah Chan K'awiil atacan a Nuun Ujol Chaak	Dos Pilas Escalinata 4
9.12.12.11.2	2 Ik' 10 Muwan	4 dic. 684	Yuknoom Ch'een y B'alah Chan K'awiil realizan una ceremonia conjunta	Dos Pilas Escalinata 2
9.12.13.4.3	2 Ak'bal 6 Mol	13 julio 685	Un representante de Yuknoom Ch'een condecora al gobernante de Piedras Negras	Piedras Negras Panel
9.12.13.17.7	6 Manik 5 Sip	3 abril 686	Yich'aak K'ak' se convierte en gobernante de Calakmul	Calakmul Estela 9

Y aquí es donde pueden encontrarse dichos textos:

Calakmul: Los dibujos lineales de las Estelas 9 y 33 no son fácilmente accesibles, pero hay fotografías de las estelas publicadas por Kart Ruppert y John H. Denison, Jr. en *Archaeological Reconnaissance in Campeche, Quintana Roo, and Peten* (Carnegie Institute of Washington, publicación 543, 1943).

Cancuen: «Panel Saqueado». Dibujos lineales se presentan en www.mesoweb.com/features/cancuen/index.html, «A Reading of the Cancuen Looted Panel» de Stanley Guenter.

Caracol: La Estela 3 está publicada en Carl P. Beetz y Linton Satterwaite, *The Monuments and Inscriptions of Caracol, Belize* (University Museum Publications, 1982). La Estela 22 está publicada

Los calendarios de los mayas clásicos 41

en PARI Monograph 7 (Studies in the Archaeology of Caracol, Belize, 1994), en «Epigraphic Research at Caracol, Belize» de Nikolai Grube.

Dos Pilas: La Escalinata Jeroglífica 4 está publicada en Stephen D. Houston, *Hieroglyphs and History of Dos Pilas* (University of Texas Press, 1993); la Escalinata Jeroglífica 2 está disponible en www.famsi.org/reports/01098/index.html. Traducciones de los dos textos están disponibles en www.mesoweb.com/features/boot/DPLHS2.html, y www.mesoweb.com/features/boot/DPLHS4.html en artículos de Erik Boot.

La Corona: Los dibujos lineales del altar no son fácilmente accesibles por lo que yo conozco (véase también Martin y Grube, *Chronicle of the Maya Kings and Queens*).

Moral: Estela 4, publicada en Simon Martin, «Moral: Reforma y la Contienda por el oriente de Tabasco» en *Arqueología Mexicana* 9, n.º 61 (2003): 44-47.

Naranjo: Escalinata Jeroglífica, publicada en Ian Graham, *Corpus of Mayan Hieroglyphic Inscriptions*, vol I (Peabody Museum, 1975).

Palenque: Un dibujo lineal del Templo de las Inscripciones se encuentra en Linda Schele y Meter Matthews, *The Code of Kings* (Scribner, 1998).

Piedras Negras: Estela 35 publicada en Nikolai Grube, «Palenque in the Maya World» para la Octava Mesa Redonda de Palenque, disponible en www.mesoweb.com/pari/publications/RT10/001grube/text.html.

Precesión, Polaris y la edad de las pirámides

Miles de años antes de que los mayas grabaran inscripciones ornamentales en los muros de sus edificios, los egipcios levantaron algunos de los más famosos e impresionantes monumentos del mundo antiguo: las Grandes Pirámides. Construidas con millones de bloques de piedra, algunos de ellos de más de cincuenta toneladas de peso, estas enormes tumbas son proezas de ingeniería antigua. Los estudiosos han estado investigando las pirámides de Egipto durante más de cien años, y esta investigación ha dado mucha información tanto sobre las propias estructuras como sobre las personas responsables de ellas. Sin embargo, las pirámides no han cedido todavía todos sus secretos y, a pesar de toda esta investigación, aún no conocemos exactamente cuándo fueron construidas estas enormes estructuras.

A diferencia de las inscripciones mayas clásicas, que incluyen una cantidad excepcional de información sobre el calendario, los textos jeroglíficos egipcios sólo documentan habitualmente el número de años que el entonces faraón ha estado en el trono. Por ejemplo, inscripciones que registran la construcción de una cierta pirámide mencionan simplemente un «año de la décima quinta ocasión» de un faraón llamado Sneferu, lo que remite a una serie de sucesos que ocurrían cada uno o dos años durante el reinado de cada faraón. Por lo tanto, esta fecha sólo nos dice que la obra se hizo cierto número de años después de que Sneferu se convirtiera en gobernante de Egipto, una información

Precesión, Polaris y la edad de las pirámides 43

que apenas es suficiente para establecer cuánto tiempo hace que la pirámide fue construida.

En ausencia de registros históricos explícitos, los egiptólogos que tratan de determinar la edad de las pirámides deben basarse en una combinación de datos históricos, arqueológicos e incluso astronómicos. Actualmente, este tipo de información indica que la mayor de las Grandes Pirámides fue construida hace entre 4.400 y 4.600 años. Este tipo de estimación de la edad es suficiente para dar una idea de la extrema antigüedad de las pirámides, pero también debemos recordar que doscientos años es un período de tiempo muy largo comparado con una vida humana. Hoy día las pirámides serían igualmente impresionantes ya hubieran sido construidas hace 4.400 o hace 4.600 años; pero para un egipcio que viviera mientras las pirámides se estaban construyendo, la visión de estas estructuras sería muy diferente de la de alguien que hubiera nacido doscientos años después de que fueran acabadas. Por lo tanto, una fecha más precisa para las pirámides nos permitiría entender mejor el impacto que estos tremendos proyectos de construcción tuvieron en la historia y el pueblo de Egipto. Recientemente se ha propuesto un nuevo método de combinar datos astronómicos y arqueológicos que quizá permita fijar la edad de todas las Grandes Pirámides con un margen de error de unos pocos años.

Sección 3.1: Las pirámides y la historia del Antiguo Egipto

El primer paso para descubrir la edad de las pirámides consiste en determinar quiénes las construyeron. Cada pirámide fue erigida para conmemorar el entierro de un faraón concreto, y afortunadamente los constructores dejaron inscripciones que dan testimonio de la propiedad de muchos de estos monumentos. Las tres grandes pirámides de Giza, por ejemplo, fueron construidas para gobernantes llamados Keops, Kefrén y Micerino. Otras pirámides fueron construidas para faraones llamados Sneferu, Sahura y Neferirkara. Aún más afortunado es el hecho de que los antiguos egipcios mantenían registros detallados de los centenares de faraones que gobernaron Egipto durante siglos. Estas listas proporcionan la base para la moderna reconstrucción de la cro-

44 Orígenes

nología egipcia antigua y son una herramienta esencial en cualquier estimación de la edad de las pirámides.

La más famosa de estas listas de faraones fue elaborada por un sacerdote egipcio llamado Manetón, que vivió durante el siglo III a.C. Su obra incluye una lista de más de doscientos faraones que habían gobernado Egipto desde el comienzo de la historia registrada. Estos faraones se agrupan en unas treinta dinastías. No siempre queda claro qué tenían en común todos los faraones de una dinastía dada. A veces, los faraones que pertenecen a una dinastía concreta parecen pertenecer a una única familia, pero en otros casos se agrupan gobernantes procedentes de familias diferentes. Pese a tales incertidumbres, las dinastías de Manetón siguen proporcionando la nomenclatura básica para ordenar los faraones egipcios y la historia egipcia.

Los anales de Manetón indican cuánto duró cada dinastía y sugieren que el período de tiempo total cubierto por todas las dinastías abarca miles de años. Con una extensión temporal tan enorme, necesariamente hay imprecisiones. Además, la obra de Manetón se ha conservado sólo en algunas copias secundarias producidas cientos de años después de su muerte, e incluso éstas no son totalmente compatibles. Así, aunque la tradición de Manetón es una fuente valiosa, aún se necesitan listas de faraones anteriores para construir una cronología más precisa.

Felizmente para los egiptólogos, hay otras listas de faraones que son miles de años más antiguas que la de Manetón. Algunas fueron creadas para decorar los muros de los templos y sólo incluyen gobernantes considerados «importantes» en la época en que se grabó la piedra, mientras que omiten varios faraones de corta vida o herejes que se conocen por otros registros históricos. Otros textos, de los que sólo se conservan fragmentos, parecen haber contenido originalmente una enumeración más o menos completa de gobernantes egipcios. Por ejemplo, la Piedra de Palermo ofrece un registro año a año de sucesos en la historia egipcia hasta la Quinta Dinastía. También existe el Papiro de Turín, probablemente creado en la Novena Dinastía, que contiene una lista de faraones junto con la duración de sus reinados. Aquí se incluyen incluso faraones que gobernaron tan sólo un año. Tales fuentes, aunque lamentablemente incompletas, conservan información de

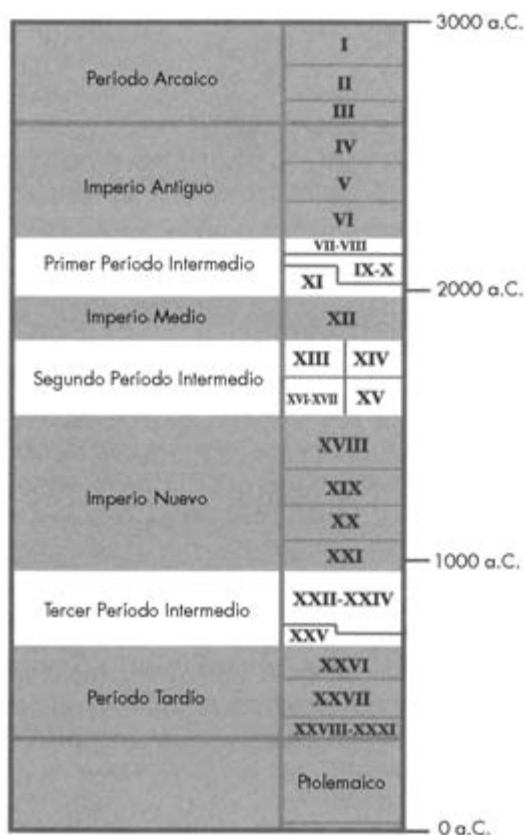
Precesión, Polaris y la edad de las pirámides 45

FIGURA 3.1. Un esbozo aproximado de la historia del Antiguo Egipto. Los números romanos corresponden a las dinastías, mientras que los imperios y períodos se muestran a la izquierda. Los años a la derecha son sólo aproximados.

valor incalculable que ha permitido a los estudiosos llegar a una comprensión más clara de una historia compleja que abarca tres milenios.

Basados en estos y otros documentos históricos, los egiptólogos han construido el perfil de la historia del Antiguo Egipto que se muestra en la Figura 3.1. Sigue estando dividida en treinta y una dinastías, que ahora se agrupan en un Período Arcaico, imperios Antiguo, Medio y Nuevo, el Período Tardío y tres períodos intermedios. Los imperios son, en general, períodos en los que el gobierno central de Egipto

46 Orígenes

era fuerte, mientras que los períodos intermedios eran tiempos en que la autoridad del faraón era débil. Durante los últimos períodos varios gobernantes e incluso potencias extranjeras podían ejercer control sobre diferentes partes de Egipto.

Los faraones asociados con las Grandes Pirámides de Giza pertenecen a la Cuarta Dinastía del Imperio Antiguo, lo que les sitúa en un período muy temprano de la larga historia de Egipto. En consecuencia, sus pirámides figuran entre los monumentos más antiguos de Egipto. Sin embargo, la información de las listas de faraones no puede proporcionarnos una estimación muy precisa de cuándo vivieron estos faraones o cuándo fueron construidas las pirámides. Estos registros pueden indicar cuánto tiempo gobernó cada faraón, pero hay lagunas en el registro y, para complicar más las cosas, algunos faraones pueden haber tenido reinados que se solapaban. Este tipo de incertidumbres tienden a acumularse a medida que retrocedemos en el tiempo, de modo que la situación temporal de sucesos muy tempranos, tales como la construcción de las pirámides, es muy difícil de fijar.

Son los períodos intermedios los que plantean los desafíos más importantes. En el caso de los imperios, cuando la autoridad central de Egipto era fuerte, la secuencia de gobernantes es bastante segura. El número de años que gobernó cada faraón durante cada uno de estos períodos está también razonablemente bien establecido sobre la base de las listas de faraones y los registros contemporáneos. Por el contrario, durante los períodos intermedios no hay siquiera certeza acerca de cuántos gobernantes hubo. Por consiguiente, los imperios pueden oscilar arriba y abajo varios cientos de años dependiendo de cuánto duraran los períodos intermedios.

Puede resultar sorprendente que los datos astronómicos proporcionen una manera de reducir estas incertidumbres. Documentos de los imperios Medio y Nuevo registran ciertos sucesos astronómicos que nos permiten fijar estos períodos en el tiempo. No se han encontrado de momento documentos similares del Imperio Antiguo, pero estas fuentes, combinadas con datos codificados en la alineación de las pirámides, pueden ofrecer una manera de estimar la edad de todo el Imperio Antiguo.

Sección 3.2: De estrellas del can y años bisiestos: datando el Imperio Medio

Los documentos que revelan la edad de los imperios Medio y Nuevo no registran una supernova, eclipse o algún otro suceso astronómico singular, sino que hacen referencias a fenómenos que ocurren todos los años. Estos sucesos pueden arrojar luz sobre la situación temporal de sucesos históricos gracias a una peculiaridad útil del calendario egipcio. El calendario utilizado por los egipcios para regular los asuntos administrativos constaba de tres estaciones, compuestas cada una de ellas por cuatro meses de 30 días, más 5 días extras para completar un total de 365 días. Este año estaba ligado en principio a sucesos estacionales y astronómicos. Los nombres de las tres estaciones pueden traducirse vagamente como «inundación», «crecimiento» y «recolección». «Inundación» hace referencia a un suceso anual en el que el Nilo, debido al aumento de las lluvias en las tierras altas de Etiopía, crece y anega sus riberas, depositando una nueva capa de rico suelo sobre los campos egipcios. Una vez que la inundación remite, se hace la siembra y empieza la estación de «crecimiento». Finalmente, hay una estación de «recolección» antes de la próxima inundación. Por supuesto, la inundación puede empezar en días diferentes debido a las condiciones climáticas variables, de modo que un calendario ligado directamente a la inundación no sería práctico. Sin embargo, un suceso astronómico anuncia siempre el comienzo de esta importante inundación: el «orto heliaco» de Sirio.

Sirio es una estrella muy brillante en la constelación de Canis Mayor. Durante algún tiempo del año esta estrella desaparece detrás del Sol. Al cabo de unos setenta días puede verse de nuevo en el cielo a poca altura sobre el horizonte, justo antes del alba. Este suceso ocurre en julio, aproximadamente en la época de la inundación anual. Es muy razonable que los egipcios tomaran este suceso para señalar el comienzo del Año Nuevo.

Parece, no obstante, que los egipcios nunca utilizaron un día bisiesto en su calendario civil, de modo que este año era ligeramente más corto que el tiempo que tarda la Tierra en dar una vuelta alrededor del Sol, que es aproximadamente 365,25 días. Esto significa que el in-

48 Orígenes

tervalo de tiempo entre los ortos heliacos de Sirio (ligados al año astronómico) era ligeramente más largo que los 365 días del calendario egipcio. Al cabo de cuatro años el orto de Sirio ocurre un día antes del día de Año Nuevo egipcio, y con el paso de los años este suceso se adelanta cada vez más en el año. Sólo al cabo de unos 1.460 años volvería a aparecer Sirio el día «correcto».

Esta peculiaridad se ha mostrado muy útil para los historiadores. Registros de tiempos romanos nos dicen que el primer día del calendario egipcio y el orto heliaco de Sirio coincidían en el año 139 d.C., aproximadamente. Contando hacia atrás, podemos determinar que esta sincronización habría ocurrido también alrededor del 1320 a.C. y del 2780 a.C. También podemos calcular cuándo ocurriría el orto heliaco de Sirio en cualquier otro año. Por consiguiente, si un documento nos dice que el orto ocurrió cierto día, podemos calcular a qué año se está refiriendo.

Por fortuna, existen al menos dos de tales reliquias, una del Imperio Nuevo y otra del Imperio Medio. Puesto que es más fácil de interpretar, aquí sólo consideraremos el documento del Imperio Medio, un modesto fragmento de papiro conocido por el nombre igualmente modesto de «papiro 10012 del Museo de Berlín». El texto de este objeto registra que Sirio volvería a aparecer el décimo sexto día del octavo mes del séptimo año de un faraón llamado Senusert, que es o bien 226 días después o 139 días antes del día de Año Nuevo egipcio. Esto sólo pudo ocurrir en o alrededor del 1872 a.C., pues otras fechas posibles como 412 a.C. y 3332 a.C. pueden descartarse sobre la base de otros datos arqueológicos. Aunque complicaciones a la hora de interpretar estos documentos impiden que esta fecha pueda ser asignada a un único año, proporciona un ancla que fija en el tiempo al Imperio Medio.

Con esta información sobre la edad del Imperio Medio, el mayor obstáculo que queda para determinar la edad del Imperio Antiguo y las pirámides es el Quinto Período Intermedio. Sin un registro similar de sucesos astronómicos útiles procedente del Imperio Antiguo, la edad de las pirámides es incierta en unos doscientos años. Puesto que estos monumentos tienen unos 4.500 años, esto supone una incertidumbre de tan sólo un 5% en la edad. De todas formas, incluso cien años es más de una generación, y está más allá de la memoria viva de

la mayoría de las personas. Y sin una medida más precisa de la edad del Imperio Antiguo es muy difícil interpretar algunos registros del Primer Período Intermedio o el Imperio Medio temprano, puesto que es imposible decir si los últimos días del Imperio Antiguo se consideraban «historia antigua» en esta época. Esta dificultad podría resolverse si la incertidumbre en la edad del Imperio Antiguo se redujera a tan sólo una o dos décadas. En el año 2000, una egiptóloga llamada K. E. Spence sugirió una forma de datar con más exactitud el Imperio Antiguo. Resulta que las propias pirámides pueden tener la clave para situar exactamente en el tiempo al Imperio Antiguo.

Sección 3.3: La secuencia de las pirámides

Las pirámides pueden servir como medidores del tiempo tanto como monumentos, porque podemos utilizar registros históricos para establecer el orden en que fueron construidas. Aunque se construyeron precursoras y prototipos de pirámides durante la Tercera Dinastía, la construcción de pirámides se convirtió en una industria regular en el alba de la Cuarta Dinastía (Figura 3.2). Sneferu, el primer gobernante de la Cuarta Dinastía, fue responsable de tres grandes pirámides. La primera, construida en un lugar llamado Meidum, se ha derrumbado en parte y hoy no se parece mucho a una pirámide clásica. Las otras dos pirámides de Sneferu fueron construidas un poco más al norte en un lugar llamado Dahshur. Su pirámide «Acodada» tiene una forma curiosa, puesto que los lados de la pirámide tienen una pendiente pronunciada en la base y una pendiente suave en la parte superior. Esto quizá se haya hecho para reducir el peso que soportaban las cámaras interiores de la pirámide, cuyas paredes parecen haberse agrietado bajo la tensión. La última pirámide de Sneferu fue la pirámide «Roja» (llamada así por el color de sus bloques de piedra caliza), que fue construida durante su tercera década en el trono y que probablemente es donde fue enterrado finalmente.

Los sucesores de Sneferu fueron responsables de las famosas pirámides de Giza. La primera y más grande fue construida por un faraón llamado Keops, que con toda probabilidad era hijo de Sneferu. A

50 Orígenes



FIGURA 3.2. Un mapa de Egipto, con una ampliación que muestra las localizaciones de las pirámides discutidas en el texto (triángulos oscuros). Los triángulos claros indican la localización de otras pirámides.

Keops le sucedió un faraón llamado Dyedefra, que gobernó durante unos ocho años y empezó una pirámide no en Giza, sino en un lugar llamado Abu Roash a unos 10 kilómetros al norte. Dyedefra murió cuando su pirámide estaba aún en sus primeras fases, y el lugar consiste ahora en unas pocas calles de piedra y una zanja excavada para la cámara funeraria. A Dyedefra le sucedió Kefrén, que fue responsable de la otra gran pirámide de Giza. La tercera pirámide de Giza es más pequeña que sus vecinas y fue construida por Micerino, de quien no sabemos si fue o no el sucesor directo de Kefrén. Después de Micerino hubo un par de faraones de corta duración —que, por lo que sabemos, no construyeron pirámides— que gobernaron antes del final de la Cuarta Dinastía.

Los detalles de la transición entre la Cuarta y la Quinta Dinastías están poco claros y envueltos en mitos. Varios gobernantes de esta nueva dinastía, incluidos Sahura y Neferirkara, construyeron sus propias pirámides al sur de Giza, en un lugar llamado Abusir. Estos mo-

Precesión, Polaris y la edad de las pirámides 51

numentos son mucho más pequeños que los de Giza. Incluso así, deben de haber sido estructuras impresionantes durante muchos cientos de años.

Se construyeron pirámides a lo largo de la Quinta Dinastía y parte de la Sexta, época en la que incluían textos que describían la vida de los gobernantes después de la muerte. Estos «textos piramidales» constituyen el corpus más antiguo de literatura religiosa en Egipto. También se construyeron pirámides durante el Imperio Medio, aunque para entonces se construían básicamente de adobe en lugar de piedra, y ahora están reducidas a ruinas.

Sección 3.4: Una pauta sospechosa en las pirámides

Las pirámides de principios del Imperio Antiguo son impresionantes proezas de ingeniería, no sólo debido a su enorme tamaño sino también a su preciso trazado. Aunque muchas de las capas exteriores de piedra han desaparecido, varias marcas en la base de las pirámides bastan para dar testimonio del cuidado con que se diseñaron estas estructuras.

De particular interés para nosotros es que estas pirámides estaban alineadas de modo que sus lados apuntaban en las direcciones cardinales con errores de menos de un grado, y las dos grandes pirámides de Giza tienen errores de menos de una décima de grado. Esta precisión sólo podría alcanzarse utilizando medidas astronómicas, pero ¿qué objeto astronómico utilizaron los egipcios? Por desgracia, ningún registro antiguo documenta explícitamente los procedimientos utilizados para planear y orientar las pirámides, y hay muchas maneras mediante las que los egipcios podrían haber determinado las orientaciones adecuadas de los monumentos. La mayoría de los métodos considerados por los egiptólogos darían siempre —si se siguen adecuadamente— una estructura perfectamente alineada con las direcciones cardinales. Por ejemplo, siguiendo el movimiento de una estrella en el cielo, o el movimiento de una sombra en el suelo, los egipcios habrían descubierto en qué instante el Sol o alguna estrella alcanzaba el punto más alto en el cielo, punto en el que debe estar el norte o el

52 Orígenes

sur. Aunque tales métodos tienen una atractiva elegancia, hay pruebas de que los egipcios no utilizaron una aproximación tan fiable.

Si tomamos las pirámides en el orden en que fueron construidas y representamos las desviaciones de su orientación respecto al norte verdadero (lo que yo llamo el error de alineación) para cada una, obtenemos la intrigante pauta que se presenta en la Figura 3.3. Las grandes pirámides de Giza construidas por Keops y Kefrén tienen los menores errores de alineación y están alineadas con mucha precisión con el norte verdadero, mientras que las pirámides construidas antes y después de esa época tienen errores de alineación bastante mayores. Sin

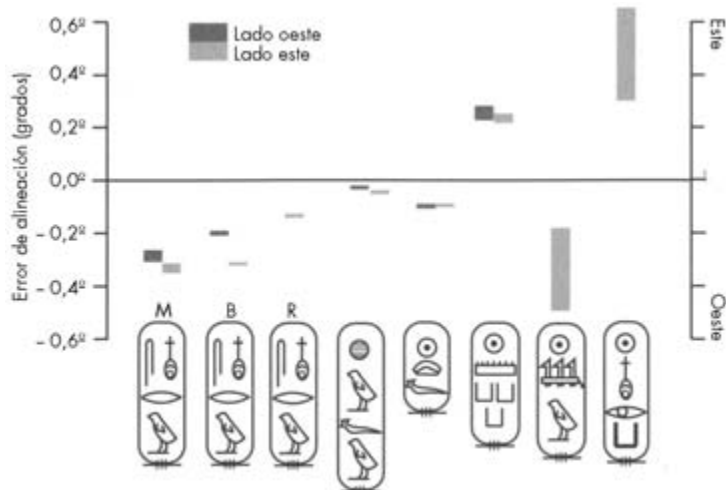


FIGURA 3.3. Los errores en las alineaciones de las pirámides en el orden en que fueron construidas (datos de Kate Spence, «Ancient Egyptian Chronology and the Astronomical Orientation of the Pyramids» con *Nature* 408 (2000): 320-24, p. 320). Los nombres de los faraones relevantes se dan abajo (de izquierda a derecha son Sneferu, Keops, Kefrén, Micerino, Sahura, Neferirkara). Las letras sobre el nombre de Sneferu se refieren a sus tres pirámides. Para cada pirámide, las barras indican el error de alineación de los lados este y oeste de una pirámide concreta (la altura de cada barra muestra la incertidumbre de la medida). Nótese que en general las pirámides empiezan ligeramente torcidas hacia el oeste, pero con el tiempo llegan a torcerse poco a poco hacia el este.

Precesión, Polaris y la edad de las pirámides 53

embargo, lo que resulta especialmente interesante es que todas las pirámides de Sneferu, construidas antes que las de Giza, están ligeramente desviadas hacia el oeste, mientras que dos de las tres pirámides posteriores están ligeramente desviadas hacia el este.

Esta pauta se hace aún más sospechosa cuando incluimos información acerca de cuándo se construyeron unas pirámides comparadas con otras. Recordemos que aun cuando los registros históricos por sí solos no pueden indicar cuánto tiempo hace que se construyeron las pirámides, sí nos dicen cuánto tiempo gobernó cada faraón. Por ejemplo, el Papiro de Turín registra que Keops gobernó durante veintitrés años y Dyedefra gobernó durante ocho años, de modo que un total de treinta y un años separan los ascensos de Keops y Kefrén al trono de Egipto. Puesto que la construcción de una pirámide es un proyecto grandioso cuya realización requiere una década o dos, y tenía que estar acabado para que el faraón tuviera un entierro apropiado, cabe esperar razonablemente que la obra del monumento para un faraón concreto se empezara inmediatamente después de su coronación. Por lo tanto, cabe esperar que la pirámide de Kefrén fuera levantada unos treinta años después de la de Keops. Con ayuda de otros registros históricos también podemos calcular cuántos años separan las otras pirámides de la pirámide de Kefrén. Entonces podemos formar la gráfica que se muestra en la Figura 3.4, que muestra el error de alineación de cada pirámide en función del tiempo en que se empezó a levantar dicha pirámide con respecto a la de Kefrén (o cualquier otro faraón). Ahora podemos ver que los datos de la mayoría de las pirámides parecen encajar en una recta, y las dos pirámides que caen significativamente lejos de esta recta —la de Kefrén y la de Sahura—, caerían en ella si los signos de sus errores de alineación se cambiaran de negativos (hacia el oeste) a positivos (hacia el este). Pronto veremos que invertir el signo del error de alineación puede ser algo razonable.

Esta pauta podría ser tan sólo una interesante coincidencia. Sin embargo, la pendiente de esta recta indica que la orientación de estas pirámides estaba cambiando a un ritmo constante de aproximadamente medio grado por siglo. Este ritmo de deriva es importante porque significa que los errores de alineación podrían estar cambiando con el

54 Orígenes

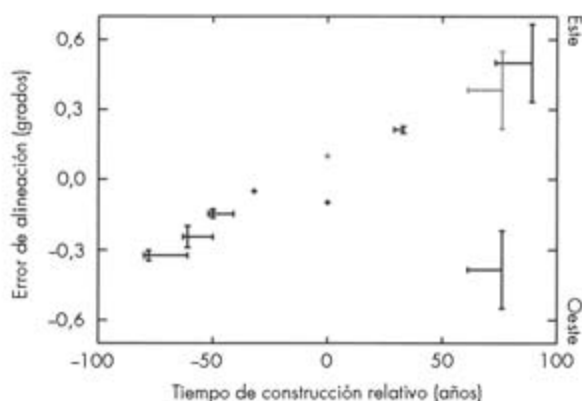


FIGURA 3.4. Los errores de alineación de las pirámides en función del tiempo (datos de Kate Spence, «Ancient Egyptian Chronology and the Astronomical Orientation of the Pyramids» en *Nature* 408 (2000): 320-24, p. 320). Las cruces negras dan los valores medidos y las incertidumbres en los errores de alineación a lo largo del eje y, y los tiempos en que se construyeron las pirámides, unas con respecto a otras, a lo largo del eje x. El cambio de signo del error de alineación de las dos pirámides que no siguen la tendencia natural hacia el este da los puntos grises.

tiempo debido a que la técnica utilizada para orientar las pirámides estaba afectada por la precesión de la Tierra.

Sección 3.5: Peonzas giratorias y pirámides torcidas

La precesión es un fenómeno que se da en cuerpos que giran bajo la influencia de fuerzas asimétricas. Un ejemplo familiar de precesión lo ofrecen peonzas y giróscopos. Una peonza que no esté girando caerá de lado, pero si está girando a suficiente velocidad, consigue mantenerse sin caer. Incluso así, la fuerza de la gravedad sigue teniendo efecto sobre la peonza. Si no hubiera fuerzas externas o si la peonza estuviera en caída libre, giraría alrededor de su eje y este eje apuntaría siempre en la misma dirección. Sin embargo, cuando una mesa o alguna superficie soporta la punta de la peonza, la distribución asimétrica de fuerzas sobre la peonza hace que la dirección del eje de giro cambie

Precesión, Polaris y la edad de las pirámides 55

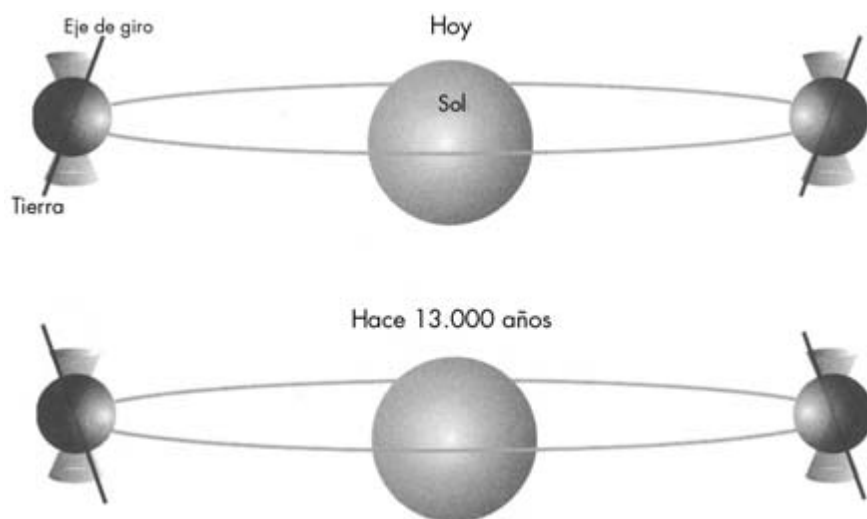


FIGURA 3.5. Precesión de la Tierra. El panel superior muestra la Tierra en dos posiciones en su órbita alrededor del Sol (no está a escala). El eje de giro está indicado por la barra que atraviesa la Tierra, que apunta en la misma dirección en el espacio mientras la Tierra se mueve alrededor del Sol. A medida que la Tierra experimenta la precesión, este eje cambia de dirección y describe un círculo. Hace 13.000 años el eje de la Tierra apuntaba en otra dirección, como se muestra en el panel inferior.

con el tiempo. En particular, el extremo libre del eje de la peonza describe un círculo horizontal. Este movimiento del eje de giro se denomina *precesión* de la peonza.

La Tierra gira una vez al día alrededor de un eje que hoy apunta a una estrella llamada Polaris. Este eje sigue apuntando en la misma dirección aun cuando la Tierra se mueve alrededor del Sol, como muestra la Figura 3.5. Por esto es por lo que Polaris se ve en el norte durante todo el año. Sin embargo, el eje de giro experimenta una lenta precesión debido a las fuerzas gravitatorias del Sol y la Luna que actúan sobre una Tierra ligeramente achatada. Así como el eje de una peonza describe un círculo horizontal, el eje de giro de la Tierra describe un círculo paralelo al plano de la órbita de la Tierra.

Para los que vivimos en la Tierra, esta precesión afecta a la apariencia del cielo nocturno. Las estrellas de la noche parecen describir

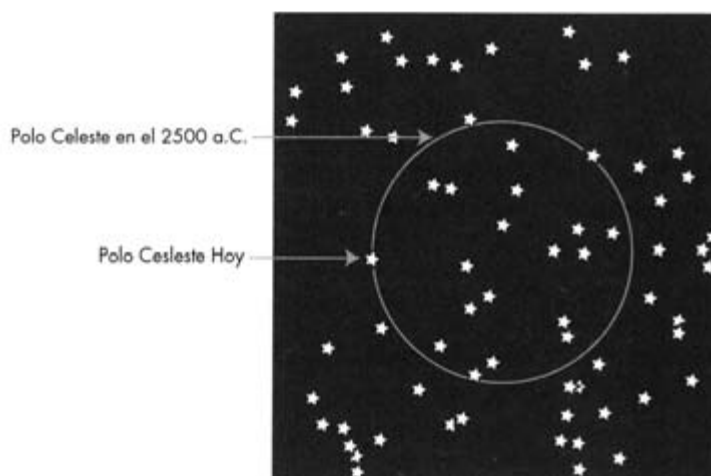
56 *Orígenes*

FIGURA 3.6. La trayectoria del polo celeste. Debido a la precesión de la Tierra, el polo celeste (el punto alrededor del cual parecen moverse las estrellas) da una vuelta alrededor del círculo cada 26.000 años. Para apreciar la escala, nótese que El Gran Carro está en la parte superior izquierda del dibujo.

círculos alrededor de un punto, definido por el eje de rotación de la Tierra, llamado el polo celeste. Precisamente ahora, el polo celeste está cerca de Polaris, la «estrella polar». Sin embargo, a medida que la Tierra experimenta la precesión, el polo celeste se mueve a través de las estrellas en un amplio círculo centrado en la constelación de Draco (mostrada en la Figura 3.6), de modo que hace miles de años Polaris no estaba cerca del polo celeste y el cielo septentrional parecía muy diferente del de hoy (véase Figura 3.7). Este movimiento del polo celeste está determinado por las formas, rotaciones, masas y órbitas del Sol, la Luna, y la Tierra, y así podemos calcular dónde estaba el polo celeste con respecto a las estrellas en cualquier momento del pasado.

Desde mediados de los años ochenta del siglo pasado algunos investigadores han planteado la hipótesis de que los cambios en la alineación de las pirámides podrían estar relacionados con la precesión de la Tierra. Si es así, esto proporcionaría información importante sobre los procedimientos que utilizaron los egipcios para orientar estas estructuras. La mayoría de los métodos que se han propuesto para alinear las pirámides son insensibles a la precesión de la Tierra. Por

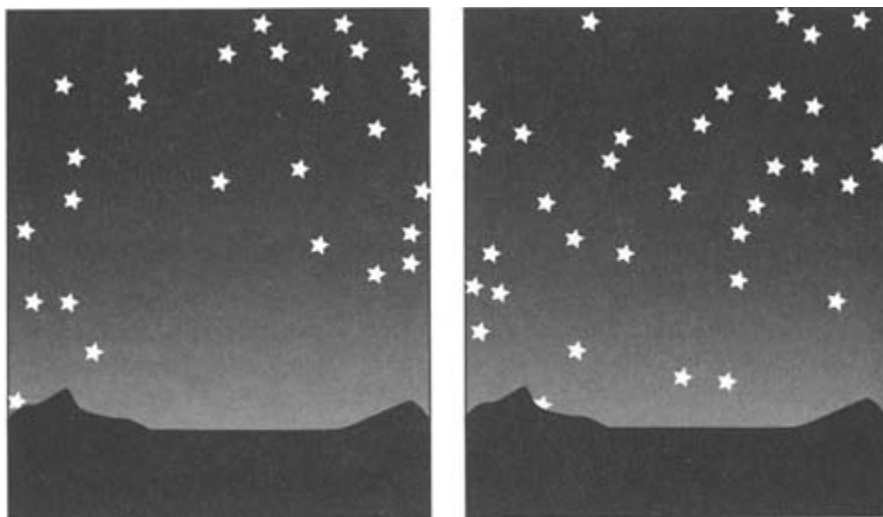
Precesión, Polaris y la edad de las pirámides 57

FIGURA 3.7. El cambiante cielo nocturno. A la izquierda vemos el cielo nocturno como es ahora. Todas las estrellas parecen orbitar en torno a Polaris (cerca del centro de la imagen). A la derecha tenemos el cielo tal como aparecería cuando se construyeron las pirámides. Nótese que las estrellas han cambiado de posición, y no había ninguna estrella brillante exactamente donde hoy está Polaris.

ejemplo, se ha sugerido a menudo que los egipcios determinaban la localización del Polo Norte observando por dónde salía y se ponía una estrella en el horizonte. Un punto medio entre estas dos posiciones es el norte (o el sur) del observador, independientemente de dónde esté la estrella en el cielo, de modo que este método siempre da una estimación fiable del norte verdadero. Por lo tanto, ni este método ni otros similares que implican al Sol pueden explicar por qué la alineación de las pirámides sufre una deriva con el tiempo.

Antes del artículo de K. E. Spence algunos estudiosos habían propuesto maneras de alinear las pirámides utilizando las posiciones de ciertas estrellas para *aproximar* la localización del polo celeste, de modo que la alineación de las pirámides cambiaría a medida que el polo celeste se movía lentamente en el cielo. Sin embargo, el trabajo de Spence despertó un renovado interés por estas ideas porque ella proponía que la medida del error de alineación no sólo proporcionaba

58 Orígenes

pruebas de que los egipcios utilizaban estrellas para alinear las pirámides sino que también podía decirnos qué estrellas utilizaron, y con ello revelar las fechas exactas en que fueron construidas las pirámides.

Sección 3.6: Un nuevo método para alinear las pirámides

Durante la era de la construcción de las pirámides el polo celeste no estaba cerca de ninguna estrella particularmente brillante, de modo que no había ninguna semejante a Polaris que indicara la dirección del norte verdadero. Al no disponer de una estrella polar, los egipcios tendrían que haber utilizado las estrellas de alguna otra manera para alinear las pirámides. Cualquiera que fuera este método, dependería de la posición de las estrellas con respecto al polo celeste, de modo que la precesión de la Tierra provocaría que la alineación de las pirámides sufriera una deriva con el tiempo.

Spence sugirió que los egipcios utilizaron dos estrellas en el cielo septentrional para «señalar» el polo celeste y encontrar el norte. Ella supone que cuando se construyeron las pirámides había dos estrellas situadas en el cielo de tal modo que la recta que las unía pasaba cerca del polo celeste. En tal caso, cuando estas estrellas estuvieran alineadas verticalmente, una recta vertical que las conectara y se prolongara hasta el suelo (p. ej. una plomada) indicaría la dirección del norte verdadero, como se muestra en la Figura 3.8.

Esta sugerencia es ciertamente plausible. Y si es correcta, la alineación de las pirámides sufrirá una deriva con respecto al norte verdadero a medida que se mueve el polo celeste con respecto a la recta que une las estrellas. Además, explica de manera natural por qué dos de las pirámides parecen tener errores de alineación con el «signo equivocado», es decir, desviadas hacia el oeste en lugar de hacia el este. El signo del error de alineación depende de cuál de las dos estrellas estaba más alta en el cielo cuando se hizo la medida (véase Figura 3.9). Esto sugiere que seis de las pirámides fueron alineadas cuando una de las estrellas estaba más alta en el cielo, y las otras dos fueron alineadas cuando era la otra estrella la que estaba

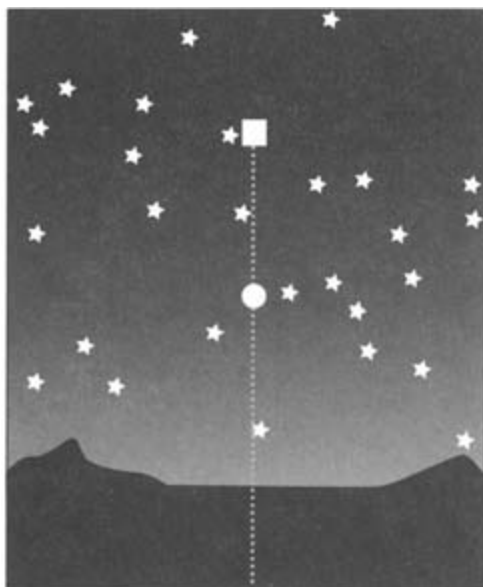
Precesión, Polaris y la edad de las pirámides 59

FIGURA 3.8. Utilizando dos estrellas para alinear la pirámide. Si se escoge el par de estrellas correcto (ilustradas con un círculo y un cuadrado), entonces la prolongación hasta el suelo de una línea vertical que conecta las dos estrellas (por ejemplo, con una plomada) puede proporcionar una buena indicación del norte.

más alta, quizá porque fueron planeadas durante una época del año diferente.

Otro aspecto atractivo de este método es que utiliza estrellas septentrionales, que sabemos que fueron muy importantes para los egipcios. Se mencionan en los textos piramidales inscritos en las últimas pirámides del Imperio Medio, que las describen como «estrellas indestructibles» porque nunca descendían por debajo del horizonte y por lo tanto nunca entraban en el submundo. Estos textos indican también que los gobernantes de Egipto querían ser identificados con estas estrellas inmortales, de modo que tendría sentido que las utilizarasen para alinear sus pirámides.

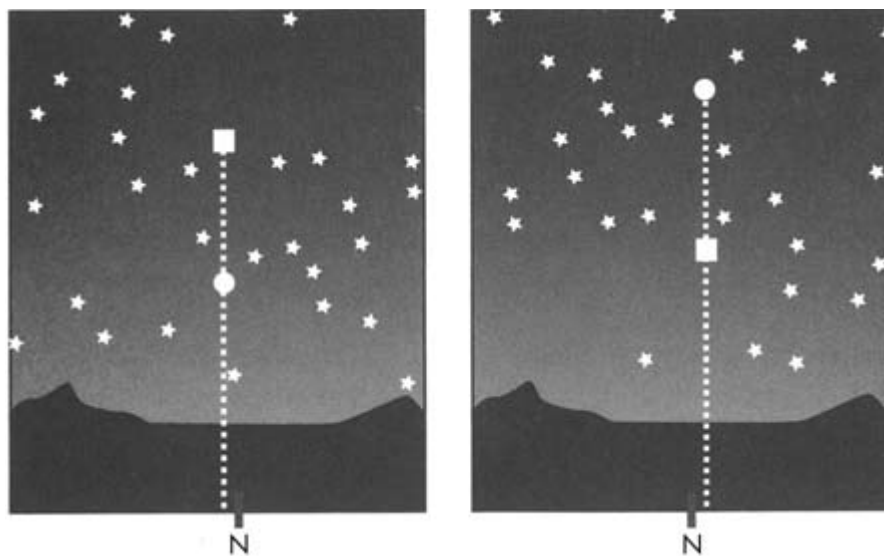
60 *Orígenes*

FIGURA 3.9. Errores diferentes con las mismas estrellas. El mismo par de estrellas (indicadas por un círculo y un cuadrado) se utiliza para determinar el norte, pero la estrella que está más alta en el cielo es diferente en las dos gráficas. La línea que conecta las estrellas se utiliza para estimar el norte (indicado por la pequeña barra en el fondo de la imagen). En ambos casos hay un error en la medida del norte, pero en un caso la orientación es ligeramente a la izquierda (oeste), y en el otro está desviada a la derecha (este).

Sección 3.7: ¿Realmente hicieron esto los egipcios?

Si las pirámides fueron alineadas realmente como supone Spence, y la alineación cambiante de las pirámides sigue un fenómeno astronómico predecible, entonces se sigue que las orientaciones variables de las pirámides podrían indicar su edad. Por supuesto, necesitamos saber qué par de estrellas utilizaron realmente los egipcios y, más fundamentalmente, necesitamos pruebas de que los egipcios utilizaron este método y no alguna otra técnica. Lo que hace la propuesta de Spence especialmente interesante es que los propios datos de alineación pueden ser utilizados para comprobar si los egipcios utilizaron este método. Además, podemos determinar el par de estrellas concreto que ob-

Precesión, Polaris y la edad de las pirámides 61

servaban los egipcios sin conocer cómo éstos hacían la medida o la importancia religiosa de diferentes estrellas en el cielo septentrional.

En cualquier instante dado, el polo celeste se mueve a través del cielo en una dirección concreta. La velocidad a la que cambia con el tiempo el error de alineación depende de cómo está orientada la recta que une las estrellas con respecto a esta dirección de movimiento del polo. Si la trayectoria del polo celeste es casi perpendicular a la recta que une las estrellas, entonces el polo celeste pasa un tiempo relativamente corto cerca de la recta y el error de alineación cambiará con el tiempo de forma relativamente rápida. Por el contrario, si la trayectoria del polo celeste corta a la recta que une las estrellas a un ángulo pequeño, el polo celeste pasa un tiempo mayor cerca de la recta y el error de alineación cambiará más lentamente. Entonces podemos comparar la velocidad de deriva de la alineación esperada de acuerdo con diferentes pares de estrellas con la velocidad observada en las pirámides; el par de estrellas que dé el mejor ajuste tendrá la mayor probabilidad de ser el par que utilizaron los egipcios. Si ningún par de estrellas proporciona una velocidad próxima a la observada en las pirámides, entonces habrá que pensar que los egipcios utilizaron otro método. Esto hace esta propuesta particularmente atractiva porque, en lugar de basarnos en argumentos indirectos acerca de las capacidades o intereses de los antiguos, podemos utilizar directamente los datos de alineación para establecer si un método dado fue utilizado para orientar las pirámides.

Spence no hizo un examen exhaustivo de todos los pares de estrellas posibles, pero tal examen no es difícil de hacer. En primer lugar, para estrechar la lista de pares de estrellas potenciales consideraremos sólo las estrellas más brillantes situadas a menos de 25 grados del polo celeste el año 2500 a.C., fecha aproximada de construcción de las Grandes Pirámides. Hay 17 estrellas que satisfacen este criterio, lo que da 136 pares posibles. Para cada par, es sencillo calcular aproximadamente cuándo una recta que une las dos estrellas pasa por el polo celeste y con qué rapidez cambiaría con el tiempo el error de alineación (véase el apéndice para detalles). Sólo nueve pares dan rectas que pasaban cerca del polo en un período de tiempo comprendido entre doscientos años por encima y por debajo del 2500 a.C., de modo que éstos son los candi-

62 Orígenes

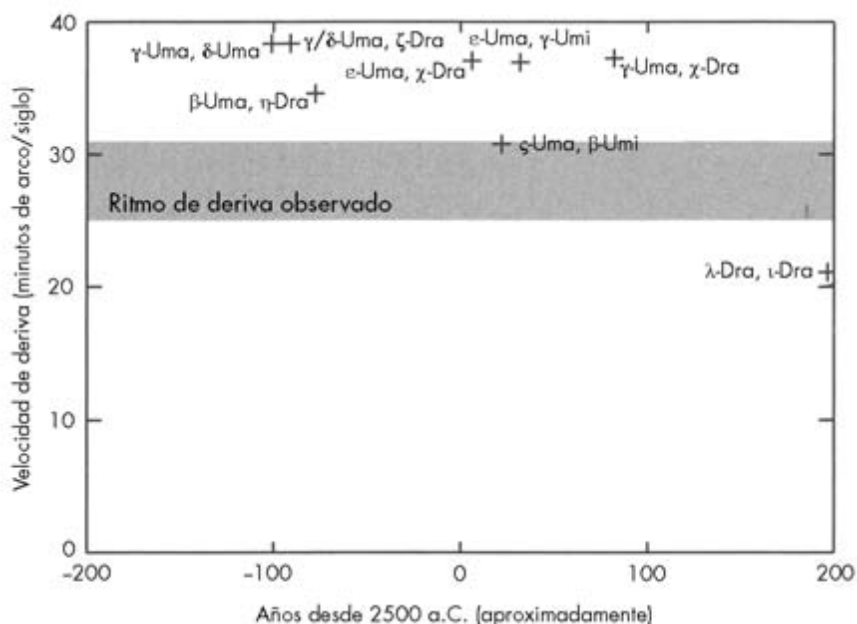


FIGURA 3.10. Para cada posible par de estrellas brillantes en el cielo septentrional, calculamos el ritmo al que deberían cambiar los errores de alineación con el tiempo y la fecha en que la medida debería dar exactamente el norte verdadero. Estas dos variables se representan aquí, con el ritmo de deriva dado en unidades de minutos de arco (60 minutos de arco = 1 grado) por siglo. Sólo nueve pares aparecen realmente en el intervalo temporal mostrado aquí, y sólo uno encaja en el intervalo compatible con el ritmo de deriva observado (indicado por la franja sombreada). Si los egipcios utilizaron realmente este método, éste es muy probablemente el par que utilizaron.

datos más razonables. Como se muestra en la Figura 3.10, la velocidad de cambio predicha para los errores de alineación con la mayoría de estos pares es de alrededor de 35-40 minutos de arco (unos dos tercios de grado) por siglo; hay un par que da una velocidad de 30 minutos de arco (aproximadamente medio grado) por siglo y otro que da unos 20 minutos de arco (aproximadamente un tercio de grado) por siglo.

¿Encajan algunas de estas velocidades con la velocidad observada para las pirámides? Utilizando las mejores estimaciones de las orientaciones de las pirámides y del tiempo de su construcción, obtenemos

Precesión, Polaris y la edad de las pirámides 63

una velocidad de 28 minutos de arco por siglo (véase el apéndice para los detalles de este cálculo). Sorprendentemente, sólo uno de los citados pares de estrellas es compatible con esta velocidad. Este par lo constituyen Mizar (en el Carro Mayor) y Kochab (en el Carro Menor), que también se conocen como ζ Ursa Majoris y β Ursa Minoris, las estrellas en la banda oscura de la Figura 3.10. Si los egipcios orientaron las pirámides como propone Spence, estas estrellas forman el único par que podrían haber utilizado.

Puesto que los cambios observados en la alineación de las pirámides son compatibles con uno y sólo un par de estrellas, y sabemos en qué momento la recta que une ambas estrellas daría cualquiera de los errores de alineación observados, podemos asignar fechas inequívocas a todas estas pirámides (suponiendo que los egipcios utilizaran este método). Por ejemplo, la Gran Pirámide de Keops en Giza habría sido planeada en el 2480 a.C., con un margen de error de unos pocos años arriba o abajo. Esta fecha es cincuenta años posterior a la de las mejores conjeturas actuales basadas en registros históricos, pero tampoco es irrazonable.

Sección 3.8: Confirmando el método: *et tu, Dyedefra?*

El método referido de datar el Imperio Antiguo es ciertamente intrigante, pero es evidente que se necesitan datos adicionales para verificar si las pirámides fueron alineadas utilizando las estrellas como sugiere Spence. Estos datos pueden venir de medidas refinadas de la orientación y fechas relativas de las pirámides, o de medidas de las orientaciones de las pirámides inacabadas empezadas por varios gobernantes menores de este período, tales como la pirámide inacabada de Dyedefra.

Como se ha mencionado, Dyedefra gobernó durante un breve período entre Keops y Kefrén. Empezó una pirámide en Abu Roash, al norte de Giza, pero la construcción fue abandonada al poco tiempo de iniciarse —presumiblemente debido a la muerte prematura del gobernante—. Puesto que la pirámide de Dyedefra fue planeada cuando la recta que une Kochab y Mizar pasaba casi exactamente por el polo celeste, este monumento inacabado debería ser la «pirámide» más exactamente alineada de todas. En 2003, un equipo francés publicó los datos

64 Orígenes

de la orientación de la pirámide, y encontró que estaba desviada del norte hacia el oeste en 0,8 grados. De hecho, está *peor* alineada que cualquier otra pirámide de la época.

Así pues, este monumento aberrante no apoya la teoría de Spence del levantamiento de las pirámides. Sin embargo, tampoco la refuta decididamente. Dyedefra decidió ser enterrado lejos de Giza y el resto de su familia, y sus sucesores decidieron no seguir su ejemplo, de modo que cabe sugerir que él también decidió utilizar un método de alineación diferente.

En mi opinión, un enfoque mejor para poner a prueba la idea de Spence consiste en mejorar los datos de la orientación de las pirámides que parecen seguir la tendencia predicha. De momento, las orientaciones de las Grandes Pirámides de Giza están bien medidas con un margen de error menor de un minuto de arco. Sin embargo, las orientaciones medidas de las otras pirámides tienen imprecisiones de hasta 10 minutos de arco (véase apéndice). Si pudieran reducirse estas imprecisiones hasta niveles comparables a los de las Grandes Pirámides, entonces podríamos ver si las pirámides de la Quinta Dinastía de Sahura y Neferirkara siguen realmente la misma tendencia que las Grandes Pirámides. Si no lo hacen, el apoyo para el modelo será mucho menor. Además, si los grandes monumentos siguen cayendo en la misma línea, la incertidumbre en la velocidad de deriva se reducirá. Si esta velocidad sigue siendo compatible con la deriva en las posiciones de Mizar y Kochab, estos nuevos datos proporcionarían fuerte apoyo para el modelo. Por el contrario, si la estimación refinada de la velocidad de deriva observada es incompatible con los movimientos de estas estrellas, entonces es muy probable que los egipcios no utilizaran este método para alinear las pirámides.

Incluso si este método para determinar la edad de las pirámides resulta ser equivocado, sigue siendo un ejemplo interesante de cómo los historiadores intentan medir la edad en ausencia de una información de calendario completa. Evidentemente, la combinación de datos históricos, arqueológicos y astronómicos nos permite a veces descubrir cuándo sucedieron las cosas con gran precisión, y con incertidumbres residuales tan pequeñas como unos pocos años. Sin embargo, estos flujos de información sólo pueden combinarse en situaciones muy extraordinarias, tales como las que incluyen monumentos gigantescos

alineados con gran precisión. Por lo tanto se necesitan técnicas diferentes para datar la inmensa mayoría de las reliquias del pasado.

Sección 3.9: Lecturas adicionales

Algunas buenas fuentes online sobre el Antiguo Egipto en general y las pirámides en particular están en el proyecto Archivos de Giza, www.gizapyramids.org; www.egyptology.com, que contienen muchos buenos enlaces; y el archivo Abzu www.etana.org/abzu, que enlaza a muchos artículos eruditos sobre Egipto y el antiguo Próximo Oriente.

Para quienes no estén nada familiarizados con la historia de Egipto, recomiendo empezar por Barbara Mertz, *Temples, Tombs and Hieroglyphics* (Bedrick, 1990). Para obras generales más detalladas sobre la historia de Egipto, véase Meter A. Clayton, *Chronicle of the Pharaohs* (Thames and Hudson, 1994) e Ian Shaw, *The Oxford History of Ancient Egypt* (Oxford University Press, 2000).

Una buena obra general sobre las pirámides es la de Miroslav Verner, *The Pyramids* (Grove Press, 2001). Para más información acerca de cómo pudieron haberse construido, véase Dieter Arnold, *Building in Egypt* (Oxford University Press, 1991) y Martin Isler, *Sticks, Stones, and Shadows* (University of Oklahoma Press, 2001).

Una excelente obra de divulgación que explica la mecánica básica de la precesión, etc., es Larry Gonick y Art Huffman, *Cartoon Guide to Physics* (Harper Perennial, 1991).

La obra de referencia clásica sobre calendarios egipcios es Richard A. Parker, *The Calendars of Ancient Egypt* (University of Chicago Press, 1950). Para intentos más recientes de refinar la datación del Imperio Medio, véanse las referencias en Leo Depuydt, «Shotic Chronology in the Old Kingdom», en *Journal of the American Research Center in Egypt*, 37 (2000): 167-186.

El artículo original sobre la utilización de la precesión para datar las pirámides es de Kate Spence, «Ancient Egyptian Chronology and the Astronomical Orientation of the Pyramids» en *Nature* 408 (2000): 320-324. Un animado intercambio de cartas en respuesta a este artículo-

66 Orígenes

lo y que señala un error matemático en el análisis original se encuentra en *Nature* 412 (2001): 699-700.

Un artículo anterior que también apuntaba a la precesión como una explicación de los errores de alineación de las pirámides es de Steven C. Haack, «The Astronomical Orientation of the Pyramids» en *Archaeoastronomy*, n.º 7 (1984): S119-S125.

Juan Antonio Belmonte «On the Orientations of the Old Kingdom Egyptian Pyramids» en *Archaeoastronomy*, n.º 26 (2001): S1-S20, sigue el trabajo de Spence y sugiere otro par de estrellas (que son incompatibles con la velocidad de deriva observada). También presenta una buena discusión de cuestiones implicadas en las alineaciones estelares.

Las nuevas medidas de la pirámide de Dyedefra pueden encontrarse en Bernard Mathieu, «Travaux de l'IFAO en 2000-2001» en *BIFAO* (*Bulletin de l'Institut français d'archéologie orientale*), n.º 102 (2000): 437-614.

Apéndice: Los cálculos de la velocidad de deriva

Los cálculos de la velocidad de deriva que se ilustran en la Figura 3.10 no pueden encontrarse en la literatura publicada. Por ello incluyo aquí los detalles de los cálculos utilizados para hacer dicha gráfica.

Sólo estrellas más brillantes que las de magnitud 4 y a menos de 25 grados del polo celeste en 2500 a.C. se consideran candidatas razonables para la alineación de las pirámides. Las 17 estrellas que satisfacen estos criterios son α , β , γ , δ , ϵ , ζ y η Ursa Majoris; α , β y γ Ursa Minoris; y α , ζ , η , ι , κ , λ y χ Draconis. Las posiciones de estas estrellas vienen dadas en catálogos estándar de estrellas brillantes, y para estos cálculos se desprecian los movimientos propios de dichas estrellas.

Después de calcular las posiciones de estas estrellas con respecto a la posición del polo celeste en el 2500 a.C., se traza una recta a través de cada par de estrellas. Esta recta se prolonga hasta cortar otra línea recta que aproxima la trayectoria del polo celeste en el año 2500 a.C. (puede despreciarse la curvatura de esta trayectoria para el intervalo de tiempo aquí considerado). El punto en que se cortan estas dos rectas indica en qué momento el polo celeste caía a lo largo de la línea

Precesión, Polaris y la edad de las pirámides 67

que une las dos estrellas, y el ángulo que forman las rectas da la velocidad de deriva.

En cuanto a la velocidad de deriva observada en la orientación de las pirámides, los cálculos parten de las orientaciones de las pirámides dadas en el artículo de Spence (véase Tabla 3.1). El error de alineación efectivo de la última columna es la media ponderada de los dos lados, y el signo de los errores en las pirámides de Kefrén y Sahura se ha cambiado tal como se ha discutido antes. Como incertidumbre en el error efectivo se toma 1/2 de la diferencia entre las orientaciones de los dos lados. Sólo se ha medido un lado de la Pirámide Roja, de modo que el error en esta pirámide se fija arbitrariamente en 1' (cambiar el valor no afecta a los resultados de modo importante).

TABLA 3.1. Errores de alineación en las pirámides (en minutos de arco = 1/60 de grado).

<i>Pirámide</i>	<i>Error de alineación (Lado oeste)</i>	<i>Error de alineación (Lado este)</i>	<i>Error de alineación Efectivo</i>
Sneferu (Meidum)	$-18,1' \pm 1,0'$	$-20,6' \pm 1,0'$	$-19,4' \pm 1,3'$
Sneferu (Bent)	$-11,8' \pm 0,2'$	$-17,3' \pm 0,2'$	$-14,6' \pm 2,8'$
Sneferu (Roja)	—	$-8,7' \pm 0,2'$	$-8,7' \pm 1,0'$
Keops	$-2,8' \pm 0,2'$	$-3,4' \pm 0,2'$	$-3,1' \pm 0,5'$
Kefrén	$-6,0' \pm 0,2'$	$-6,0' \pm 0,2'$	$+6,0' \pm 0,3'$
Micerinos	$+14,1' \pm 1,8'$	$+12,4' \pm 1,0'$	$+12,8' \pm 0,9'$
Sahura	—	$-23' \pm 10'$	$+23' \pm 10'$
Neferirkara	—	$+30' \pm 10'$	$+30' \pm 10'$

TABLA 3.2. Cambios de alineación entre pirámides cronológicamente consecutivas (en minutos de arco = 1/60 de grado).

<i>Par de pirámides</i>	<i>Cambio de orientación</i>
Sneferu (Meidum)-Snofru (Bent)	$4,8' \pm 3,1'$
Sneferu (Bent)-Snofru (Red)	$5,9' \pm 3,0'$
Sneferu (Red)-Khufu	$5,6' \pm 1,0'$
Keops-Kefrén	$9,1' \pm 0,4'$
Kefrén-Micerinos	$6,8' \pm 1,0'$
Micerinos-Sahura	$10' \pm 10'$
Sahura-Neferirkara	$7' \pm 14'$

68 *Orígenes*

TABLA 3.3. Tiempo transcurrido entre la construcción de pirámides cronológicamente consecutivas. Datos de K. Spence, «Ancient Egyptian Chronology and the Astronomical Orientation of the Pyramids» en *Nature* 408 (2000); 320-324.

<i>Par de pirámides</i>	<i>Tiempo transcurrido (años)</i>
Sneferu (Meidum)-Sneferu (Bent)	12-17
Sneferu (Bent)-Snofru (Roja)	9-11
Sneferu (Roja)-Khufu	9-20
Keops-Kefrén	31-32
Kefrén-Micerinos	30-33
Micerinos-Sahura	32-43
Sahura-Neferirkara	12-13

TABLA 3.4. Cambio de alineación entre pirámides cronológicamente consecutivas.

<i>Par de pirámides</i>	<i>Velocidad (minutos de arco/siglo)</i>
Sneferu (Meidum)-Sneferu (Bent)	33 ± 22
Sneferu (Bent)-Sneferu (Roja)	59 ± 30
Sneferu (Roja)-Keops	39 ± 16
Keops-Kefrén	$29 \pm 1,5$
Kefrén-Micerinos	22 ± 3
Micerinos-Sahura	27 ± 27
Sahura-Neferirkara	56 ± 113

Basados en estos datos podemos calcular cuánto cambió la alineación entre pares de pirámides consecutivas (véase Tabla 3.2).

El tiempo transcurrido entre la construcción de estas pirámides se obtiene a partir de registros históricos (Tabla 3.3). Si como incertidumbre en la cronología tomamos la mitad de este rango de años, podemos calcular la velocidad con que cambió la alineación para cada par (Tabla 3.4).

Combinando todas estas estimaciones obtenemos la velocidad final de 28 minutos de arco por siglo y un valor para el intervalo 2-sigma de 3 minutos de arco por siglo. Este valor es algo conservador, y podría hacerse una estimación más refinada cuantificando con más cuidado las diversas incertidumbres, pero estos cálculos están más allá del alcance de este libro.

La física del carbono-14

La edad de un artefacto no tiene que estar grabada en su superficie o codificada en su orientación. En algunos casos, una muestra de unos pocos átomos de un objeto puede revelar qué edad tiene. Por ejemplo, medidas del número de átomos de carbono-14 conservados en un material tal como madera o hueso, proporcionan muchas de las mejores fechas para lugares arqueológicos. Puesto que estas dataciones mediante carbono-14 no requieren documentos históricos, pueden utilizarse en objetos miles de años más viejos que los primeros registros escritos, lo que permite a los arqueólogos explorar temas tales como el origen de la agricultura y los primeros habitantes del Nuevo Mundo. Al mismo tiempo, los datos del carbono-14 han ayudado a los científicos a comprender mejor los cambios en el clima de la Tierra a lo largo de milenios, e incluso han revelado cambios a largo plazo en la superficie del Sol.

Las herramientas y procedimientos utilizados para extraer datos cronológicos de átomos como el carbono-14 empezaron a desarrollarse en los años cuarenta del siglo pasado y han seguido mejorándose y refinándose hasta hoy. De hecho, como veremos en los capítulos siguientes, arqueólogos y otros investigadores siguen teniendo a menudo interesantes y vivos debates acerca de cómo obtener e interpretar mejor las fechas del carbono-14. Sin embargo, a pesar de las interminables controversias sobre los detalles del método y la interpretación de fechas concretas, los principios y la física básica que hay tras la

70 Orígenes

datación por carbono-14 no han cambiado con el paso del tiempo. Quizá por esto, raramente se discute ya con mucho detalle la física que hay detrás de las dataciones por carbono-14, y fenómenos como la desintegración nuclear se suelen tratar con cierta ligereza. Esto resulta desafortunado, porque un examen más detallado revela que gran parte de la potencia y las limitaciones de la datación por carbono-14 deriva de principios fundamentales de la física moderna. De hecho, este método de datar restos arqueológicos se basa tanto en el extraño mundo de la mecánica cuántica como en la famosa ecuación de Einstein $E=mc^2$.

Sección 4.1: Las semividas de los núcleos atómicos

La razón básica por la que la datación por carbono-14 resulta tan poderosa es que explota procesos que suceden en el interior profundo de los átomos individuales. Todos los átomos están compuestos de un núcleo compacto formado de protones con carga positiva y neutrones neutros, rodeados por una nube relativamente difusa de electrones con carga negativa. Los átomos pueden intercambiar o compartir electrones con bastante facilidad, de modo que las propiedades químicas de un átomo dependen básicamente de cuántos electrones tiene. Por el contrario, el núcleo está tan profundamente enterrado en el átomo que no participa directamente en interacciones con otros átomos, salvo en circunstancias muy extremas. Esto significa que el estado del núcleo no se ve normalmente afectado por su entorno químico, y las propiedades intrínsecas de un átomo están determinadas en última instancia por el número de protones y neutrones que tiene.

La carga positiva del núcleo es responsable de mantener en su lugar a los electrones con carga negativa, de modo que el número de protones determina la configuración de los electrones ligados al átomo en una situación particular. Los átomos con el mismo número de protones tienen la misma química, y por lo tanto se clasifican como átomos del mismo elemento. Los átomos con 6 protones son formas del elemento carbono, los átomos con 7 protones son formas del nitrógeno, y así sucesivamente.

Átomos con el mismo número de protones pueden tener diferente número de neutrones en sus núcleos. Puesto que los neutrones son neutros, éstos no cambian la carga del núcleo y tienen poca influencia en la química del átomo. Los átomos que tienen el mismo número de protones pero diferente número de neutrones se denominan *isótopos* de un elemento. Por ejemplo, la mayor parte del carbono tiene 6 protones y 6 neutrones y se denomina carbono-12, mientras que el carbono-14 es un isótopo con 6 protones y 8 neutrones. Los diferentes isótopos del mismo elemento pueden distinguirse entre sí porque los átomos con más neutrones tienen masas mayores. Por ejemplo, el carbono-14 tiene una masa mayor que el carbono-12.

La configuración de protones y neutrones en un átomo determina también la estabilidad del núcleo. Muchos isótopos, como el carbono-12, son completamente estables, lo que significa que nunca se transforman en otro isótopo o elemento de manera espontánea. Otros, como el carbono-14, pueden transformarse —o desintegrarse— espontáneamente en otro tipo de átomo. Estas transformaciones están mediadas por alguna de las mismas fuerzas que mantienen unido el núcleo. Diversos experimentos han puesto de manifiesto que estas fuerzas nucleares actúan en un rango de distancias extremadamente corto, de modo que para que dos núcleos puedan interactuar a través de dichas fuerzas deben estar casi en contacto. En la Tierra, los núcleos casi nunca están tan próximos porque todos están cargados positivamente y se repelen mutuamente. Esto significa que la forma y el momento en que se desintegran es casi completamente independiente de sus condiciones ambientales, lo que les hace especialmente útiles para medir el paso del tiempo.

Incluso si la estabilidad y el tiempo de vida de un núcleo dependen sólo del número de protones y neutrones que contiene, las reglas que determinan si un núcleo se transforma y cuándo lo hace no son simples. Por ejemplo, aunque lo habitual es que un mayor número de neutrones potencie las fuerzas que mantienen unido el núcleo, los dos neutrones extra en el carbono-14 le hacen realmente menos estable que el carbono-12 ordinario. Existe un modelo complicado que describe las interacciones relevantes entre las partículas en el núcleo, pero no necesitamos saber todos estos escabrosos detalles para establecer que el carbono-12 es

72 Orígenes

estable y el carbono-14 no lo es. En su lugar, podemos utilizar simplemente la famosa ecuación de Einstein, $E=mc^2$.

Esta fórmula codifica uno de los conceptos más importantes de la física moderna. Nos dice que hay una energía bien definida E asociada con cualquier objeto masivo, y que la energía es simplemente la masa m multiplicada por un factor c^2 , una constante igual a la velocidad de la luz al cuadrado. Esta relación entre masa y energía era un concepto revolucionario porque en la física clásica pre-Einstein masa y energía eran cosas muy diferentes. La masa es una cantidad intrínseca de un objeto que determina cómo responde a fuerzas externas. Sometido a un mismo empuje, un objeto con menos masa se moverá más rápidamente que un objeto con más masa. La energía, por el contrario, no es necesariamente intrínseca a un objeto: puede cambiar de forma y puede transferirse de un sistema a otro. La característica definitoria de la energía es que se conserva, lo que significa que no puede crearse ni destruirse. Una forma básica de energía es la energía cinética o energía de movimiento: cuanto más rápido se mueve algo, más energía cinética tiene. La naturaleza mutable de la energía significa que todas las demás formas de energía pueden interpretarse como un potencial para crear movimiento. La ecuación $E=mc^2$ postula que cualquier objeto masivo contiene un reservorio de «masa-energía» que puede convertirse en otras formas de energía si se puede cambiar la masa del objeto.

Tales cambios en la masa desempeñan un papel importante en la física de los núcleos atómicos. Por ejemplo, un núcleo de carbono-12 ordinario contiene 6 protones y 6 neutrones, pero la masa del núcleo es aproximadamente un 1 % menor que la masa combinada de las 12 partículas por separado. Aunque esta discrepancia es difícil de entender en términos clásicos, donde la masa es una propiedad intrínseca de la materia, desde la perspectiva de Einstein significa simplemente que el núcleo tiene menos masa-energía que sus partes componentes. Por consiguiente, necesitamos añadir energía al núcleo para descomponerlo en una docena de protones y neutrones aislados. Sin esta energía adicional, el núcleo nunca se separará de esta manera, y puesto que las interacciones típicas entre el núcleo y sus electrones u otros átomos no pueden proporcionar en ningún caso una energía suficiente para divi-

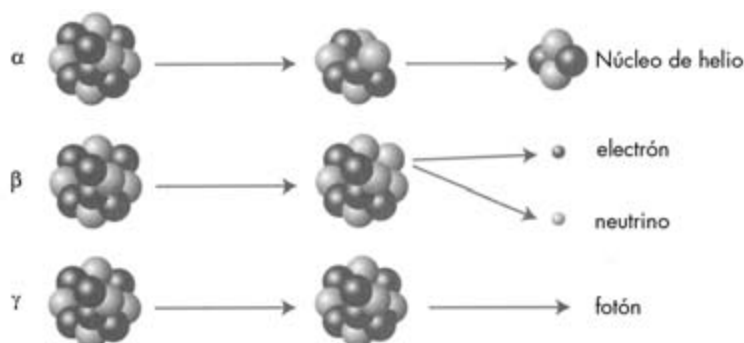


FIGURA 4.1. Los tres tipos de desintegración nuclear. A la izquierda tenemos núcleos hechos de protones (círculos grises) y neutrones (círculos negros). Estos núcleos se desintegran de diferentes maneras. Arriba tenemos una desintegración alfa, en la que el núcleo se divide en dos partes, una de las cuales está compuesta normalmente por 2 protones y 2 neutrones —un núcleo de helio—. En el centro tenemos una desintegración beta, en la que un neutrón se transforma en un protón y emite un electrón y un neutrino. Abajo tenemos una desintegración gamma, en la que el núcleo emite un fotón.

dir el núcleo, este proceso casi nunca ocurre en la Tierra. El caso es que la masa de un núcleo de carbono-12 es menor que la masa de cualquier otra combinación de 6 protones y 6 neutrones, de modo que no hay forma de que el núcleo pueda descomponerse en fragmentos sin una fuente de energía externa.

Sin embargo, en el mundo real un núcleo no tiene que deshacerse simplemente en fragmentos. De hecho, los núcleos pueden desintegrarse de tres maneras diferentes, que se ilustran en la Figura 4.1. El proceso más simple se conoce como desintegración alfa, en la que el núcleo se divide en dos partes. Esta desintegración da típicamente un núcleo de helio-4, compuesto por 2 protones y 2 neutrones. También existe la desintegración beta, que ocurre cuando un neutrón del núcleo se convierte en un protón. Este proceso requiere la emisión de un electrón y de un neutrino —una partícula neutra y de masa casi nula—. También hay variantes de este proceso, como cuando un protón se convierte en un neutrón, pero la física nuclear que hay detrás de todas ellas es básicamente la misma. La desintegración gamma, por otra

74 Orígenes

parte, ocurre cuando el núcleo emite un fotón, una partícula de luz. Nunca se han observado otros tipos de desintegraciones —como sería la simple desaparición de un neutrón de un núcleo— y sólo las desintegraciones de tipo alfa y beta pueden alterar el número de protones y neutrones del núcleo. Esto significa que sólo estos dos procesos cambian un elemento en otro.

El carbono-12 es estable porque no puede sufrir desintegración alfa ni beta espontáneamente. Un núcleo de carbono-12 es menos masivo que cualquier otra combinación de 6 protones y 6 neutrones, de modo que si sufriera desintegración beta, la masa-energía del núcleo aumentaría. Del mismo modo, el núcleo tendría que ganar masa-energía después de sufrir una desintegración beta porque el carbono-12 es ligeramente menos masivo que un átomo con 7 protones y 5 neutrones. Por lo tanto, para que se dé cualquiera de estos procesos se requiere una fuente de energía externa, y por lo tanto no suceden nunca salvo en condiciones muy especiales.

Por el contrario, el carbono-14 es inestable y puede desintegrarse espontáneamente. El carbono-14 no sufre desintegración alfa porque, como el carbono-12, es menos masivo que los dos núcleos que se producen en dicha transformación. Sin embargo, la desintegración beta sí es posible. Un núcleo de carbono-14 contiene 6 protones y 8 neutrones, y si uno de los neutrones se convierte en un protón, entonces tenemos un isótopo común del nitrógeno, el nitrógeno-14, que tiene 7 protones y 7 neutrones. El nitrógeno-14 es menos masivo que el carbono-14 —alrededor de una parte por 100.000—, de modo que no hace falta suministrar ninguna energía al núcleo para que se produzca la transformación. Por lo tanto, esta transformación puede suceder y sucede espontáneamente, con la mayor parte del exceso de masa-energía convertido en movimiento del electrón y el neutrino emitidos por el neutrón que se desintegra.

Puesto que la desintegración del carbono-14 sólo implica al propio núcleo, el tiempo que tarda el núcleo en cambiar a nitrógeno-14 es independiente de su entorno. Ésta es, una vez más, la razón por la que el carbono-14 y otros núcleos inestables son medidores de tiempo tan poderosos. Pero aunque es cierto que el número de protones y el de neutrones controlan cuánto tiempo tardará un núcleo en desintegrarse,

esto no significa que todos los núcleos con el mismo número de protones y neutrones duren el mismo tiempo. Por ejemplo, incluso si todos los núcleos de carbono-14 contienen el mismo número de partículas, no todos se desintegran al cabo de, digamos, 6.000 años. Algunos núcleos de carbono-14 sólo duran unos pocos años, y otros sobreviven durante decenas de miles de años.

A pesar de estas variaciones en el tiempo de vida de los núcleos individuales, los grupos de átomos inestables se desintegran de una manera predecible con una escala de tiempo característica conocida como semivida. En el caso del carbono-14 la semivida es de unos 5.700 años. Esto significa que si tenemos una muestra de carbono-14 puro, entonces al cabo de 5.700 años (una semivida) la mitad de los átomos del carbono-14 se habrá desintegrado dando nitrógeno. Al cabo de otros 5.700 años se habrá desintegrado la mitad de la mitad restante, lo que deja una cuarta parte de los núcleos originales, y así una y otra vez. Este comportamiento altamente regular, que se ilustra en la Figura 4.2, es muy útil para la datación. Esta pauta también parece tan simple que es fácil darla por supuesta, pero, en realidad, se trata de un fenómeno muy extraño.

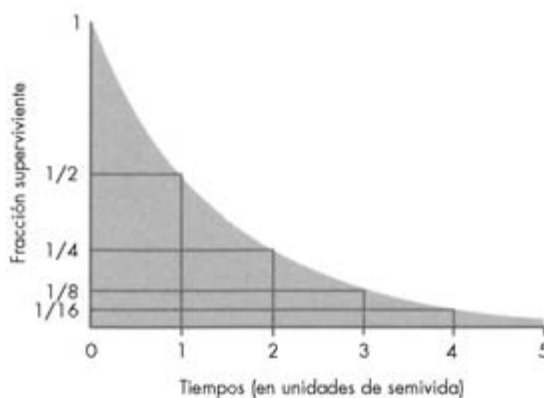


FIGURA 4.2. Curva de desintegración que muestra la fracción de material no desintegrado en función del tiempo, medida en unidades de semivida. Al cabo de una semivida, la mitad del material se ha desintegrado. Al cabo de otra semivida, la mitad de la mitad restante se ha desintegrado, lo que deja una cuarta parte, y así sucesivamente.

76 Orígenes

Las fuerzas que mantienen unidos los núcleos son muy intensas y tienen un alcance muy limitado, así que esperamos que la transformación de cualquier núcleo dado no dependerá en modo alguno de sus entornos. Por lo tanto, estas transformaciones deberían ser una colección de sucesos independientes. De algún modo el comportamiento regular observado emerge de estos sucesos, y no es en absoluto obvio cómo podría ocurrir esto. Ciertamente hay muchas situaciones en las que una serie de sucesos independientes produce resultados simples. Cada lanzamiento de una moneda es un suceso independiente, pero al cabo de muchos lanzamientos de monedas emerge una pauta: la mitad de las veces sale cara. Sin embargo, los físicos sospechan con firmeza que algo más que el mero azar está influyendo en cómo se desintegra el carbono-14, porque la curva que se muestra en la Figura 4.2 tiene una forma particular que aparece en otros sistemas y refleja con frecuencia un aspecto fundamental de la física implicada.

Las implicaciones de esta forma de curva se ilustran mejor con un ejemplo más prosaico. Imaginemos que tenemos un recipiente lleno de agua con una espita en su base, como se muestra en la Figura 4.3. El peso total del agua en el recipiente presiona sobre la espita, lo que hace que el agua fluya rápidamente. A medida que desciende el nivel del agua en el recipiente, la presión sobre la espita es menor y el flujo de agua que sale del tanque se reduce. Supongamos que inicialmente el recipiente tiene un litro de agua y al cabo de un segundo ha salido medio litro de agua de él. El recipiente está entonces medio lleno al cabo de un segundo. Puesto que la cantidad de agua en el recipiente se ha dividido por dos, la presión que fuerza al agua a pasar por la espita también se ha dividido por dos, lo que significa que la velocidad de salida del agua será la mitad de la que era originalmente. La cantidad de agua que sale del recipiente durante el segundo siguiente es, por consiguiente, la mitad de la que salió el segundo anterior: un cuarto de litro. Esto deja un cuarto de litro en el recipiente, o la mitad del volumen que había el segundo anterior. A medida que continúa este proceso, la cantidad de agua se reduce a la mitad cada segundo. Por consiguiente, el volumen de agua en el recipiente tiene una «semivida» de un segundo.

Este sistema manifiesta una semivida porque la velocidad del flujo de agua que sale del tanque es directamente proporcional a la cantidad

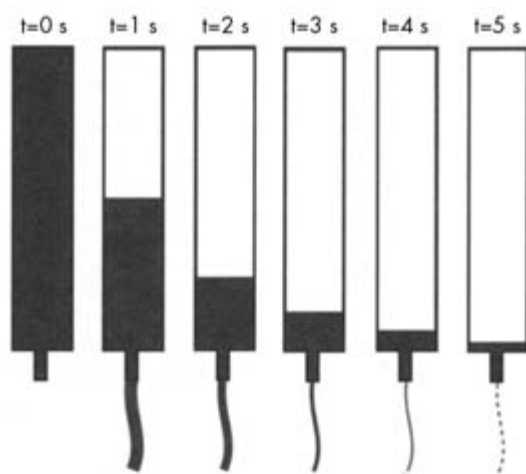


FIGURA 4.3. Sistema en física clásica con una semivida. Esta serie de imágenes muestra un tanque con agua en una serie de instantes. En $t=0$ s se abre una válvula en el fondo del tanque y el agua sale presionada por el peso del material en el tanque. Inicialmente, el ritmo del flujo es alto, pero a medida que descende la cantidad de material en el tanque, el flujo se hace más lento. Las imágenes nos muestran que la cantidad de agua que queda en el tanque tiene una semivida (compárese con la Figura 4.2).

de agua en el tanque. De hecho, cualquier sistema en el que la velocidad de cambio de una variable es proporcional a la propia variable tendrá una semivida bien definida, y viceversa. Puesto que la desintegración de núcleos inestables tiene una semivida, la velocidad a la que se transforman los núcleos debe ser proporcional al número de núcleos que quedan. Si la desintegración nuclear fuera un fenómeno colectivo, esto no sería tan extraño, pues podríamos postular que había una especie de interacción entre núcleos que les hace desintegrarse más rápidamente cuando están en grandes grupos. Sin embargo, no es así como funciona la desintegración nuclear. Incluso si ignoramos la evidencia experimental de que las fuerzas nucleares relevantes son de un alcance extremadamente corto, el hecho de que la semivida de los núcleos de carbono-14 es siempre 5.700 años hace muy improbable que las interacciones entre núcleos puedan estar influyendo en la velocidad de desintegración. Si existieran tales interacciones, habría razo-

78 Orígenes

nes para pensar que podríamos cambiar la velocidad de desintegración y la semivida concentrando más los núcleos o mezclándolos con algún otro tipo de núcleos inestables. Nunca se ha observado que la semivida del carbono-14 varíe de esta forma, de modo que la desintegración de cualquier núcleo dado puede considerarse legítimamente un suceso independiente.

Si cada núcleo se desintegra por separado, entonces la variable con una semivida debe ser intrínseca a cada núcleo individual. Sin embargo, el núcleo no cambia poco a poco de carbono-14 a nitrógeno-14, sino que se transforma de golpe. Por lo tanto, el propio suceso de desintegración no puede tener una semivida. De hecho, si se observa una semivida para una colección de núcleos es porque diferentes núcleos se desintegran en diferentes momentos, y la probabilidad de que un núcleo dado se haya desintegrado sigue una curva como la que se muestra en la Figura 4.2. Cada núcleo tiene una probabilidad de 0,5 de desintegrarse durante los primeros 5.700 años, y si sobrevive a este período tiene de nuevo una probabilidad de 0,5 de hacerlo en otros 5.700 años. Por eso es más exacto decir que es la *probabilidad* de que la transformación no haya sucedido todavía la que tiene una semivida.

Si esto es cierto, entonces la probabilidad de que la desintegración no haya sucedido todavía desempeña un papel similar al de la cantidad de agua en el tanque en nuestro ejemplo anterior. Del mismo modo que la semivida en dicha situación surgía debido a que el flujo de agua era proporcional al nivel del agua en el recipiente, aquí la velocidad de cambio de la probabilidad debe ser proporcional a la probabilidad de que la desintegración no haya sucedido todavía. En otras palabras, un núcleo con más probabilidad de ser carbono-14 en un instante dado tiene más probabilidad de transformarse en los próximos cien años que un núcleo con una probabilidad menor de ser carbono-14. Por consiguiente, la probabilidad no sólo cuantifica la posibilidad de que suceda la desintegración, sino que también parece desempeñar un papel activo en determinar cuándo podría suceder la transformación. Esta extraña situación es un buen ejemplo de un fenómeno mecano-cuántico.

La mecánica cuántica tiene reputación de ser una teoría «extraña», pero en realidad proporciona un procedimiento perfectamente razonable, aunque no intuitivo, para resolver muchos problemas de física.

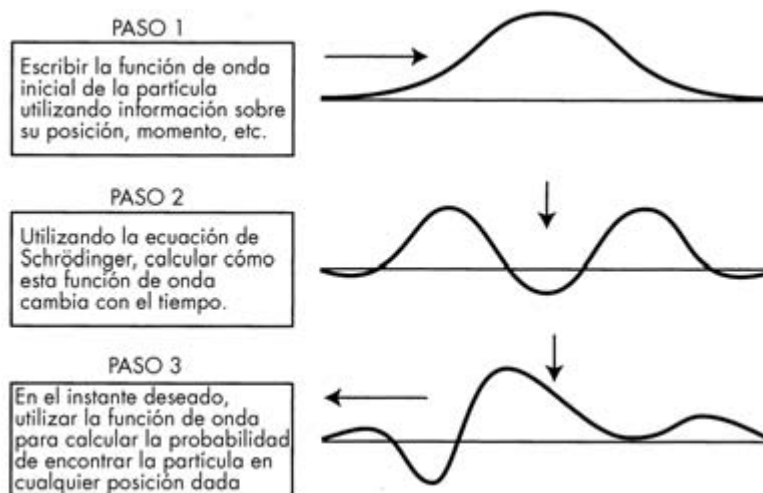


FIGURA 4.4. El procedimiento habitual de los problemas mecano-cuánticos. Puede utilizarse un procedimiento similar para calcular la probabilidad de que un núcleo de carbono se haya desintegrado al cabo de una cantidad de tiempo dada.

Por ejemplo, pongamos que tenemos una partícula en una posición bien definida en un instante inicial dado y queremos saber dónde estará diez segundos después. La manera más obvia de resolver este problema es tomar la posición y la velocidad inicial de la partícula, y luego calcular la trayectoria de la partícula durante los diez segundos siguientes, teniendo en cuenta cualquier fuerza a la que pudiera estar sometida durante su viaje. Este método es muy razonable y funciona bastante bien en situaciones en las que la incertidumbre en la trayectoria y en la posición final de la partícula es pequeña. Sin embargo, este procedimiento suele fallar con partículas subatómicas porque —incluso si son liberadas desde un mismo punto de partida en un mismo entorno— pueden encontrarse en muchas localizaciones diferentes al cabo de algún tiempo. En esta situación, necesitamos un procedimiento diferente para determinar dónde es probable que acabe la partícula, procedimiento que proporciona la teoría de la mecánica cuántica.

La aproximación mecano-cuántica a este tipo de problemas (ilustrada en la Figura 4.4) empieza con el cálculo de la *función de onda*

80 Orígenes

basado en la información sobre la posición y la velocidad inicial de la partícula. La función de onda describe la probabilidad de que la partícula esté en un punto dado, y hay ecuaciones que nos dicen exactamente cómo cambia esta función de onda con el tiempo, lo que nos permite calcular cuál es la función de onda al cabo de diez segundos. Esta función de onda final nos da entonces la probabilidad de que la partícula se encuentre en una posición dada o se mueva en una dirección dada.

Los modelos mecano-cuánticos dan resultados que encajan con los experimentos, de modo que es una teoría física perfectamente válida. Sin embargo, hay algunas cuestiones conceptuales obvias relacionadas con este procedimiento. Por ejemplo, aunque podemos calcular exactamente cómo evolucionará la función de onda entre sus estados inicial y final, la función de onda final sólo da la probabilidad de encontrar la partícula en diferentes posiciones. El proceso por el que esta probabilidad se transforma en la posición real y concreta de la partícula cuando es medida en un experimento particular todavía no está perfectamente entendido.

Una discusión completa de las sutilezas de la mecánica cuántica está fuera del alcance de este libro, pero incluso la breve introducción dada aquí proporciona algunas ideas de la física que hay tras la desintegración nuclear. De la misma manera que podíamos construir una función de onda y calcular la probabilidad de que una partícula se mueva en una dirección u otra en el curso de diez segundos, podemos construir una función de onda que dé la probabilidad de que un núcleo de carbono-14 se haya desintegrado al cabo de un año, cien años, 1.000 años o un millón de años. A medida que evoluciona la función de onda, descende la probabilidad de que el núcleo sobreviva como carbono-14 y aumenta la probabilidad de que el núcleo se transforme en nitrógeno-14. Como sucedía con la salida de agua del recipiente, el flujo de la función de onda entre estos dos estados tiene una semivida, que está completamente determinada por la dinámica del propio núcleo. Este flujo y reflujo de la función de onda significa que la probabilidad de que un núcleo dado sobreviva durante una cantidad de tiempo dada tiene una semivida bien definida determinada por el número total de protones y neutrones en el núcleo. Por lo tanto, todos los

núcleos de una colección de núcleos de carbono-14 tienen la misma probabilidad de desintegrarse en tiempos diferentes, y la fracción de núcleos que sobrevive tiene una semivida bien definida.

Sección 4.2: Contadores Geiger y espectrómetros de masas

Es evidente que los núcleos inestables como los del carbono-14 pueden ser herramientas poderosas para medir el paso del tiempo. Puesto que fenómenos mecano-cuánticos que ocurren en el interior profundo de los átomos individuales determinan cuándo se desintegran los núcleos, podemos contar el contenido de carbono-14 de cualquier objeto aislado que se está dividiendo por dos cada 5.700 años. Sin embargo, para explotar este simple comportamiento y utilizar estos núcleos como medidores de tiempo necesitamos determinar el contenido de carbono-14 de un objeto en dos instantes de tiempo. Sólo después de hacer esto podemos calcular cuánto carbono-14 se ha desintegrado y, con ello, el tiempo transcurrido. En la práctica, los investigadores casi siempre toman el presente como uno de estos períodos de tiempo, porque el contenido actual de carbono-14 de los objetos puede medirse directamente.

Determinar el contenido de carbono-14 de artefactos antiguos es una tarea bastante difícil. En un típico objeto datable, tan sólo un átomo a lo sumo de cada billón de átomos de carbono está en forma de carbono-14. Estos átomos de carbono-14 tienen esencialmente la misma química que los otros isótopos de carbono, de modo que no pueden ser aislados mediante técnicas químicas estándar. En su lugar, los escasos átomos de carbono-14 deben ser contados e identificados sobre la base de sus propiedades físicas distintivas: sus masas más grandes y su radioactividad.

Cuando Willard Libby y sus colegas desarrollaron inicialmente la datación por carbono-14 en los años cuarenta del siglo pasado, se basaron en la radioactividad de estos núcleos inestables. Cada vez que se desintegra un átomo de carbono-14 emite un electrón, que puede ser detectado si pasa por un contador Geiger. Para asegurar que el electrón procede del carbono-14 del objeto y no de algún otro elemento radioactivo, la

82 Orígenes

muestra debe ser procesada y purificada para aislar el carbono. También se necesita un cuidadoso apantallamiento y detectores adicionales para identificar y excluir partículas procedentes de fuentes externas.

Este método de desintegración radiactiva permitió a Libby y otros medir el contenido de carbono-14 de diversos objetos y fue suficiente para demostrar que podía utilizarse el carbono-14 para medir la edad (véase más abajo). Sin embargo, este método tiene serias limitaciones. Para obtener una medida precisa del contenido de carbono-14 de una muestra dada tenemos que observar aproximadamente mil desintegraciones. Puesto que la semivida del carbono-14 es de miles de años, sólo una pequeña fracción, un 0,01 %, de los átomos de carbono-14 de la muestra se desintegra en menos de un año. Esto significa que necesitamos diez millones de átomos de carbono-14 en la muestra para obtener una estimación razonable del contenido de carbono-14, e incluso así tendríamos que esperar todo un año. Así pues, este método es bastante ineficiente, y también requiere cantidades relativamente grandes (1 gramo) de carbono para que funcione.

Hoy día pueden datarse pequeñas muestras de material utilizando una técnica llamada espectrometría de masas, que utiliza campos electromagnéticos para separar átomos por su masa (véase Figura 4.5). Átomos individuales son liberados de la muestra e ionizados añadiendo o eliminando electrones de cada átomo. Estos átomos tienen una carga neta, de modo que pueden ser atraídos hacia placas metálicas con carga opuesta. Una rendija en las placas permite a los átomos pasar al otro lado. Entonces entran en un campo magnético. Las partículas cargadas en movimiento generan campos magnéticos (como sucede en un electroimán) y también responden a campos magnéticos externos. La carga y la velocidad del ion determinan la intensidad de la fuerza que experimenta en el campo magnético, y la masa del átomo determina cuánto se mueve en respuesta a esta fuerza. Por lo tanto, átomos con masas diferentes siguen trayectorias diferentes a través de los campos magnéticos, lo que permite que los diferentes átomos sean identificados, aislados y contados.

Los espectrómetros de masas estándar son aparatos de mesa que se utilizan para medir los constituyentes principales de diversos materiales. Sin embargo, para medir con precisión la cantidad extremada-

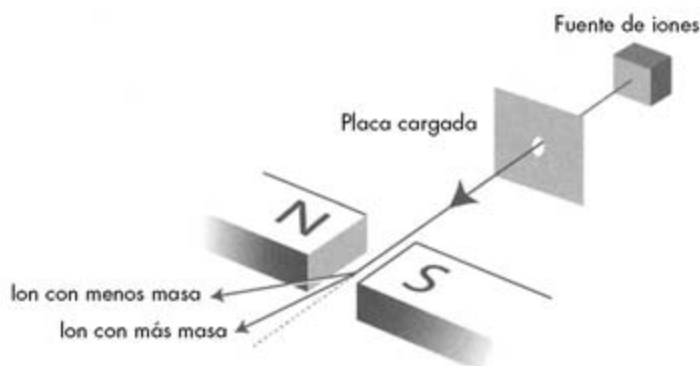


FIGURA 4.5. La idea básica de la espectrometría de masas. Iones generados a partir de la muestra son atraídos y acelerados por una placa cargada. Un orificio en esta placa deja pasar los iones hacia un campo magnético (aquí indicado esquemáticamente entre polos magnéticos norte y sur), que desvía los iones. Los iones más masivos se desvían menos, de modo que pueden separarse iones con masas diferentes.

mente pequeña de átomos de carbono-14 en una muestra típica se requiere un tipo especial de espectrometría de masas, llamado espectrometría de masas con acelerador, o AMS («accelerator mass spectrometry»). Ésta utiliza varias fases de aceleración e ionización, además de varios imanes para separar limpiamente el carbono-14 de todos los demás átomos y moléculas posibles. Las máquinas necesarias para hacerlo son grandes mamotretos que ocupan edificios enteros, y sólo existen en instalaciones especializadas en una media docena de lugares en Estados Unidos y unas dos docenas de otros lugares en el resto del mundo.

La mayor ventaja de la AMS es que permite contar todos los átomos de carbono-14 en una muestra, y no sólo los que casualmente se desintegran, de modo que este método puede utilizarse con muestras de tamaño tan pequeño como 1 miligramo. Esto significa que pueden analizarse artefactos sin causarles muchos daños, y que incluso objetos con pequeñas cantidades de carbono (como barras de acero) pueden ser datados teóricamente por carbono-14.

Sección 4.3: El origen y el nivel original de carbono-14 en los seres vivos

Es importante recordar que la cantidad actual de carbono-14 en un objeto nos proporciona sólo la mitad de la información que necesitamos para calcular su edad. Por ejemplo, supongamos que encontramos un trozo de madera procedente de un antiguo hogar de leña. Este material contiene 10 microgramos de carbono-14. Podemos inferir que este objeto, si existía hace 5.700 años, tenía 20 microgramos de carbono-14, y si existía hace 11.400 años, tenía 40 microgramos de carbono-14. Sin embargo, no podemos determinar cuándo se hizo exactamente el hogar. Para averiguarlo, tenemos que conocer el contenido de carbono-14 de la madera cuando se encendió el fuego. Se necesitaría una máquina del tiempo para poderlo medir directamente, pero podemos estimar el contenido de carbono-14 de la madera cuando era parte de un árbol vivo.

Árboles, hierbas, cebras, leones, personas y todo tipo de seres vivos están intercambiando constantemente átomos de carbono entre sí y con la atmósfera. Las plantas toman dióxido de carbono de la atmósfera y utilizan la fotosíntesis para convertir este gas en azúcares, hojas, raíces y tallos. Cuando los animales comen plantas o a otros animales, parte de este material se metaboliza para dar energía, lo que produce el dióxido de carbono que exhalan todos los animales. Del mismo modo que los átomos de carbono están fluyendo constantemente entre plantas, animales y la atmósfera, todos éstos están intercambiando también carbono-14. Puesto que las propiedades químicas del carbono-14 son casi idénticas a las de todos los demás átomos de carbono, este intercambio constante de material distribuye el carbono-14 por todo el ecosistema (Figura 4.6). Por consiguiente, todos los animales y plantas que viven en la Tierra en una misma época contienen aproximadamente la misma mezcla de isótopos de carbono que se encuentra en la atmósfera en dicha época. Si el contenido de átomos de carbono-14 en la atmósfera hubiera permanecido constante en el curso de los años, entonces la fracción de átomos de carbono en forma de carbono-14 sería la misma para organismos que vivieron en el pasado que para los organismos que viven hoy.

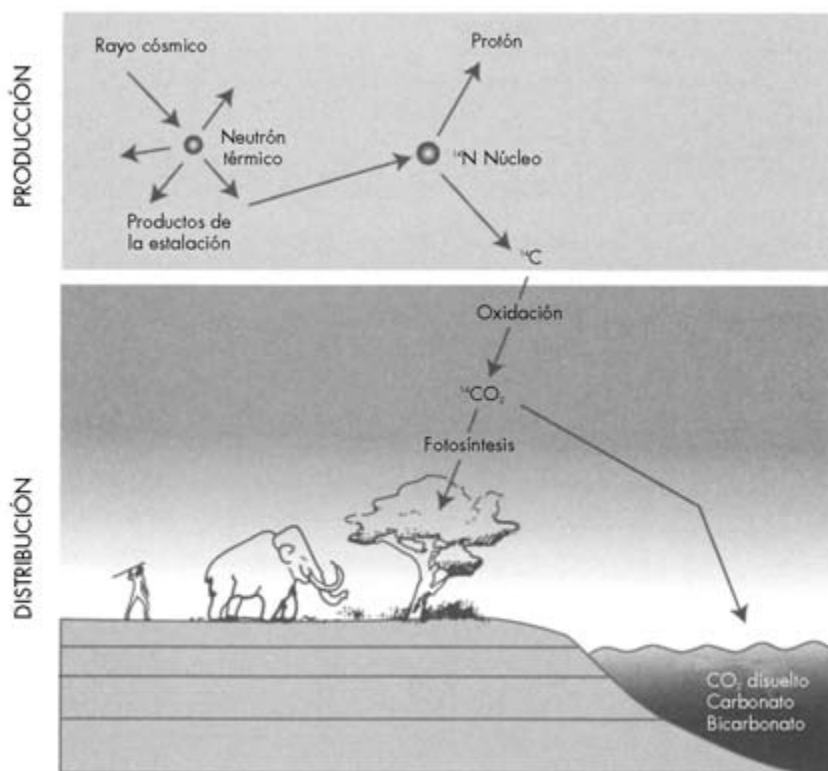


FIGURA 4.6. Un resumen de cómo se produce el carbono-14 y pasa a la atmósfera y a varios organismos vivos. Basado en R. E. Taylor, *Radiocarbon Dating* (Academia Press, 1987), Figura 1.1.

Hay buenas razones para esperar que el contenido de carbono-14 de la atmósfera no haya cambiado demasiado con el tiempo. Hasta muy recientemente, la mayor parte del carbono-14 de la Tierra fue creado originalmente por rayos cósmicos. (A partir de 1950 hay que tener en cuenta el carbono-14 generado en los ensayos de armas nucleares, pero no tenemos que ocuparnos aquí de esto.) Los rayos cósmicos son núcleos atómicos desnudos (p. ej. átomos sin electrones) que viajan a través del universo a velocidades extraordinariamente altas, en muchos casos próximas a la velocidad de la luz. La fuente de los rayos cósmicos sigue siendo algo incierta. Algunos proceden del Sol, pero la mayoría proceden de fuera del Sistema Solar. Puesto que los rayos có-

86 Orígenes

micos son partículas cargadas, y puesto que hay campos magnéticos en el espacio interestelar, estas partículas son desviadas de las trayectorias rectas como sucede con los iones en un espectrómetro de masas. Por ello los rayos cósmicos siguen trayectorias complicadas y retorcidas entre su fuente y la Tierra, lo que hace muy difícil reconstruir exactamente de dónde vienen. Algunos pueden producirse durante la muerte de estrellas masivas y otros pueden surgir del material que cae en gigantescos agujeros negros. Sin embargo, estas partículas proceden probablemente de objetos astronómicos diversos. De la misma forma que no esperamos que la cantidad total de luz visible de las estrellas haya cambiado mucho durante los últimos miles de años, tampoco esperamos que el flujo total de radiación cósmica cambie con mucha rapidez (véase el capítulo siguiente).

Los rayos cósmicos producen carbono-14 cuando estas partículas colisionan con átomos en nuestra atmósfera. Durante estas colisiones, la enorme energía cinética de los rayos cósmicos es más que suficiente para romper los dos núcleos que colisionan en sus partes componentes. Esta energía es incluso suficiente para generar exóticas partículas subatómicas. Si los rayos cósmicos se están moviendo con suficiente rapidez, los restos de este impacto pueden contener suficiente energía cinética para producir más colisiones violentas, lo que genera un chaparrón de núcleos y partículas subatómicas. Estos residuos nucleares incluyen neutrones libres. Tales neutrones vagan por la atmósfera durante un tiempo y normalmente acaban adheridos al núcleo de uno de los átomos de nitrógeno que llenan la atmósfera. Esto sucede con relativa facilidad puesto que el neutrón no tiene carga, de modo que no es repelido por el núcleo como lo sería un protón. Tras capturar al neutrón, el núcleo resultante tiene 7 protones y 8 neutrones. Este núcleo perturbado es extremadamente inestable y rápidamente escupe un protón, dejando detrás un átomo de carbono-14.

Dado que los rayos cósmicos están reponiendo constantemente el contenido de carbono-14 en la parte superior de la atmósfera, el contenido de carbono-14 del aire y las diversas criaturas vivas puede permanecer constante en el tiempo. Si el nivel de carbono-14 en la atmósfera se ha mantenido constante, el contenido de carbono-14 de los organismos vivos de cualquier tiempo pasado debería ser el mismo

que hoy. Sin embargo, una vez que el organismo muere ya no puede obtener nuevo carbono de la atmósfera, y el carbono-14 que se desintegra ya no es reemplazado. Por ejemplo, supongamos que un fragmento de madera del mismo tamaño y tipo, y contemporáneo del de nuestro antiguo hogar de leña, tiene 20 microgramos de carbono-14, el doble que la muestra antigua. Esto significa que la mitad del carbono-14 en la madera vieja se ha desintegrado desde que dejó de absorber carbono de la atmósfera. Por lo tanto, la madera quemada en el hogar procede de un árbol que murió hace una semivida del carbono-14, aproximadamente 5.700 años. Aunque esto no nos dice exactamente cuándo se encendió el fuego en el hogar, podríamos suponer que la muerte del árbol y la combustión de la madera no estuvieron demasiado separados en el tiempo.

Sección 4.5: Artefactos egipcios y verificación experimental

De todas las ideas en que se basa la datación por carbono-14 antes descrita, la hipótesis más cuestionable es que el contenido de carbono-14 de la atmósfera permanece constante en el tiempo. La velocidad de desintegración del carbono-14 y la distribución de carbono-14 en la biosfera actual pueden verificarse con medidas modernas, pero no es tan sencillo demostrar que no ha habido cambios radicales en el flujo de rayos cósmicos. La única forma de demostrar que el contenido de carbono-14 de la atmósfera era en el pasado aproximadamente el mismo que hoy —y validar el sistema de datación por carbono-14— es medir la fracción de carbono-14 de material orgánico con una edad que ya ha sido bien establecida por otros medios.

Cuando Libby y sus colegas estaban desarrollando inicialmente el método de datación por carbono-14 en los años cuarenta y cincuenta del siglo pasado, midieron el contenido de carbono-14 de varios objetos que estaban datados sobre la base de registros históricos. Muchos de los objetos utilizados en estos estudios procedían de Egipto, porque, como vimos en el capítulo anterior, Egipto posee artefactos extraordinariamente bien conservados y con una historia inusualmente bien documentada. Por ejemplo, se ha recuperado un barco de madera

88 *Orígenes*

de un complejo de tumbas de un faraón egipcio llamado Senusert III, que gobernó durante el Imperio Medio. Por los registros astronómicos de este período (descritos en el último capítulo) sabemos que este barco fue enterrado alrededor del 1840 a.C. Incluso las pirámides del Imperio Antiguo ofrecen material útil. Se utilizaron vigas de madera en una de las cámaras de la Pirámide Acodada de Sneferu, quizá en un intento de impedir que se derrumbaran los muros. En la época de Libby la edad de las pirámides era incierta en uno o dos siglos, pero se sabía que tenían unos 5.000 años, o casi una semivida de carbono-14.

La Figura 4.7 muestra el contenido de carbono-14 medido en este y otros objetos en función del tiempo, junto con una curva que muestra lo que cabría esperar si el contenido de carbono-14 en la atmósfera fuera realmente constante. Los datos medidos encajan muy bien en esta curva. Los artefactos egipcios de la edad de las pirámides, que tienen aproximadamente 5.000 años, tienen ligeramente algo más de la mitad de carbono-14 que el material vivo de la misma edad, mientras que objetos más recientes, como el barco de Senusert, tienen mayores

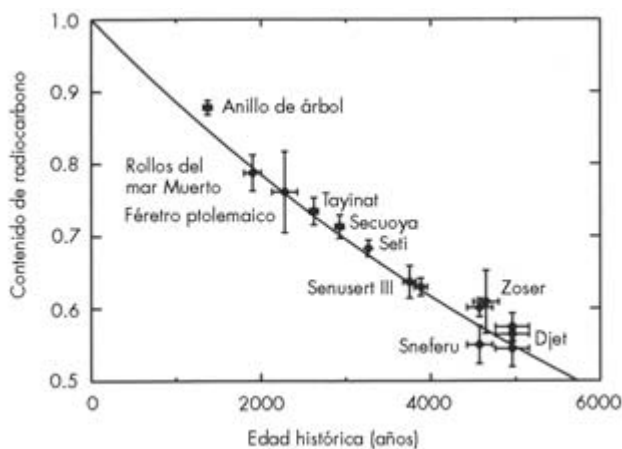


FIGURA 4.7. «Curva de objetos conocidos» que muestra que los objetos más viejos tienen menos actividad de carbono-14. El contenido de radiocarbono es la razón del contenido de carbono-14 en un objeto de edad histórica dada respecto al contenido en materia orgánica viva. Basado en Willard F. Libby, premio Nobel de Química en 1960, <http://nobelprize.org/chemistry/laureates/1960/libby-lecture.html>, Figura 3.

concentraciones de carbono-14. Esta «curva de objetos conocidos» indica así que el método del carbono-14 puede utilizarse para medir la edad de artefactos antiguos, y que el contenido de carbono-14 de la atmósfera no ha sufrido cambios enormes durante los últimos 5.000 años. Sin embargo, esta gráfica también revela algo más. Nótese que los puntos que corresponden a datos más antiguos tienden a estar un poco por encima de la línea, lo que implica que tienen un poco más de carbono-14 de lo esperado.

A medida que las fechas por carbono-14 se hicieron cada vez más precisas y retrocedieron hasta tiempos anteriores a la existencia de registros históricos, se hizo más evidente que, aunque los principios básicos de la datación por carbono-14 son correctos, era necesario modificar el método simple antes esbozado para obtener medidas de edad más exactas. Estos refinamientos son tema del próximo capítulo, que mostrará que hay que tener en cuenta procesos biológicos, arqueológicos, geológicos e incluso astronómicos para entender el potencial pleno de la datación por carbono-14.

Sección 4.5: Lecturas adicionales

Para un repaso general de la datación por carbono-14, incluyendo una corta historia de la obra de Libby, véase R. E. Taylor, *Radiometric Dating* (Academic Press, 1987). Véase también el discurso de la recepción del premio Nobel 1960 de Libby, disponible en <http://nobelprize.org/chemistry/laureates/1960/libby-lecture.html>.

Para una introducción histórica a la física nuclear, consultar G.I. Brown, *Invisible Rays* (Sutton Publishing, 2002).

Para una introducción divulgativa al misterio de la mecánica cuántica, recomendando *In Search of Schrödinger's Cat* (Bantam, 1984) y *Schrödinger Kittens* (Back Bay Books, 1996), y R. P. Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton University Press, 1988).

Para los intrépidos que quieran saber cómo se resuelven realmente problemas de mecánica cuántica de nivel universitario, recomendando D. J. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics* (Prentice Hall, 1995).

90 Orígenes

Una historia de la espectrometría de masas por acelerador puede encontrarse en H. E. Gove, *From Hiroshima to the Iceman* (Institute of Physics, 1999).

Para más detalles sobre la espectrometría de masas, que satisfarán la curiosidad de los más exigentes, véase Claudio Tuniz *et al.*, *Accelerator Mass Spectrometry* (CRC, 1998).

La calibración de las fechas por carbono-14 y la historia del aire

La datación por carbono-14 puede ser un ejemplo clásico de las aplicaciones prácticas de la física nuclear, pero hacer una estimación de la edad a partir de los datos del carbono-14 no es un problema de libro de texto de física, incluso si algunos libros de texto de física a veces pretenden lo contrario. Por ejemplo, durante mi primer año en el Grimell College se me asignó el siguiente problema en mi curso de física moderna (radiocarbono = carbono-14):

La actividad relativa del radiocarbono en un trozo de carbón vegetal procedente de los restos de un antiguo hogar es 0,18 de la de un espécimen contemporáneo. ¿Cuánto tiempo hace que se utilizó el hogar?

Yo sabía cuál era la solución que se esperaba de mí. Suponiendo que el contenido de carbono-14 de la atmósfera permanece aproximadamente constante en todo momento, el contenido de carbono-14 del carbón antiguo debería haber sido originalmente el mismo que el de la muestra contemporánea. Recordemos que el carbono-14 se desintegra con una semivida de unos 5.700 años, lo que significa que la cantidad de carbono-14 en el carbón se divide por dos cada 5.700 años. Puesto que 0,18 está entre un cuarto y un octavo, el carbón debe datar de hace entre dos y tres semividas. En otras palabras, debe tener entre 11.400 y 17.100 años. Utilizando las ecuaciones adecuadas pude obtener una edad más precisa de 14.000 años. Sin embargo, después de hacer los

92 Orígenes

cálculos y escribir el resultado, pensé que no podía dejar así el problema. Yo había seguido algunos cursos de arqueología y sabía que las hipótesis que había detrás de esta respuesta no eran completamente correctas. Así que añadí precipitadamente la siguiente divagación (erratas y pobre gramática incluidas):

Esto dice que el árbol del que se tomó la muestra fue derribado hace unos 14.000 años. Sin embargo, no podemos juzgar esta fecha válida sin un contexto adecuado. ¿Tiene sentido esta fecha comparada con otras fechas del lugar? Pues una única fecha no es muy fiable en estas situaciones. Además, ¿está la muestra contaminada? ¿Podría haber factores que hicieran que la fecha fuera errónea? Además la fecha no ha sido adecuadamente alterada para tener en cuenta **fluctuaciones en los niveles de radiocarbono** de un año a otro. Finalmente, incluso si los factores citados se hubieran tenido en cuenta, sólo sabemos cuándo fue cortado el árbol (cuando dejó de absorber CO₂) y no tenemos idea de cuánto tiempo pudo haber vivido antes de ser utilizado en una hoguera. Por lo tanto, desgraciadamente, no podemos decir cuándo se utilizó el hogar con los pocos datos dados.

Mirando hoy en retrospectiva este confuso y poco coherente párrafo, puedo entender por qué el profesor me aprobó por resolver el problema y declinó comentar mi idea de novato. Incluso así, hay algo de verdad en mi párrafo: necesitamos más información antes de poder medir con precisión la edad del carbón. En concreto, necesitamos determinar el contenido original de carbono-14 en la madera.

La física de la desintegración nuclear asegura que los átomos de carbono-14 en cualquier objeto se desintegrarán continuamente de un modo predecible, pero no hay ningún proceso físico sencillo que garantice que un objeto dado tenía un contenido determinado de carbono-14 cuando formaba parte de un organismo vivo. Afortunadamente, investigaciones en curso sobre los contenidos de carbono-14 de materiales diversos de épocas diferentes han producido datos y procedimientos que ofrecen estimaciones razonablemente fiables del contenido original de carbono-14 de muchos objetos. Esta investigación ha mejorado ciertamente la fiabilidad y la precisión de la datación por carbono-14, y

La calibración de las fechas por carbono-14 y la historia del aire 93

también ha proporcionado algunos beneficios inesperados para climatólogos y astrofísicos.

Un subproducto del esfuerzo durante décadas por refinar la datación por carbono-14 es un registro detallado de los niveles de carbono-14 en la atmósfera durante los últimos 15.000 años. Quizá esto no parezca mucho, pero un incremento de 1-2 % del contenido de carbono-14 en la atmósfera puede ser el débil eco de un cambio importante en las corrientes oceánicas o en la actividad solar. Por lo tanto, tales cambios proporcionan una ventana única a los procesos complejos e interrelacionados que conforman la superficie del Sol y el clima de la Tierra. Por ejemplo, un cambio en los niveles del carbono-14 atmosférico hace 13.000 años proporciona una clave importante para la secuencia de cambios drásticos que se produjeron a finales de la última Edad de Hielo.

Sección 5.1: De fechas brutas a fechas calibradas

El procedimiento estándar para extraer información cronológica del carbono-14 puede dividirse en dos tareas fundamentales: estimar cuánto carbono-14 contenía el objeto cuando era parte de una criatura viva, y determinar cuánto carbono-14 queda hoy en el material. Puesto que el contenido actual de carbono-14 de un objeto puede medirse directamente, la datación por carbono-14 casi siempre empieza por obtener la composición isotópica de una muestra del artefacto. En principio, estos datos podrían presentarse como un número de átomos de carbono-14 en dicha muestra, pero en la práctica las instalaciones de datación computan normalmente una fecha «bruta» o «convencional» por carbono-14 para la muestra. Estas fechas se expresan como un número de años «BP», lo que significaba «Antes del Presente» («Before Present») cuando el presente era 1950. Ahora que este año queda a varias décadas en el pasado, BP se ha reinterpretado con el significado de «Antes de Física» («Before Physics»).

Como en el ejercicio que yo tuve que resolver en la facultad, las fechas convencionales por carbono-14 suponen que el contenido inicial de carbono-14 en el material antiguo era el mismo que el de una

94 Orígenes

muestra de referencia moderna: en concreto, una muestra de ácido oxálico obtenida de un lote de remolachas azucareras cultivadas en Francia en 1950. Como veremos más adelante, estas fechas no proporcionan en general estimaciones precisas de la edad, de modo que hoy sólo se utilizan como una medida estandarizada del contenido de carbono-14. Por esta razón, todas las instalaciones de datación siguen los mismos procedimientos —a veces peculiares— cuando calculan y presentan una fecha convencional por carbono-14. Por ejemplo, consideran que la semivida del carbono-14 es de unos 5.570 años, que es un valor inexacto utilizado por Libby hace varias décadas. Estas convenciones pueden parecer arbitrarias, pero imponen un cierto nivel de consistencia entre fechas por carbono-14.

Las instalaciones de datación también garantizan que diferentes materiales de la misma edad tienen la misma fecha convencional por carbono-14. Lo hacen al tener en cuenta un nuevo fenómeno conocido como fraccionamiento de masa, que permite que diferentes organismos adquieran diferentes mezclas de isótopos de carbono mientras están vivos. Todos los isótopos de carbono tienen el mismo número de protones en el núcleo y la misma configuración de electrones, de modo que tienen propiedades químicas casi idénticas. Sin embargo, diferentes isótopos tienen masas diferentes, de manera que las fuerzas necesarias para mover unos u otros son de diferente intensidad. Los procesos que transportan átomos de carbono de un lugar a otro pueden mover más eficazmente unos isótopos que otros, lo que da lugar a un aumento o una disminución de isótopos más pesados en diferentes posiciones. Esto significa que algunos organismos pueden acumular más carbono-14 en sus cuerpos que otros. Por ejemplo, ciertas plantas, como el maíz, utilizan un proceso de fotosíntesis ligeramente diferente del de otras plantas para absorber carbono de la atmósfera, lo que provoca que las plantas de maíz vivas tengan una fracción de carbono ligeramente más alta (2-3 %) que hojas de árbol o remolachas que han crecido al mismo tiempo. Si olvidamos este fenómeno, la datación por carbono-14 subestimaría la edad de los materiales derivados del maíz.

Los científicos tienen en cuenta los efectos del fraccionamiento de masa midiendo las cantidades relativas de isótopos de carbono estables en la muestra. El carbono más estable, también conocido como

La calibración de las fechas por carbono-14 y la historia del aire 95

carbono-12, tiene 6 protones y 6 neutrones. Sin embargo, aproximadamente un 1 % de los átomos de carbono estables están en la forma de carbono-13, que tiene 7 neutrones. Estos dos isótopos tienen masas ligeramente diferentes, de modo que cualquier proceso que separe los átomos de carbono según su masa no sólo altera la fracción de carbono-14 del material sino que también altera la mezcla de carbono-12 y carbono-13. Las cantidades relativas de carbono-12 y carbono-13 pueden utilizarse entonces para corregir cualquier fraccionamiento de masa que afecte al contenido de carbono-14.

Por ejemplo, supongamos que las remolachas francesas estándar tenían la siguiente mezcla de isótopos: 99 partes de carbono-12, 1 parte de carbono-13 y 0,0000000001 partes de carbono-14. Imaginemos que queremos determinar la edad de un fragmento de una antigua cesta que contiene 98,9 partes de carbono-12, 1,1 partes de carbono-13, y 0,00000000006 partes de carbono-14. La fracción de carbono-14 de la muestra es de unas seis décimas —un poco más de un medio— de la fracción de carbono-14 de las remolachas. Si olvidáramos el fraccionamiento de masa, estimaríamos que la cesta tiene algo menos de una semivida, o unos 5.500 años. Sin embargo, puesto que las remolachas y la cesta tienen diferentes proporciones de carbono-12 y carbono-13, podemos estar seguros de que se ha producido fraccionamiento de masa. Puesto que la cesta tiene un 10 % más del isótopo estable más pesado, también debería haber tenido originalmente más carbono-14 que las remolachas. La diferencia de masa entre el carbono-12 y el carbono-13 es la mitad de la diferencia de masa entre el carbono-12 y el carbono-14, de modo que el fraccionamiento de masa debería ser el doble para el carbono-14. La fracción inicial de carbono-14 de la cesta debería ser por lo tanto un 20 % mayor que la fracción de carbono-14 de las remolachas que vivían en la misma época. Suponiendo que las remolachas entonces y ahora tienen el mismo contenido de carbono-14, la fracción original de carbono-14 de la cesta era 0,0000000000 12 %, exactamente el doble de su contenido actual de carbono-14. Esto significa que debemos revisar nuestra estimación de la edad de la cesta en toda una semivida, o 5.700 años.

Aunque la inclusión de correcciones para el fraccionamiento de masa asegura que diferentes organismos que vivían en la misma re-

96 Orígenes

gión en la misma época tendrán fechas de carbono-14 similares, aún necesitamos determinar a qué corresponde una fecha convencional por carbono-14 en tiempo real. Para conseguirlo necesitamos alguna información adicional sobre el contenido de carbono-14 del aire en el pasado. Como discutimos en el último capítulo, todos los seres vivos obtienen en última instancia su carbono-14 de la atmósfera. Si los niveles de carbono-14 atmosférico han permanecido constantes durante los últimos miles de años, entonces un organismo que viviera en cualquier tiempo en el pasado habría tenido el mismo contenido de carbono-14 que un organismo similar que viva hoy, y las fechas convencionales de carbono-14 darían estimaciones más adecuadas de la edad (suponiendo que utilizamos la semivida correcta). Los datos de Libby de artefactos del Antiguo Egipto muestran que el contenido de carbono-14 de la atmósfera ha sido prácticamente estable durante los últimos miles de años. Además, estas fechas de carbono-14 son algo menores que su edad histórica, lo que sugiere que puede haber habido cambios en la cantidad de carbono-14 en la atmósfera. Si el contenido de carbono-14 de la atmósfera fluctúa, entonces las estimaciones de la edad basadas en fechas convencionales por radiocarbono fallarán. Por ello tenemos que determinar cuál era la composición isotópica del aire en el pasado antes de que podamos utilizar técnicas de datación por radiocarbono para explorar la historia de las gentes o de los animales que respiraron ese aire.

Por fortuna, la historia de los niveles de carbono-14 atmosférico está registrada en los anillos de los árboles, esa pauta familiar de bandas claras y oscuras que pueden verse en cualquier tronco de madera cortada. Este material representa una parte del sistema vascular que lleva el agua desde las raíces hasta las hojas (véase Figura 5.1). Sólo las capas más externas de este tejido conducen líquidos de forma activa, y continuamente se están añadiendo nuevas capas al árbol por debajo de la corteza del tronco. En primavera, cuando crecen nuevas hojas, la demanda de agua es alta y la madera tiene una estructura abierta. A medida que avanza la estación, la necesidad de agua disminuye y el tejido se hace más denso, con menos espacios abiertos para que fluya el agua. Esto continúa hasta el invierno, cuando el árbol puede quedarse inactivo hasta la próxima primavera y el ciclo empie-

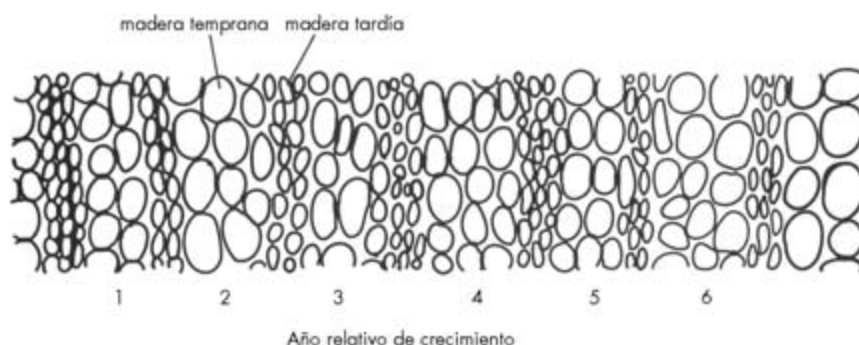


FIGURA 5.1. Anillos de árbol esquemáticos. Cada año, la madera que crece bajo la corteza de un árbol empieza con una estructura abierta para permitir que suba la máxima cantidad de agua desde las raíces a las hojas que crecen. Avanzado el año, el material se hace más denso. Esta pauta se repite anualmente en ambientes templados.

za de nuevo. Cada anillo —consistente en una banda clara y una banda oscura— corresponde así exactamente a un año de crecimiento en un ambiente templado, y podemos determinar la edad de un árbol contando sus anillos.

Si estudiamos estos anillos con más detalle, encontraremos que pueden ofrecer más información además de la edad del árbol. Los anillos de los árboles tienen grosores diferentes dependiendo de cuánto creció el árbol de un año a otro. Puesto que la calidad de la estación de crecimiento depende de las condiciones del clima local, la misma pauta de espesores de los anillos se dará en muchos de los árboles de la misma región. Encajando las pautas de árboles de edades diferentes, los científicos pueden generar un registro continuo de anillos arbóreos y asignar un año concreto a todos y cada uno de los anillos (véase Figura 5.2). Por ejemplo, supongamos que talamos hoy un árbol y examinamos sus anillos. Puesto que sabemos que el anillo más externo corresponde a este año, podemos averiguar exactamente cuándo se ha formado cada anillo del tronco. Si ahora encontramos un segundo tronco procedente de la misma región, podemos tratar de ver si existe en sus anillos una pauta de grosores que encaje con los anillos del primer tronco. Si la hay, entonces sabemos cuándo se formaron los anillos del segundo tronco, incluidos los que se formaron antes de que el

98 Orígenes

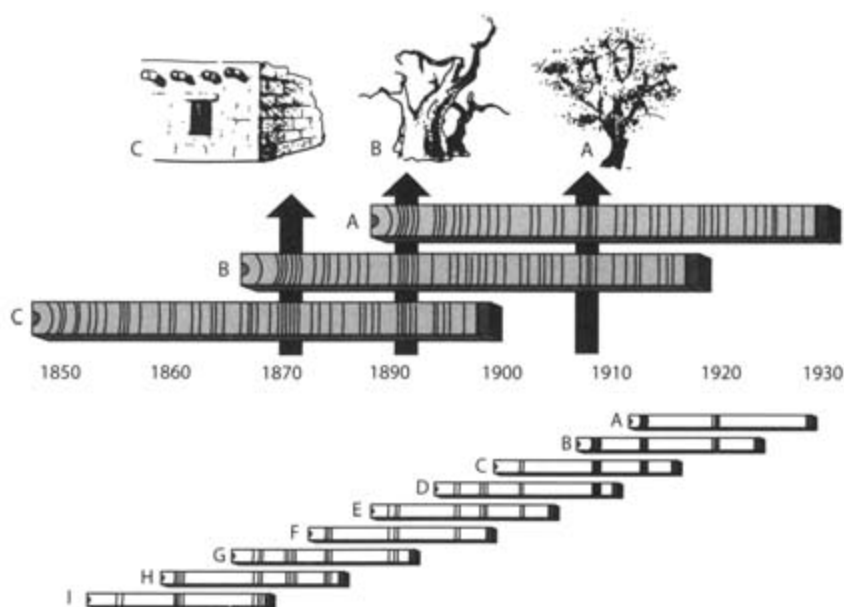


FIGURA 5.2. La idea básica de la dendrocronología (basado en una figura de R. E. Taylor y M. J. Aitken, *Chronometric Dating in Archaeology* [Plenum Press, 1997]). Fragmentos de madera de (A) un árbol vivo, (B) un árbol muerto, y (C) una viga de una casa que se levantó en la misma región revelan pautas en el grosor y espaciado de los anillos de árboles que indican que estos anillos concretos se formaron al mismo tiempo. Ajustando dichas pautas en muchos fragmentos de madera, el registro de anillos de árbol puede extenderse hasta tiempos lejanos en el pasado.

primer árbol existiese siquiera. Repitiendo este procedimiento una y otra vez, se obtienen secuencias de anillos extremadamente largas que se extienden hasta miles de años atrás.

Utilizando troncos procedentes de Alemania, Irlanda y la costa este de Estados Unidos, los investigadores han logrado construir registros continuos de anillos arbóreos que llegan hasta aproximadamente el año 10000 a.C. Otros fenómenos naturales cíclicos, tales como los sedimentos depositados por las fluctuaciones estacionales en los cauces de ríos, pueden proporcionar registros similares que se extienden aún más atrás. Midiendo el contenido de carbono-14 de este material, los científicos pueden relacionar las fechas convencio-

La calibración de las fechas por carbono-14 y la historia del aire 99

nales por carbono-14 con las edades reales. Un consorcio internacional reevalúa con regularidad estos datos y los combina para dar una estimación estándar de la edad real que corresponde a una fecha por radiocarbono concreta. Estos resultados suelen representarse en una gráfica como la de la Figura 5.3, que muestra las fechas convencionales por carbono-14 en función de la edad real. Dicha curva revela inexactitudes en las fechas convencionales por carbono-14 y también proporciona la información necesaria para transformar una medida de carbono-14 en una estimación más adecuada de la edad.

Consideremos un anillo de árbol cuya fracción de carbono-14 es la mitad de la de una muestra contemporánea. La edad bruta de carbono-14 de este anillo indicaría que tiene 5.700 años. Los datos de la Figura 5.3 muestran que un anillo arbóreo con una edad de carbono-14 de 5.700 años procede de aproximadamente el 4500 a.C., y por lo tanto tiene realmente unos 6.500 años.

Puesto que todos los organismos vivos obtienen en definitiva el

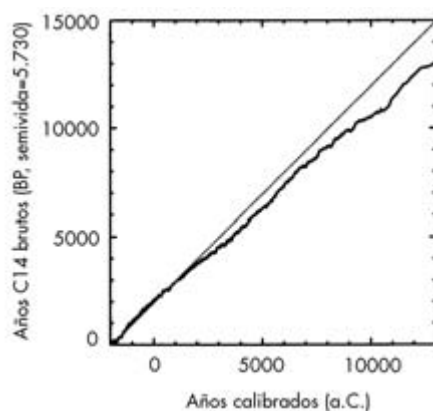


FIGURA 5.3. La curva de calibración para fechas por carbono-14, como era en 2004. Esta curva da la edad por carbono-14 en función de años reales, medidos utilizando datos dendrocronológicos, entre otros. Por simplicidad, las fechas «brutas» se dan utilizando la semivida apropiada en lugar del valor convencional. Si la datación por carbono-14 fuera exacta, entonces los datos caerían sobre la línea recta. De hecho, antes del 2000 a.C., las fechas por carbono-14 convencionales subestiman significativamente la fecha real de los especímenes. Datos obtenidos de www.radiocarbon.org/IntCal04.htm.

100 Orígenes

carbono-14 de la atmósfera, los restos de cualquier organismo que vivió hace 6.500 años deberían tener la misma fecha convencional por carbono-14 que el anillo arbóreo citado (después de tener en cuenta fraccionamiento de masa, etc.). Podemos así utilizar esta curva de calibración para convertir cualquier estimación de edad bruta por carbono-14 en años reales. En principio, todo lo que tenemos que hacer es encontrar la fecha por carbono-14 en el eje vertical del diagrama y trazar una línea horizontal a través de la gráfica (véase Figura 5.4). El lugar en donde la curva de calibración corta a dicha recta da la edad real de la muestra en años. A esta estimación de edad se le llama fecha por carbono-14 calibrada, y suele darse como un número de años «cal

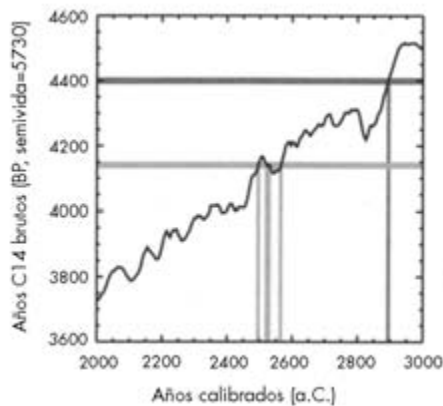


FIGURA 5.4. Utilización de fechas de anillos de árboles para calibrar fechas por carbono-14. Aquí mostramos una pequeña parte de la curva ilustrada en la Figura 5.3. Por simplicidad, las fechas brutas se dan utilizando la semivida apropiada en lugar del valor convencional. Supongamos que obtenemos una fecha por carbono-14 de 4400 BP. Entonces podemos trazar una recta horizontal (gris oscura) a través de la gráfica y encontrar dónde corta a la curva. Luego descendemos hasta el eje horizontal y encontramos la edad de la muestra en años reales, que en este caso es 2900 a.C. Sin embargo, las oscilaciones en la curva de calibración pueden complicar esta estimación. Supongamos que la fecha por carbono-14 bruta era 4140 BP (ilustrada con la recta gris clara); entonces hay tres valores posibles para la edad de la muestra, de modo que incluso si la incertidumbre en la fecha por carbono-14 es de sólo veinte años, la incertidumbre en la edad real de la muestra es de más de cien años.

La calibración de las fechas por carbono-14 y la historia del aire 101

BP» o como una fecha en el familiar sistema a.C./d.C.*

Es importante señalar que las oscilaciones en la curva hacen que a veces la fecha convencional por carbono-14 sea compatible con varias fechas del calendario. En estas situaciones, las diversas posibilidades para la edad de la muestra tienden a amplificar la incertidumbre en la medida de la edad. Por ejemplo, en la Figura 5.4, una incertidumbre de veinte años en la fecha de carbono-14 da una estimación de edad verdadera con una incertidumbre de unos cien años. Esto puede complicar enormemente los esfuerzos por datar con precisión material procedente de ciertos períodos de tiempo.

Sección 5.2: La curva de calibración como un registro histórico

La curva de calibración mostrada en la Figura 5.3 es mucho más que una herramienta útil para los arqueólogos. También conserva un registro detallado del contenido de carbono-14 de la atmósfera. Por ejemplo, los anillos arbóreos de 6.500 años tienen fechas convencionales por carbono-14 de unos 5.700 años, lo que significa que contienen aproximadamente la mitad de carbono-14 que una muestra contemporánea. Puesto que estos anillos arbóreos son mucho más viejos que una semivida, deben haber contenido originalmente más del doble de carbono-14 que el que tienen ahora. Por lo tanto, estos anillos deben haber contenido más carbono-14 cuando se formaron que los anillos de árboles similares que crecen hoy. Como todos los demás organismos vivos, los árboles obtienen carbono-14 de la atmósfera, de modo que también la atmósfera debe haber contenido hace 6.500 años una cantidad de carbono-14 significativamente mayor que la que tiene hoy (véase Figura 5.5). Esto podría indicar que el ritmo de producción de carbono-14 era mayor en el pasado porque incidían más rayos cósmicos en la parte superior de la atmósfera. Una alternativa es que quizá hoy se esté eliminando carbono-14 de la atmósfera con mayor rapidez que hace 6.500

* Nótese, sin embargo, que diferentes científicos utilizan a veces otras convenciones.

102 Orígenes

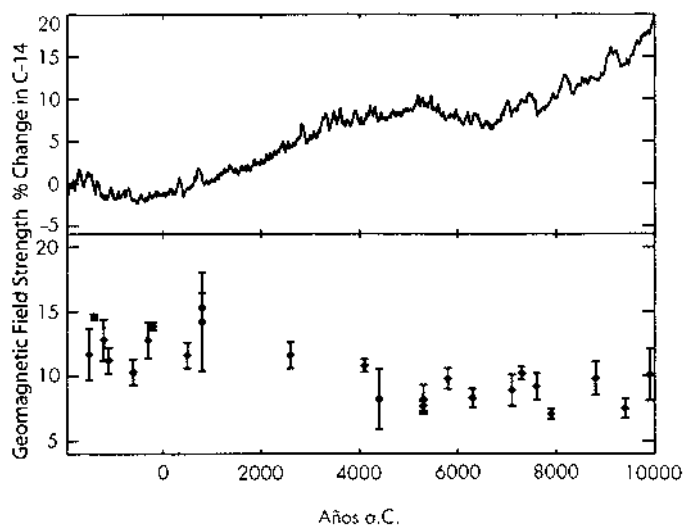


FIGURA 5.5. Arriba: las variaciones en el contenido original de carbono-14 en la atmósfera con el tiempo deducidas a partir de la curva de calibración. Nótese que en el pasado la atmósfera solía contener más carbono-14 que hoy. Abajo: las variaciones en el campo magnético de la Tierra como función del tiempo, medidas utilizando flujos de lava en Hawai (datos en unidades de 10^{22} Am² de Carlos Laj *et al.*, «Geomagnetic Intensity and Inclination Variations in Hawaii for the Past 98 kyr from Core SOH-4 (Big Island): A New Study and Comparison with Existing Contemporary Data», *Earth and Planetary Sciences* 200 (2002): 177-190. Nótese que antes de aproximadamente el 2000 a.C. la intensidad del campo magnético de la Tierra era menor, lo que puede ayudar a explicar por qué el contenido de carbono-14 en la atmósfera era mayor en esa época.

años debido a algún cambio en el ciclo global del carbono. De hecho, investigaciones recientes demuestran que los niveles de carbono-14 atmosférico han sido influidos por sucesos ocurridos tanto en la Tierra como en el espacio exterior. Por lo tanto, la curva de calibración puede ofrecer información importante sobre los cambios habidos en nuestro entorno astrofísico y climático durante los últimos 15.000 años.

Aunque los rayos cósmicos responsables de la producción de carbono-14 proceden del espacio profundo, hasta ahora no tenemos pruebas de que sucesos que ocurren fuera del Sistema Solar hayan influido

La calibración de las fechas por carbono-14 y la historia del aire 103

en los niveles de carbono-14 en la atmósfera. Más bien, muchas de las fluctuaciones observadas en el contenido de carbono-14 del aire pueden atribuirse a cambios en el campo magnético que rodea a la Tierra. Recordemos que los rayos cósmicos son partículas cargadas, de modo que pueden ser desviados por campos magnéticos. Por lo tanto, cambios en el estado o la intensidad de estos campos influirán en el número de rayos cósmicos procedentes del espacio interestelar que consiguen llegar a la Tierra.

Consideremos, por ejemplo, el propio campo magnético de la Tierra, del que las rocas volcánicas conservan una historia razonablemente bien documentada. Los que fueron flujos de lava contienen pequeños gránulos de material que se magnetizaron cuando la lava se solidificó, y la intensidad de dicha magnetización es proporcional a la intensidad del campo geomagnético en esa época. En lugares como Hawai, donde hay muchos flujos de lava con edades muy diversas,* los investigadores han sido capaces de documentar cómo ha cambiado la intensidad del campo magnético con los años. Algunos de estos datos se ilustran en la Figura 5.5, y muestran que el campo magnético se hizo significativamente más intenso alrededor del 2000 a.C. Aproximadamente al mismo tiempo disminuyó el contenido de carbono-14 en la atmósfera, como cabría esperar si el campo magnético más intenso redujera el número de rayos cósmicos que llegan a nuestra atmósfera.

A diferencia de las rocas volcánicas, el carbono-14 sólo ofrece una medida indirecta del geomagnetismo pasado. Sin embargo, el carbono-14 atmosférico no sólo es sensible al campo magnético de la Tierra, sino que también parece estar influido por el Sol. Si observamos la Figura 5.6, que muestra los datos de calibración durante el último milenio, podemos ver que hay picos en el contenido de carbono-14 de la atmósfera en torno a los años 1050, 1350, 1500, 1700 y 1820. Es interesante que los dos últimos períodos parecen seguir a épocas de actividad solar inusual.

Desde 1600, aproximadamente, se ha registrado la presencia de

* Los geólogos pueden determinar las edades de estas rocas utilizando técnicas descritas en el capítulo 7.

104 Orígenes

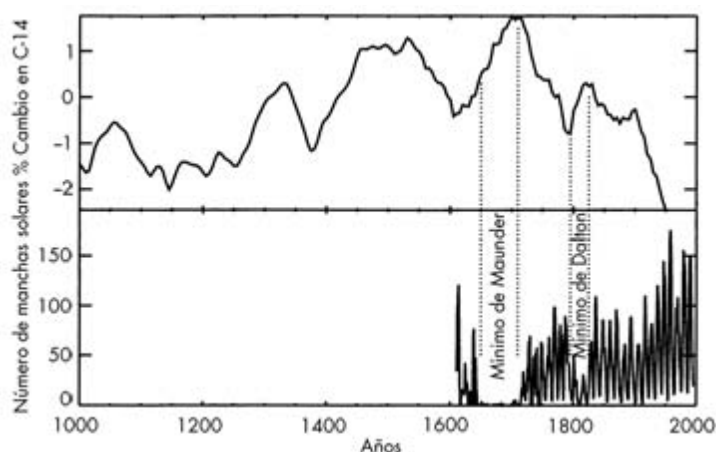


FIGURA 5.6. Arriba: la fluctuación en el contenido de carbono-14 de la atmósfera durante los últimos mil años. Abajo: una medida estandarizada del número de manchas solares desde 1600. El número de manchas solares aumenta y disminuye cada once años aproximadamente, un período conocido como ciclo solar. También hay dos períodos, uno en torno a 1820 y otro en torno a 1690, en que se vieron pocas manchas solares, conocidos como mínimo de Dalton y mínimo de Maunder, respectivamente. Estas fechas coinciden con aumentos en el contenido de carbono-14 atmosférico que probablemente reflejan cambios en el estado del campo magnético del Sol.

pequeñas máculas en la superficie del Sol conocidas como manchas solares. Gracias a estas observaciones sabemos que el número de manchas solares aumenta y luego disminuye cada once años, aproximadamente. Sin embargo, el número de manchas solares observadas en cada ciclo varía. En particular, durante la última parte del siglo XVII se vieron pocas manchas solares —este período se conoce ahora como el mínimo de Maunder—. Una reducción similar, aunque menos extrema, en el número de manchas solares ocurrió en torno a 1820, y se conoce como el mínimo de Dalton. Resulta intrigante que ambos mínimos preceden a dos de los períodos en que los niveles de carbono-14 en nuestra atmósfera alcanzaron un máximo.

Los datos recogidos durante el último siglo confirman que esta relación entre actividad de manchas solares y carbono-14 atmosférico no es sólo una coincidencia. Observaciones más sofisticadas del Sol han

La calibración de las fechas por carbono-14 y la historia del aire 105

revelado que las manchas solares corresponden a regiones donde existen intensos campos magnéticos. Además, ahora sabemos que cada vez que el número de manchas solares aumenta y disminuye, el campo magnético entero del Sol sufre una reorganización importante. Por ello, es probable que durante los mínimos de Maunder y de Dalton el campo magnético de la Tierra estuviera en un estado diferente del que está hoy, un estado que aparentemente permitía que llegaran a nuestra atmósfera más rayos cósmicos procedentes del espacio profundo, lo que reforzaría la producción de carbono-14. Algunas décadas más tarde, cuando reaparecieron las manchas solares, el campo magnético del Sol volvió presumiblemente a su estado anterior, lo que redujo el flujo de rayos cósmicos y frenó eventualmente la formación de carbono-14.

En el momento presente, los procesos que causan que el campo magnético del Sol se reorganice cada once años no son perfectamente conocidos. Tampoco está claro qué sucedió en el Sol durante los mínimos de Maunder y Dalton. Esto se debe a que las capas externas del Sol son una masa agitada de plasma sobrecalentado, en el que núcleos y electrones pueden viajar separados unos de otros. Estas partículas cargadas son desviadas por los campos magnéticos preexistentes, pero al mismo tiempo los movimientos de estas partículas cargadas pueden generar campos magnéticos por sí mismos. Los movimientos del plasma y el estado del campo magnético están así entrelazados de una manera muy compleja y dinámica que es difícil de modelar y predecir. Aunque observaciones cada vez más detalladas del Sol y modelos por computador más sofisticados están empezando a desvelar la dinámica de las capas externas del Sol, los datos del carbono-14 siempre pueden desempeñar un papel importante en esta área.

A diferencia de los registros de manchas solares, que sólo documentan dos mínimos pronunciados, los datos de carbono-14 cubren una escala de tiempo mucho mayor y documentan muchos más picos en el contenido de carbono-14, la mayoría de los cuales representan probablemente períodos adicionales de actividad solar alterada. De hecho, algunos científicos han utilizado recientemente los datos de calibración de carbono-14 para generar un registro de la actividad solar durante los últimos 10.000 años. Según este análisis, algunos de los mínimos rela-

106 Orígenes

tivamente estrechos en los niveles de carbono-14 atmosférico, incluido uno de alrededor del 800 a.C. y varios más entre el 3000 y el 4000 a.C (véase Figura 5.5) reflejan períodos de inusual actividad solar como los asociados con un número reducido de manchas solares. Por ahora, las implicaciones de estos sucesos anteriores son oscuras pero es de esperar que posteriores análisis de estos datos ayudarán a elucidar cuánto duran típicamente los períodos como los mínimos de Maunder y Dalton y con qué frecuencia ocurren, lo que probablemente arrojará nueva luz sobre el funcionamiento de nuestra estrella.

Mientras los astrofísicos están utilizando los datos de carbono-14 para estudiar el Sol, otros científicos los están utilizando para hacerse una idea de los cambios en el clima de la Tierra. Recordemos que la cantidad total de carbono-14 en la atmósfera en un momento dado depende no sólo de la rapidez con que es generado el carbono-14 por los rayos cósmicos sino también de la rapidez con que el carbono-14 es extraído de la atmósfera. El carbono-14 deja la atmósfera cuando los seres vivos mueren y, lo que es más importante, cuando se disuelve en los océanos. Así, cambios en la vida en la Tierra y en las condiciones de los océanos pueden tener impacto en el contenido de carbono-14 de la atmósfera. Por supuesto, antes de que podamos utilizar datos de anillos arbóreos para entender los cambios climáticos, necesitamos un método para distinguir los cambios en los niveles de carbono-14 debidos a variaciones climáticas de los debidos a fluctuaciones en la actividad solar o en el campo geomagnético. Afortunadamente, los datos procedentes de glaciares hacen esto posible, al menos en ciertas situaciones.

Las glaciares se forman cuando sobre regiones frías como Groenlandia o la Antártida cae una capa de nieve tras otra. Por lo tanto, las capas más profundas de un glaciar corresponden a las capas de nieve más antiguas, y una perforación en los glaciares proporciona un registro continuo de la formación de hielo que puede extenderse hasta decenas de miles de años atrás. Igual que sucede con el carbono-14 en los anillos arbóreos, la composición química del hielo en las diferentes capas del glaciar es sensible al flujo de rayos cósmicos sobre la Tierra y al clima dominante. Esta mezcla de isótopos de oxígeno y la cantidad de berilio-10 contenido en el hielo son particularmente in-

La calibración de las fechas por carbono-14 y la historia del aire 107

formativas.

El berilio-10 es un isótopo inestable que —como el carbono-14— es producido en la parte superior de la atmósfera por los rayos cósmicos. Sin embargo, tiene propiedades químicas diferentes que le impiden participar en los mismos fenómenos bioquímicos o climáticos que el carbono-14. De la misma forma que el contenido de carbono-14 de la atmósfera puede extraerse de los anillos arbóreos, la concentración de berilio-10 en la atmósfera puede calcularse a partir de testigos de hielo. Como podemos ver en la Figura 5.7, las dos curvas muestran características similares: muchos de los picos en los datos de carbono-14 —tales como los de hace alrededor de 5.500 años— ocurren al mismo tiempo que los picos en el registro de berilio-10. Puesto que los dos átomos son producidos por rayos cósmicos, esto confirma que muchos de estos picos son debidos a cambios en el flujo de rayos cósmicos en la parte superior de la atmósfera, muy probablemente a causa de variaciones en la actividad solar como las que se encuentran en el mínimo de Maunder.

Sin embargo, hay también algunas diferencias notables entre estas dos curvas, y los datos de hace entre 12.000 y 13.000 años son particularmente interesantes. Aquí hay picos tanto en los datos de carbono-14 como en los datos de berilio-10, pero el pico más prominente en los datos de carbono-14 es mayor y no se alinea exactamente con ninguno de los picos del berilio-10. Por lo tanto, este pico no parece estar asociado con un cambio en la actividad solar. Una clave del origen de este pico puede encontrarse en otra parte de los datos de los testigos de hielo, las proporciones de isótopos de oxígeno.

Las moléculas de agua están compuestas de dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno, de modo que el hielo es rico en oxígeno. Como el carbono, el oxígeno se presenta en varios isótopos diferentes que tienen la misma química pero masas ligeramente diferentes. Estos isótopos también sufren fraccionamiento de masa en ciertas situaciones. Por ejemplo, si agua que contiene los isótopos oxígeno-16 y oxígeno-18 se evapora de la superficie de un lago o un océano, el oxígeno-16 pasará al aire más rápidamente porque se necesita menos energía para que escape del líquido. Esta diferencia apenas importa si hace calor, porque hay suficiente energía térmica para liberar agua

108 Orígenes

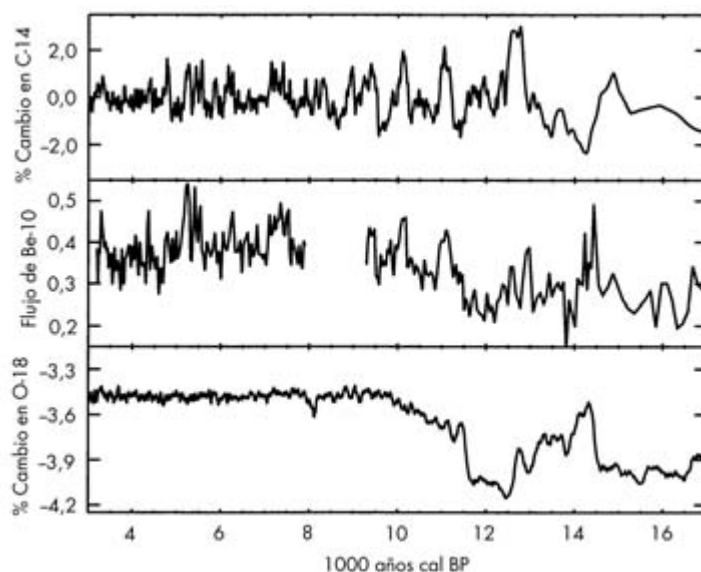


FIGURA 5.7. Cambios en el contenido de carbono-14 de la atmósfera (arriba) comparados con variaciones en el contenido de berilio-10 (centro) y el contenido de oxígeno-18 (abajo) derivados de testigos de hielo. Para facilitar las comparaciones se han eliminado derivas a largo plazo de los datos de carbono-14. Nótese que muchos de los picos en el contenido de carbono-14 tienen reflejo en los datos de berilio-10, lo que confirma que ambos son resultado de cambios en la intensidad de los rayos cósmicos. Sin embargo, el pico en el contenido de carbono-14 hace unos 14.700 años difiere de los picos en los datos de berilio-10. Este pico puede estar relacionado con el repentino cambio de clima indicado por las razones isotópicas de oxígeno. Cantidades más altas de oxígeno-18 indican climas más cálidos, y hay un cambio pronunciado hacia temperaturas más frías en ese período. Los flujos de berilio-10 se dan en unidades de 10^6 átomos/cm²/año y proceden del testigo de hielo GISP₂ (desplazado ligeramente en el tiempo para alinearlos con nuevos datos de C-14), mientras que los datos de isótopos del oxígeno proceden del testigo de hielo GRIP. Dichos datos están publicados en *Journal of Geophysical Research* 102, n.º C12 (1997) y fueron proporcionados por el National Snow and Ice Data Center, Universidad de Colorado en Boulder, y el WDC-A for Paleoclimatology, National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado, <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/greenland/summit/index.html>.

La calibración de las fechas por carbono-14 y la historia del aire 109

que contenga oxígeno-16 u oxígeno-18. Sin embargo, cuando la temperatura desciende, la diferencia entre oxígeno-16 y oxígeno-18 se hace más importante porque los movimientos térmicos de las partículas se reducen. Por esta y otras razones, la mezcla de oxígeno-16 y oxígeno-18 en la atmósfera cambia con la temperatura. Por lo tanto, esta proporción puede servir como una especie de termómetro para estudiar climas pasados.

El panel inferior de la Figura 5.7 muestra el cambio en la concentración de oxígeno-18 obtenido a partir del mismo glaciar en Groenlandia del que se obtuvieron los datos de berilio-10. Durante los últimos 10.000 años la razón isotópica del oxígeno ha sido prácticamente constante, lo que indica que el clima ha sido prácticamente constante. Sin embargo, entre 10.000 y 13.000 años atrás tienen lugar varios cambios drásticos en la razón isotópica del oxígeno. Estas variaciones corresponden a una serie de cambios climáticos que ocurrieron a finales de la última Edad de Hielo. Hace más de 15.000 años había menos oxígeno-18 en la nieve caída en el glaciar, lo que refleja las temperaturas significativamente más frías dominantes durante la propia Edad de Hielo. Hace alrededor de 14.500 años la proporción de oxígeno-18 sube, lo que marca una época de calentamiento pronunciado. Este período caliente duró unos mil años antes del comienzo del denominado Younger Dryas,* un período de mil años de temperaturas frías en el hemisferio norte que ocurrió inmediatamente antes de que el clima se calentase hasta su estado actual.**

El gran máximo en el contenido de carbono-14 de la atmósfera hace unos 12.700 años ocurre aproximadamente en la misma época que el enfriamiento pronunciado que marca el comienzo del Younger Dryas. Esta coincidencia sugiere con fuerza que algún fenómeno climático asociado con el descenso de la temperatura provocó un cambio importante en los niveles de carbono-14. Existe sólo un número limitado de sucesos que pudieran afectar de forma tan intensa a la compo-

* El nombre se debe a la *Dryas octopelata*, una planta propia de climas fríos que se extendió por toda la Europa meridional. (*N. del T.*)

** El Older Dryas es un período de enfriamiento más corto que ocurrió hace unos 14.000 años.

110 Orígenes

sición de la atmósfera, y en este caso lo más probable es que se tratara de un cambio masivo en las corrientes oceánicas.

Hoy, poderosas corrientes como la Corriente del Golfo transportan agua entre las capas profundas y las superficiales de los océanos. Esta mezcla en los océanos permite que el carbono-14 se distribuya por las aguas del océano de forma mucho más eficiente que si tuviera que difundirse hasta el fondo del océano por sí mismo. Es posible que cuando empezaron a fundirse las capas de hielo al final de la Edad de Hielo, la cantidad de agua fría y nueva descargada en los océanos fuera tan grande que dichas corrientes se alteraron. Esto podría haber frenado la absorción de carbono-14 en el océano, dando como resultado un exceso de aquél en la atmósfera. Recientemente se ha encontrado apoyo para este modelo en el contenido de carbono-14 en corales de aguas profundas, que pueden reflejar el contenido de carbono-14 del océano profundo igual que los anillos arbóreos hacen con el contenido de carbono-14 de la atmósfera. Estos datos muestran que los océanos profundos contenían menos carbono-14 durante el Younger Dryas que durante períodos de tiempo cálidos anteriores y posteriores, que es lo que cabría esperar si hubiera menos mezcla entre el océano y la atmósfera en esta época.

Cambios drásticos en la circulación del océano tendrían serios efectos en el clima global, y probablemente fueron responsables del enfriamiento que tuvo lugar durante el Younger Dryas. El clima de la Tierra es complejo, no obstante, y hay muchas preguntas sin resolver acerca de la secuencia exacta de sucesos que se desarrollaron al final de la última Edad de Hielo. Por ejemplo, episodios de fusión de glaciares antes y después del Younger Dryas llevaron a aumentos importantes en los niveles del mar pero aparentemente no perturbaron las corrientes oceánicas ni produjeron una caída de temperatura a escala hemisférica. ¿Qué había entonces de especial en las condiciones de hace 13.000 años que llevara a cambios climáticos tan radicales? Los climatólogos están trabajando actualmente para responder a tales preguntas utilizando estudios cada vez más detallados de los datos climáticos, incluida la información del carbono-14. Por ejemplo, fechas suficientemente precisas por carbono-14 asociadas con accidentes geológicos como algunas lenguas glaciares quizá permitan a los investigadores determinar si el agua

La calibración de las fechas por carbono-14 y la historia del aire 111

liberada de una región particular desencadenó el comienzo del Younger Dryas.

Mientras los climatólogos están utilizando los datos de calibración del carbono-14 para averiguar cómo era el clima a finales de la última Edad de Hielo, los arqueólogos se basan en la propia datación por carbono-14 para estudiar cómo vivía la gente durante este período. Por ejemplo, los seres humanos llegaron por primera vez a América del Norte y del Sur hace al menos 13.000 años, y las fechas de carbono-14 proporcionan datos críticos sobre esta fase temprana de la historia del Nuevo Mundo. Pero, como veremos en el próximo capítulo, hay aún mucha controversia, y en ocasiones agrios debates, sobre la fiabilidad de ciertas fechas por carbono-14 y lo que implican acerca de los pueblos que vivieron en las Américas hace más de 10.000 años.

Sección 5.3: Lecturas adicionales

Para una discusión general de los diferentes métodos de medir edades en arqueología, incluyendo dendrocronología y carbono-14, consultar R. E. Taylor y M. J. Aitken, *Chronometric Dating in Archaeology* (Plenum Press, 1997).

Para los más recientes esfuerzos por calibrar las fechas de carbono-14, examinar la revista *Radiocarbon* y la página web www.radiocarbon.org. Los datos de calibración más recientes están publicados en vol. 46, n.º 3 (2004) y están disponibles en la web.

Una entretenida discusión del caos general que provocó la datación por carbono-14 en la arqueología del mundo antiguo puede encontrarse en Colin Renfrew, *Before Civilization* (Knopf, 1973).

Para más detalles sobre la actividad solar y sus variaciones, un libro general accesible es D. G. Wentzel, *The Restless Sun* (Smithsonian, 1989). La página web www.spaceweather.com también contiene datos útiles sobre la actividad solar actual, y varios enlaces. Una discusión más detallada, apropiada para quienes tienen alguna formación en física, puede encontrarse en Peter Wilson, *Solar and Stellar Activity Cycles* (Cambridge, 1994).

Un esfuerzo reciente por utilizar carbono-14 para inferir la activi-

112 Orígenes

dad solar se encuentra en S. K. Solanki *et al.*, «Inusual Activity of the Sun during Recent Decades Compared with the Previous 11.000 Years» en *Nature* 431 (2004): 1084-1087.

Para esfuerzos actuales por modelar y predecir la actividad solar, véase Stuart Clark, «The Dark Side of the Sun» en *Science* 441 (2006): 402 y referencias allí citadas.

Para más información sobre la Edad de Hielo, consultar Richard Foster Flint, *Glacial and Quaternary Geology* (John Wiley and Sons, 1971) y Jurgen Ehlers, *Quaternary and Glacial Geology* (John Wiley and Sons, 1996).

Para datos de testigos de hielo, véase el número especial del *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, n.º C12 (1997) sobre el Greenland Ice Sheet Project2 (GISP-2) y Greenland Ice Core Project (GRIP).

Para el posible vínculo entre los datos de carbono-14 y los cambios climáticos a finales de la última Edad de Hielo, véase K. Hughen *et al.*, «Synchronous Radiocarbon and Climate Shifts during the Last Glaciation» en *Science* 290 (2000): 1951; Raimund Muscheler *et al.*, «Changes in Deep-Water Formation during the Younger Dryas Event inferred from ^{10}Be and ^{14}C Records» en *Nature* 408 (2000): 567-570; Laura F. Robinson *et al.*, «Radiocarbon Variability in the Western North Atlantic during the Last Deglaciation» en *Science* 310 (2005): 1469-1473, y Stein Bondevik *et al.*, «Changes in the North Atlantic Radiocarbon Reservoir Ages during the Allerod and Younger Dryas» en *Science* 312 (2000): 1514-1517.

Para más información sobre los posibles orígenes del Younger Dryas, véase W. Broecker, «Was the Younger Dryas Triggered by a Flood?» en *Science* 312 (2006): 1146-1148 y las referencias citadas.

El carbono-14 y el poblamiento del Nuevo Mundo

Durante miles de años, los continentes ahora llamados América del Norte y América del Sur han sido morada de un gran conjunto de culturas diferentes, desde pequeñas bandas de cazadores-recolectores hasta enormes imperios que incorporaban a millones de personas. La mayoría de estos grupos, a diferencia de los mayas clásicos o los antiguos egipcios, no han dejado detrás muchos registros escritos. Por suerte, las herramientas, artefactos y otros restos físicos que se han conservado nos ofrecen ideas sobre muchos aspectos de la vida y las experiencias de estas gentes. Los restos de casas antiguas pueden decirnos cuántas personas vivían bajo un mismo techo, las vasijas de alfarería contienen claves sobre lo que comían, y hay fragmentos de piedra que pueden documentar las rutas comerciales de gran alcance. Incluso es posible seguir los cambios en su modo y lugar de vida a lo largo del tiempo, gracias en no pequeña medida a la información cronológica contenida en las fechas por carbono-14. A medida que los arqueólogos retroceden en el tiempo, el material disponible para el estudio se hace más escaso y fragmentario, lo que hace más difícil desvelar cómo vivía la gente en un pasado muy lejano (Fig. 6.1). Por lo tanto, no debería sorprender que uno de los puntos más controvertidos hoy en la arqueología americana implique a los primeros habitantes del Nuevo Mundo.

Hay sólida evidencia de actividad humana en las Américas ya al final de la última Edad de Hielo hace 13.000 años. Los debates y las

114 Orígenes

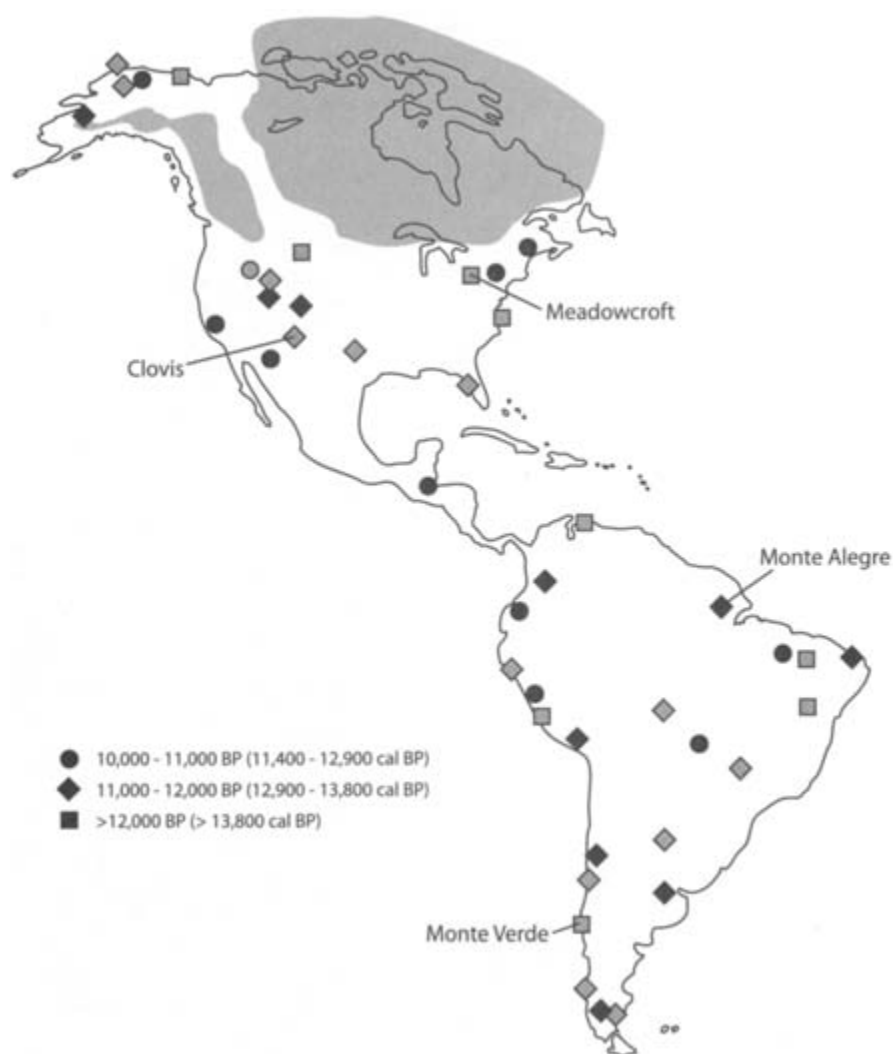


FIGURA 6.1. Tempranos emplazamientos arqueológicos en las Américas (basados en una figura en A. C. Roosevelt, J. Douglas y L. Brown, «The Migrations and Adaptations of the First Americans: Clovis and Pre-Clovis Viewed from South America» en *The First Americans* editado por N. G. Jablonski [University of California Press, 2002]). Los símbolos grises indican fechas inciertas o controvertidas. Las regiones sombreadas en el norte muestran la extensión de los glaciares en el 12000 BP. Los emplazamientos mencionados en el texto están etiquetados.

El carbono-14 y el poblamiento del Nuevo Mundo 115

controversias se centran en algunos emplazamientos arqueológicos que sugieren que quizá hubo personas viviendo en el Nuevo Mundo miles de años antes que esto, en plena Edad de Hielo. En esta época las condiciones climáticas y las barreras ambientales a lo largo de varias rutas al Nuevo Mundo eran muy diferentes de las de hace 13.000 años. Entre otras, las placas de hielo eran más extensas y los niveles del mar eran más bajos. Por consiguiente, si queremos entender cómo y cuándo llegaron los seres humanos a Norte y Sudamérica, tenemos que determinar si las fechas de carbono-14 asociadas a estos primeros emplazamientos son precisas y fiables.

Sección 6.1: Las puntas Clovis y el pueblo que las hizo

Durante muchos años las discusiones acerca de cómo llegaron los primeros pobladores al Nuevo Mundo han girado en torno a un grupo de artefactos llamados puntas Clovis (mostradas en la Figura 6.2), que reciben su nombre de una ciudad de Nuevo México. Estos objetos parecen grandes puntas de flecha, pero en realidad se utilizaban en lanzas. Las puntas Clovis son un tipo de herramientas de piedra labrada que pueden hacerse a partir de rocas como pedernal, sílex o vidrios volcánicos como la obsidiana. Si se golpean estos materiales de la forma correcta, pueden desprenderse lascas hasta conseguir un filo agudo. Eliminando una serie de pequeñas lascas, trozos de roca pueden convertirse en herramientas diversas. Las puntas Clovis pueden distinguirse de las puntas de flecha y otros antiguos artefactos de piedra por el hecho de que son bastante grandes —a veces de decímetros de longitud— y tienen una «acanaladura» característica en su base, que es la cicatriz dejada por una lasca eliminada del extremo trasero de la punta. Esta acanaladura, que quizá haya sido útil para atar la punta a un palo de madera, es muy difícil de producir. Si no se hace adecuadamente es fácil que las tensiones aplicadas en la base partan en dos toda la punta. Hoy, solamente los más habilidosos escultores de pedernal pueden reproducir las puntas Clovis.

Se han encontrado puntas Clovis por todo Estados Unidos. En varios emplazamientos, estos artefactos se han encontrado junto a restos

116 Orígenes

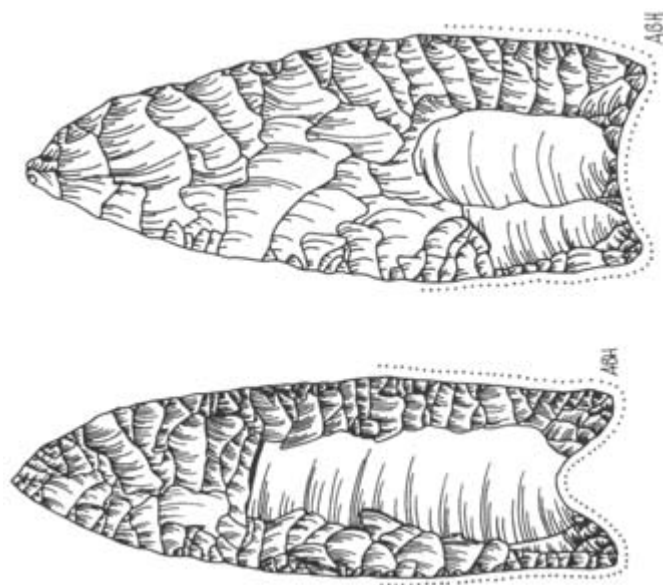


FIGURA 6.2. Ejemplos de puntas Clovis. Nótese la «acanaladura» característica en la base. Basado en figuras de John Whittaker, *Flintknapping: Making and Understanding Stone Tools* (University of Texas Press, 1994).

de mamuts; incluso se han descubierto algunos incrustados en huesos de mamut. Esto indica que estas herramientas eran utilizadas como puntas de lanza por los cazadores de mamuts y, puesto que los mamuts dejaron de existir hace tiempo, deben ser extremadamente antiguas. Las fechas por carbono-14 de emplazamientos asociados con puntas Clovis confirman la antigüedad de estas herramientas, pues las edades medidas por carbono-14 se arraciman en torno a 11000 años BP. Hecha la calibración, encontramos que estos artefactos datan de aproximadamente el año 11000 a.C., es decir, hace 13.000 años. Estas herramientas figuran así entre las pruebas más antiguas de actividad humana en Norteamérica. De hecho, muchos arqueólogos han argumentado que las puntas Clovis podrían documentar realmente la llegada de los primeros pobladores del Nuevo Mundo.

No hay absolutamente ninguna prueba de que alguno de nuestros ancestros prehumanos, tales como el *Homo erectus*, viviese alguna

El carbono-14 y el poblamiento del Nuevo Mundo 117

vez en las Américas. Por consiguiente, los humanos modernos deben haber llegado al Nuevo Mundo en un período comprendido entre 200.000 años atrás, cuando aparecieron por primera vez en África, y 13.000 años atrás, cuando aparecen las puntas Clovis. Es muy probable que entraran desde el nordeste de Asia por Alaska, puesto que es allí donde el Viejo y el Nuevo Mundo están más cerca, sólo separados por el estrecho brazo de agua conocido como el estrecho de Bering.

Esta teoría se hace aún más plausible cuando nos damos cuenta de que hubo al menos dos ocasiones en que no había agua entre Asia y Alaska. Como vimos en el último capítulo, cambios en las proporciones de isótopos de oxígeno y otros datos climáticos indican que la Tierra estaba significativamente más fría entre 100.000 y 10.000 años atrás. Durante esta Edad de Hielo, grandes cantidades de agua quedaron fijadas en enormes glaciares y placas de hielo, lo que hizo que descendiesen los niveles del mar. Hace alrededor de 50.000 años, y de nuevo alrededor de 20.000 años, la temperatura era tan baja y los niveles del mar descendieron tanto que entre Asia y Alaska afloró un puente de tierra. Pero a pesar de la Edad de Hielo en curso, el puente de tierra y grandes regiones de Alaska no estaban cubiertos por placas de hielo desnudas. Por lo tanto, esta región podía soportar animales y personas, y fue una vía natural para las migraciones humanas al Nuevo Mundo.*

Aunque la Edad de Hielo puede haber facilitado la llegada del *Homo sapiens* a Alaska, también hace más difícil el viaje desde Alaska a cualquier otra región de las Américas. El centro de Alaska pudo permanecer seco en esta era porque el aire húmedo que llegaba del sur y el oeste descargaba la mayor parte de su nieve cuando pasaba sobre las montañas de la costa, lo que dejaba el interior relativamente libre de nieve y hielo. Por el contrario, lo que ahora se conoce como Canadá estaba completamente cubierto de hielo porque el aire húmedo procedente del golfo de México producía nieve a medida que se movía hacia el norte y el este, y esto hacía posible que una gigantesca placa de hielo se extendiera hacia el oeste desde Quebec y las islas Baffin

* Aunque se han sugerido otras rutas a las Américas, son muy especulativas y no han encontrado amplia aceptación.

118 Orígenes

hasta juntarse con otra placa de hielo centrada sobre las Montañas Rocosas.

Hace alrededor de 35.000 años este hielo habría bloqueado cualquier ruta por tierra entre Alaska y el resto del continente. Estos glaciares empezaron a fundirse hace unos 20.000 años, y hace alrededor de 14.000 años se había abierto un corredor a través del oeste de Canadá hasta lo que ahora son los Estados Unidos continentales, como se muestra en la Figura 6.1.

Las puntas Clovis del oeste de Estados Unidos son casi tan antiguas como la formación de este corredor libre de hielo, lo que es indicio de que las gentes que hacían las puntas Clovis pudieron haber utilizado esta ruta para entrar en esta región de Norteamérica. Algunos arqueólogos han llegado a sugerir que los fabricantes de puntas Clovis fueron los primeros humanos que vivieron al sur de las placas de hielo. Estas gentes habrían seguido a animales grandes como los mamuts por el corredor libre de hielo hasta las llanuras del oeste de Estados Unidos, y desde allí se dispersaron rápidamente por todo el Nuevo Mundo siguiendo a sus presas. Cuando desaparecieron los animales grandes (posiblemente el resultado de cambios climáticos traídos por el final de la Edad de Hielo), estos pobladores empezaron a asentarse y a utilizar más recursos locales. Esto es casi con certeza una imagen demasiado simplista de cómo se colonizó el Nuevo Mundo, pero es en cualquier caso compatible con la edad, uso y distribución de las puntas Clovis. Además, es un modelo útil porque hace predicciones que pueden ser apoyadas o cuestionadas con datos adicionales.

En particular, este modelo —a veces llamado el modelo Clovis-primero— sugiere que no debería haber ningún pueblo en las Américas con más de 13.000-14.000 años de antigüedad, puesto que el corredor libre de hielo no se abrió hasta esa época. Pero algunos arqueólogos llevan varios años afirmando que han descubierto emplazamientos en las Américas que son anteriores a los emplazamientos Clovis, y con ello proclaman haber refutado este modelo. Ninguno de estos hallazgos ha estado libre de controversia, y puesto que las afirmaciones mejor apoyadas dependen de datos de carbono-14, los debates se centran normalmente en la interpretación y fiabilidad de tales fechas.

Sección 6.2: Meadowcroft

El abrigo rocoso de Meadowcroft, en el oeste de Pensilvania, es una cueva poco profunda que ha sido ocupada intermitentemente durante milenios. Durante miles de años se ha acumulado en esta cueva una capa tras otra de rocas y suciedad, y algunas capas contienen herramientas de piedra, fogatas y otros indicios de actividad humana. Cuando se excavó este emplazamiento a finales de los años setenta del siglo pasado, las fechas por carbono-14 de las cenizas de las hogueras en sus niveles inferiores sugerían que el emplazamiento fue ocupado hace más de 15.000 años. Esto situaría a pobladores de las Américas mucho antes de que se abriera el corredor libre de hielo.

Como sucede con otros emplazamientos que parecen contener artefactos pre-Clovis, los escépticos han cuestionado estos hallazgos. Hay dos puntos que arrojan dudas sobre la edad de Meadowcroft. En primer lugar, los restos vegetales en las capas más viejas del emplazamiento incluyen restos de robles y nogales, y parece poco probable que tales árboles de hoja caduca pudieran sobrevivir aquí durante la Edad de Hielo, cuando la placa de hielo que cubría Canadá estaba a menos de 80 kilómetros. Los excavadores replican a este argumento diciendo que el área alrededor del emplazamiento estaba resguardada y tenía así un clima más templado que el que cabría esperar.

El segundo problema con la edad del emplazamiento tiene que ver con la fiabilidad de las propias fechas por carbono-14. Recordemos que el oeste de Pensilvania está en el corazón del país del carbón. Toda la región está acibillada con depósitos geológicos que contienen restos de materiales ricos en carbono y realmente antiguos —de más de trescientos millones de años—. Todo el carbono-14 en estos depósitos se ha desintegrado hace tiempo, de modo que si algo de este material se hubiera mezclado con la ceniza de las hogueras, diluiría la fracción de carbono-14 y las fechas serían demasiado viejas. Los excavadores responden que tal contaminación no es de recibo, porque las fechas de capas diferentes del emplazamiento son consistentes. Dicho de otra forma, las fechas en cualquier capa dada son más viejas que las de capas que están por encima y más recientes que las de capas que están por debajo (véase Figura 6.3). Si las fechas estuvieran alteradas, la

120 Orígenes

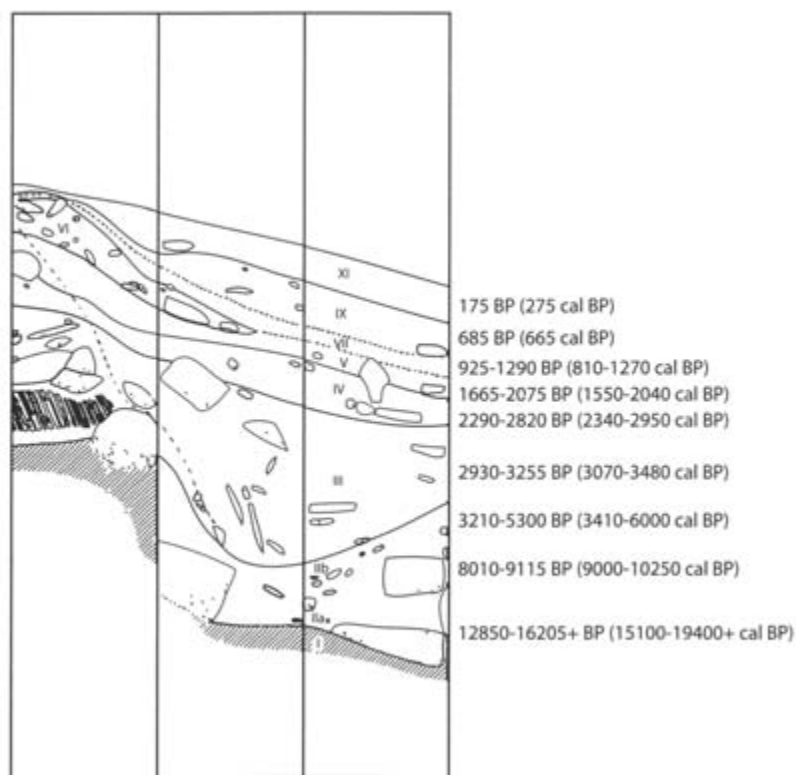


FIGURA 6.3. Un corte transversal del emplazamiento de Meadowcroft, que muestra las diversas capas, junto con las fechas por carbono-14 asociadas (basado en J. M. Adovasio *et al.*, «Meadowcroft Rockshelter 1977: An Overview» en *American Antiquity* 43 ([1978]: 632-651). Nótese que las capas más profundas tienen fechas más antiguas, como cabría esperar. Los excavadores presentan esto como prueba de que las muestras datadas no estaban contaminadas.

contaminación habría afectado probablemente a algunas capas más que a otras, y haría que las fechas de capas diferentes estuviesen entremezcladas. También señalan que el examen microscópico de las muestras datadas no revela ninguna evidencia de fragmentos de carbón o de cualquier otro material sospechoso.

Aunque Meadowcroft sigue siendo uno de los candidatos más prometedores en Norteamérica para un emplazamiento pre-Clovis, los ar-

El carbono-14 y el poblamiento del Nuevo Mundo 121

queólogos siguen discutiendo sobre su verdadera edad más de veinticinco años después de que se anunciara por primera vez. A menudo estas discusiones parecen degenerar en el tipo de polémicas puntillosas que la mayoría de los lectores no especialistas encuentran más divertidas o aburridas que informativas. El problema, en general, está en que los datos disponibles son muy limitados, pues proceden de un emplazamiento particular. En un caso así, los excavadores tendrán normalmente una apreciación más profunda del emplazamiento y los retos concretos que plantea. Sin embargo, otros arqueólogos —de forma muy natural— se resisten a fiarse de la sola palabra de los excavadores. Sin datos de otros emplazamientos, la única forma de evaluar la fiabilidad de las afirmaciones de los excavadores es examinar críticamente sus métodos y reexaminar el material excavado. Por desgracia, incluso si los excavadores no tienen tiempo, recursos o ganas de responder a cada duda que un escéptico pueda tener, ellos siguen siendo los únicos que pueden proporcionar la información requerida, una situación que fácilmente puede llevar a conflictos. La única solución a este problema es obtener más datos de más emplazamientos. Aunque sólo se han encontrado unos pocos emplazamientos en Norteamérica con fechas tempranas casi tan creíbles como las de Meadowcroft, ha habido varios descubrimientos muy interesantes en el lejano sur.

Sección 6.3: Monte Verde

Cuando se elaboró el modelo Clovis-primero no había prácticamente emplazamientos en América del Sur tan bien explorados como los del norte. Desde entonces, excavaciones y estudios topográficos han venido ofreciendo muchos datos nuevos sobre los pueblos que vivieron aquí cerca del final de la Edad de Hielo. El más famoso de estos descubrimientos procede de Monte Verde, en el centro-sur de Chile. A diferencia de Meadowcroft, este emplazamiento está situado a orillas de un riachuelo, y esta corriente dejó expuesta una capa de depósitos a algunos metros por debajo del nivel del suelo que contienen herramientas de piedra y restos bien conservados de plantas y animales. Los arqueólogos han encontrado pautas en la distribución de estos artefactos

122 Orígenes

que sugieren que en otro tiempo habían acampado personas en este lugar. En concreto, encontraron varios postes de madera que indican la existencia de un grupo de chozas o tiendas pequeñas. Las fechas por carbono-14 de esta capa databan en torno a 12500 BP, o hace entre 14.000 y 15.000 años después de calibración. Por consiguiente, este emplazamiento parece ser algo más antiguo que Clovis y el corredor libre de hielo, lo que es particularmente sorprendente dada su localización a 16.000 kilómetros al sur de Alaska.*

En 1997, los excavadores de Monte Verde invitaron a visitar su emplazamiento a un grupo de arqueólogos independientes para confirmar la exactitud de sus fechas e interpretaciones. Este equipo respaldó la antigüedad del emplazamiento, lo que hace de Monte Verde un candidato para un auténtico emplazamiento pre-Clovis. Por supuesto, esto no silenció todas las críticas, y se han planteado varias cuestiones sobre la interpretación de los restos. Como en Meadowcroft, la posibilidad de contaminación es algo que hay que tener en cuenta, pero en este caso lo que más preocupa es la relación entre los materiales datados y los artefactos. Recordemos que los depósitos se encontraron cerca de una corriente de agua. Tales entornos pueden recoger todo tipo de materiales arrastrados de otras localizaciones, por lo que se ha sugerido que los artefactos encontrados en Monte Verde no proceden de un verdadero asentamiento humano sino que más bien son una acumulación de materiales procedentes de un abanico de tiempos diferentes. Por consiguiente, las fechas de las cenizas y objetos de madera en el emplazamiento no proporcionan una edad segura de objetos claramente hechos por el hombre, como herramientas de piedra y trozos de cuerda. Los excavadores discrepan de esta valoración, señalando que las fechas de interés procedentes del depósito caen en general dentro de un intervalo de tiempo relativamente estrecho. También argumentan que las pruebas de estructuras y pautas antropogénicas en los artefactos no pueden desecharse tan fácilmente.

* Hay aquí indicios de una ocupación incluso anterior, pero son extremadamente tenues.

Sección 6.4: Pautas regionales

Monte Verde renovó el interés en las alternativas al modelo Clovis-primero de la colonización del Nuevo Mundo. Hoy día, la visión probablemente más popular es que mientras todo Canadá seguía aún cubierto de hielo, algunas gentes fueron capaces de atravesar los glaciares viajando a lo largo de la costa occidental de América del Norte, utilizando barcas durante al menos parte de su viaje. Aunque este escenario es ciertamente plausible, es difícil encontrar pruebas directas a su favor o al de cualquier otro modelo concreto de migraciones pre-Clovis. Incluso aceptando que las tempranas fechas por carbono-14 en lugares como Monte Verde y Meadowcroft sean exactas, aún tenemos sólo un puñado de emplazamientos pre-Clovis aislados y dispersos sobre una amplia región, lo que hace muy difícil averiguar cómo pudo haber vivido la gente en esta época. Además, los emplazamientos pre-Clovis disponibles no han ofrecido todavía muchas claves que ayuden a los arqueólogos a encontrar otros emplazamientos primitivos, lo que frustra a muchos investigadores y alienta el escepticismo de otros sobre la fiabilidad de las fechas tempranas.

Por el contrario, puesto que las puntas Clovis son piezas muy elaboradas y características del trabajo en piedra, los arqueólogos pueden asociar cualquier emplazamiento que contenga estos artefactos con una tradición común de fabricación de herramientas. Combinando datos de varios emplazamientos diferentes, los investigadores pueden elaborar y poner a prueba ideas acerca de cómo y cuándo vivieron las gentes que hacían estas puntas. Por ejemplo, fechas por carbono-14 bien establecidas para muchos emplazamientos Clovis en América del Norte caen a menos de unos pocos cientos de años del 11000 a.C., de modo que podemos confiar razonablemente en que la mayoría de las puntas Clovis fueron hechas y utilizadas durante este limitado período de tiempo. Además, puesto que estas puntas están repetidamente asociadas con restos de mamuts, parece que la caza de dichos animales pudo haber sido una actividad importante para algunas de estas gentes. Comparando los restos procedentes de estos emplazamientos diferentes, los arqueólogos incluso pueden deducir algo sobre la forma en que cazaban a estos animales tan grandes. Por supuesto, probablemente

124 Orígenes

hacían más cosas aparte de cazar mamuts, pero desvelar los otros aspectos de su cultura es más difícil porque no tenemos un conjunto de artefactos tan duraderos y característicos que pueda ser objeto de estudio.

Creo, asimismo, que parte de la razón de que el modelo Clovis-primero haya sido tan popular durante tanto tiempo es que explicaba una pauta observada en muchos emplazamientos próximos temporal y geográficamente. Si se hubieran descubierto pautas entre primitivos emplazamientos americanos no-Clovis, los arqueólogos tendrían una imagen mucho más clara de las primitivas culturas en el Nuevo Mundo. Por ejemplo, supongamos que los arqueólogos fueran capaces de identificar una pauta regional de emplazamientos conectados con las primeras ocupaciones en Meadowcroft. Si se encontrara que cualquiera de estos emplazamientos es más joven que las puntas Clovis, o si se encontraran en localizaciones que estaban bajo glaciares hace 15.000 años, entonces tendríamos más justificación para dudar de las fechas asociadas con este emplazamiento. Alternativamente, si todos estos otros emplazamientos estuvieran localizados en áreas *no* cubiertas entonces por hielo, ello reforzaría el argumento de la temprana ocupación en Meadowcroft. Otras pautas pueden dar apoyo incluso a rutas concretas bordeando las placas de hielo canadienses. Si la gente hubiera sorteado los glaciares a lo largo de la costa, cabría esperar que hubiera un conjunto de emplazamientos primitivos similares dispersos a lo largo de la costa occidental de América del Norte. Por desgracia, muchos de estos emplazamientos costeros se habrían inundado cuando los niveles del mar subieron tras el final de la última Edad de Hielo, lo que los haría particularmente difíciles de encontrar y estudiar.

De momento, los datos procedentes de América del Norte son aún tan escasos que es difícil distinguir pautas claras entre los presuntos emplazamientos pre-Clovis. Sin embargo, algunas pautas interesantes e inesperadas están empezando a emerger de los primeros emplazamientos de América del Sur. Recordemos que la teoría Clovis-primero sugiere que los primeros americanos se dispersaron rápidamente por el Nuevo Mundo en busca de grandes presas animales como mamuts. Incluso si la gente llegó a América antes y a través de una ruta diferente, sigue siendo posible que, una vez allí, llegaran aún más lejos persiguiendo y cazando grandes animales. Tales escenarios predicen que los primeros emplazamien-

El carbono-14 y el poblamiento del Nuevo Mundo 125

tos en América del Sur deberían encontrarse en entornos abiertos en donde pudieran mantenerse animales tan grandes: los altiplanos andinos, por ejemplo. De hecho, hay relativamente poca evidencia de primitivos emplazamientos sudamericanos en regiones altas. Más bien se encuentran a lo largo de las costas y en entornos selváticos, incluido el bajo Amazonas. Restos encontrados en estos lugares indican que estos pueblos no eran principalmente grandes cazadores. Más bien, la evidencia sugiere que cazaban animales pequeños, pescaban, coleccionaban conchas y recolectaban plantas. Por ejemplo, en el posiblemente pre-Clovis y decididamente primitivo emplazamiento de Monte Verde se conservaban patatas, se utilizaban conjuntos de plantas medicinales y trozos de cuerda hechos de fibras vegetales. Otro emplazamiento recientemente descubierto, la Caverna da Pedra Pintada cerca de Monte Alegre en el este de Brasil, conserva material que indica que las gentes vivían allí a base de una dieta de frutas y nueces en medio de una selva tropical, prácticamente en la misma época en que las gentes en América del Norte estaban cazando mamuts con puntas Clovis. De hecho, los datos de carbono-14 actuales indican que los emplazamientos de América del Norte que contienen puntas Clovis no son sustancialmente anteriores a los emplazamientos no-Clovis como la Caverna da Pedra Pintada. Más bien proceden esencialmente del mismo período de tiempo, lo que sugiere que la vida en el Nuevo Mundo hace 13.000 años era mucho más compleja que lo que habían predicho los modelos anteriores.

Esta nueva evidencia a favor de la diversidad de estilos de vida en las Américas al final de la última Edad de Hielo plantea un montón de preguntas para los arqueólogos. ¿Cómo se distribuyeron durante siglos por las Américas grupos con diferentes dietas y hábitos? ¿Se especializaron ciertos grupos en recursos específicos? ¿Hubo interacciones entre estos grupos y, si las hubo, de qué naturaleza? Es imposible abordar plenamente estas preguntas con los datos disponibles. Sin embargo, a medida que se descubran más emplazamientos y se disponga de más medidas de edad, deberían emerger pautas más claras que permitan a los arqueólogos determinar cómo utilizaban la tierra y sus recursos los pueblos del Nuevo Mundo. Esta investigación promete proporcionarnos con el tiempo una imagen mucho más completa de estos períodos iniciales en la prehistoria americana.

126 Orígenes

Aunque estos hallazgos están empezando a reconfigurar nuestra comprensión de los primeros americanos, parece que otros nuevos descubrimientos arrojarán pronto luz sobre una cuestión antropológica muy diferente: cómo y cuándo nuestros ancestros adquirieron por primera vez la capacidad de caminar erguidos sobre dos piernas. Este fenómeno ocurrió millones de años antes de la aparición de los humanos modernos, lo que significa que el material relevante es tan antiguo que las muestras no contienen suficiente carbono-14 para proporcionar medidas de edad fiables. En su lugar, datos obtenidos de otro isótopo inestable, junto con la información conservada en nuestro código genético, sugieren que un gran avance está a la vuelta de la esquina.

Sección 6.5: Lecturas adicionales

Una buena obra general sobre la arqueología de América del Norte es Brian Fagan, *Ancient North America* (Thames and Hudson, 2000). Fuentes basadas en la web sobre la primera arqueología americana pueden encontrarse en páginas como las del Centro para el Estudio de los Primeros Americanos (www.centerforfirstamericans.org) y la Base de Datos Paleoindia de las Américas (pidba.utk.edu).

Una obra reciente que discute las puntas Clovis y lo que sabemos de las gentes que las hicieron puede encontrarse en Gary Haynes, *The Early Settlement of North America* (Cambridge University Press, 2004).

Descripciones detalladas de Meadowcroft se encuentran en R. C. Carlisle y J. M. Adovasio, *Meadowcroft Rockshelter: Collected Papers on the Archeology of Meadowcroft Rockshelter and the Cross Creek Drainage* (University of Pittsburgh, 1982). Para una descripción más breve, véase J. M. Adovasio *et al.*, «Meadowcroft Rockshelter 1977: An Overview» en *American Antiquity* 43 (1978): 632-651 o J. M. Adovasio *et al.*, «The Meadowcroft Rockshelter Radiocarbon Chronology 1975-1990» en *American Antiquity* 55 (1990): 348-354.

Una descripción del emplazamiento de Monte Verde se encuentra en Thomas D. Dillehay, *Monte Verde*, 2 vols. (Smithsonian Institution Press, 1989).

El carbono-14 y el poblamiento del Nuevo Mundo 127

Opiniones escépticas sobre estos emplazamientos (y «vivas discusiones» asociadas) pueden encontrarse en varios lugares: la serie de breves artículos por Mead, Haynes y Adovasio en *American Antiquity* 45, n.º 3 (1980) (Jim I. Mead «Is It Really That Old? A Comment about the Meadowcroft Rockshelter “Overview”», pp. 579-582; C. Vance Haynes, «Paleoindian Charcoal from Meadowcroft rockshelter; Is Contamination a Problem?», pp. 582-587; y J. M. Adovasio *et al.*, «Yes Virginia, It Really Is That Old: A Reply to Haynes and Mead», pp. 588-595); K. B. Tankersley y C. A. Munsun, «Comment on the Meadowcroft Rockshelter: Radiocarbon Chronology and the Recognition of Coal Contaminants» en *American Antiquity* 57 (1992): 321-326; «Monte Verde Revisited», número especial de *Scientific American, Discovering Archaeology*, noviembre-diciembre 1999, pp. 1-23; y Stuart J. Fiedel, «Initial Human Colonization of the Americas: An Overview of the Issues and the Evidence» en *Radiocarbon* 44 (2002): 407-436.

Un buen libro reciente sobre varios aspectos de los primeros habitantes del Nuevo Mundo es Nina Jablonski (ed.), *The First Americans* (University of California Press, 2002).

Para más detalles sobre los diversos emplazamientos primitivos de América del Sur, véase A. C. Roosevelt, J. Douglas y L. Brown, «The Migrations and Adaptations of the First Americans: Clovis and Pre-Clovis Viewed from South America», en *The First Americans*, editado por N. G. Jablonski (University of California Press, 2002) y Thomas D. Dillehay, *The Settlement of the Americas* (Basic Books, 2000).

Para una reevaluación reciente de fechas Clovis que indica que los emplazamientos Clovis proceden de un período de tiempo muy limitado y son contemporáneos de algunos emplazamientos no-Clovis en América del Norte y del Sur, véase M. R. Waters y T. W. Stafford Jr., «Redefining the Age of Clovis: Implications for the Peopling of the Americas» en *Science* 315 (2007): 1122-1126.

Potasio, argón, ADN y la marcha erguida

Desde una perspectiva estrictamente biológica, los seres humanos no somos muy diferentes de los chimpancés o los gorilas. Todos tenemos muchos rasgos anatómicos en común —incluidos pulgares oponibles y uñas— y nuestros planos genéticos sólo difieren en un pequeño porcentaje. Sin embargo, el pequeño número de rasgos biológicos que nos distinguen de otros simios corresponden a diferencias enormes en comportamiento. Después de todo, es poco probable que un chimpancé escriba un libro como éste, e incluso si lo hiciera, tendría grandes dificultades para encontrar un editor. Por consiguiente, si podemos determinar el origen de estos rasgos exclusivos de la humanidad, podemos entender y apreciar mejor qué es lo que nos hace especiales.

Dos de los rasgos físicos más obvios que distinguen a los humanos de otros grandes simios son el tamaño mucho mayor de nuestro cerebro y nuestro estilo de marcha sobre dos piernas manteniendo el torso vertical. El mayor tamaño de nuestro cerebro tiene evidentemente una relación directa con nuestro comportamiento y nuestra cultura singularmente complejos. Sin embargo, nuestra postura también parece haber desempeñado un papel fundamental en nuestra evolución. Nuestros ancestros caminaban sobre dos piernas mucho antes de que empezaran a tener cerebros más grandes, y entre todos los ancestros de los humanos y los grandes simios, sólo las criaturas bípedas muestran aumentos espectaculares en el tamaño del cerebro. Es posible, por

lo tanto, que este peculiar modo de locomoción facilitara de algún modo cambios posteriores en la estructura cerebral, aunque los detalles de esta relación no están muy claros.

El origen de nuestro bipedalismo es también un tema candente para los antropólogos porque es un viejo rompecabezas que recientes descubrimientos pueden ayudar a resolver. Los cambios en el estilo de caminar, como los cambios en el tamaño del cerebro, implican alteraciones en las características del esqueleto, de modo que en teoría el registro fósil podría proporcionar información importante sobre cuándo, dónde y cómo se produjeron estas adaptaciones cruciales. Sin embargo, aunque cráneos antiguos procedentes de África documentan cambios en el tamaño del cerebro de nuestros ancestros durante los últimos cinco millones de años, nadie ha encontrado todavía huesos antiguos que indiquen claramente cuándo o dónde nuestros ancestros empezaron a caminar erguidos. Esta carencia de información detallada sobre las circunstancias que rodean al origen del bipedalismo ha hecho muy difícil determinar por qué el caminar sobre dos piernas se hizo ventajoso para nuestros ancestros. Pero en la última década, equipos de investigadores que trabajan en Etiopía, Kenia y Chad han desenterrado fósiles muy interesantes. De momento el material recuperado es aún bastante fragmentario, pero las fechas asociadas con estos hallazgos son suficientes para hacerlos muy excitantes para los antropólogos. Las edades de estos huesos recién descubiertos indican que los primeros bípedos vivieron en un tiempo que —según las pruebas de ADN— puede haber sido un momento crucial en la historia de nuestro linaje, de modo que estas criaturas pueden documentar las primeras etapas de los rasgos únicos como el bipedalismo que nos hicieron lo que somos hoy.

Sección 7.1: Los homínidos

Los fósiles recién descubiertos —como la mayoría de los fósiles que utilizan los antropólogos para estudiar los orígenes de nuestros rasgos unívocamente humanos— pertenecen a un conjunto de animales que tienen algunos de los rasgos que hacen únicos a los humanos de hoy,

130 Orígenes

tales como un volumen cerebral ampliado y bipedalismo, además de un montón de características más sutiles entre las que se incluyen dientes caninos reducidos y cajas torácicas en forma de barril. A estas criaturas se las solía llamar homínidos, pero gracias a refinamientos recientes en el sistema de clasificación ahora suelen denominarse homíninos. Yo utilizaré aquí el término antiguo y más familiar pero, independientemente de cómo se les llame, es poco probable que las combinaciones de características que comparten con nosotros aparezcan muchas veces en animales diferentes, de modo que es prácticamente seguro que los homínidos y los humanos modernos heredaron estos rasgos de un ancestro común. La distribución de rasgos entre homínidos fósiles puede así revelar cómo y cuándo nuestros ancestros heredaron dichas características.

Consideremos, por ejemplo, el volumen cerebral. La Figura 7.1 muestra los cráneos de diferentes tipos de homínidos de épocas diferentes. La cantidad de cráneo por encima del arco superciliar proporciona una cruda estimación del volumen cerebral, y así podemos ver claramente que los primeros homínidos como el *Australopithecus afarensis* tienen cerebros relativamente pequeños —comparables a los de los modernos chimpancés—. También podemos observar una tendencia definida: el volumen cerebral aumenta del *Australopithecus afarensis* al *Homo habilis* y de éste al *Homo erectus*, y finalmente a los humanos modernos (también conocidos como *Homo sapiens*). Sin embargo, también podemos ver que algunos homínidos no siguieron esta tendencia. Por ejemplo, el volumen cerebral del *Paranthropus robustus* es considerablemente menor que el de la especie contemporánea *Homo erectus*. Comparando los hábitats y las dietas de estos diferentes homínidos, los paleoantropólogos pueden hacerse una idea de los procesos que favorecieron la evolución de los cerebros grandes. Los datos indican también que homínidos con los cerebros aumentados empezaron a aparecer hace unos dos millones de años, de modo que puede explorarse la relevancia de cualquier tendencia climática u otros fenómenos ambientales en esta época.

Por el contrario, todos los especímenes homínidos fósiles bien conservados y casi completos —incluidos los del *Australopithecus afarensis*— tienen características que indican que estas criaturas ca-

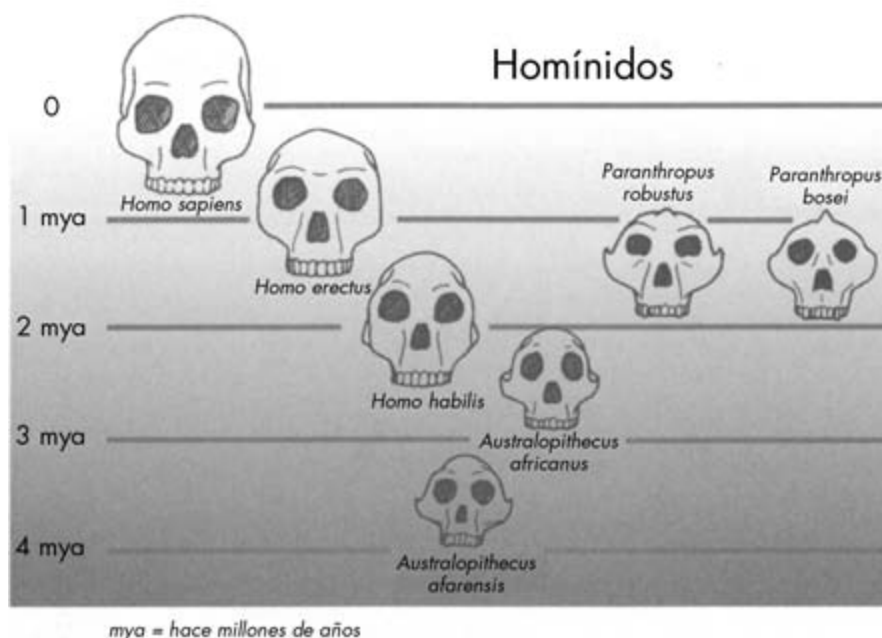


FIGURA 7.1. Dibujos de varios cráneos de homínidos, todos a escala. La posición de los cráneos a lo largo del eje vertical indica la edad de los fósiles, mientras que el eje horizontal es arbitrario. Pueden observarse los aumentos en el tamaño del cerebro cuando la bóveda del cráneo se eleva por encima del arco ciliar.

minaban sobre dos piernas: la parte inferior de su columna vertebral estaba curvada hacia atrás para soportar un tronco vertical, y sus caderas, rodillas y tobillos permitían que sus piernas se movieran hacia delante y hacia atrás bajo la pelvis. Esto significa que la capacidad para caminar sobre dos piernas no sólo es más vieja que los cerebros aumentados, sino que también es más vieja que el *Australopithecus afarensis* o cualquiera de los otros homínidos que se muestran en la Figura 7.1. Sin embargo, hasta que alguien descubra homínidos fósiles que no pudieran caminar eficientemente sobre dos piernas será muy difícil averiguar qué es lo que hizo que nuestros ancestros adoptaran este modo de locomoción. Por eso, los antropólogos que buscan los orígenes del bipedalismo han estado buscando homínidos fósiles que precedan al

132 Orígenes

Australopithecus afarensis, y estos esfuerzos han empezado recientemente a ser recompensados.

En 2001, equipos de paleoantropólogos que trabajaban en Etiopía y Kenia anunciaron que habían encontrado restos fragmentarios de homínidos. Aunque sólo se encontraron unos pocos huesos en cada localización, las características de los dientes eran suficientes para distinguirlos de los *Australopithecus* y otros homínidos, de modo que se les dieron los nombres *Ardipithecus ramidus* y *Orrorin tagnensis*, respectivamente. Más recientemente, un equipo que excavaba en Chad encontró un cráneo bien conservado de otro homínido, al que llamaron *Sahelanthropus tchadensis*. Todos estos huesos parecen ser más antiguos que cualesquiera restos de homínidos previamente conocidos, y por consiguiente documentan un período previamente inexplorado de la historia homínida. Como sucede con los primeros emplazamientos americanos descritos en el capítulo anterior, las pruebas de la antigüedad de estos nuevos hallazgos proceden de un método de datación radiométrica basado en un isótopo inestable. Sin embargo, en este caso el isótopo no es una forma de carbono creada en lo alto del cielo, sino una forma de potasio liberada del subsuelo profundo.

Sección 7.2: La datación por potasio-argón y la edad de los fósiles homínidos

Todos los átomos de potasio tienen 19 protones y, dependiendo del isótopo, pueden tener diferente número de neutrones. La mayor parte del potasio en la Tierra está en forma de potasio-39, que tiene 20 neutrones y es completamente estable. Sin embargo, alrededor de un 0,01 % de los átomos de potasio están en forma de potasio-40, que tiene 21 neutrones y es inestable (véase Figura 7.2). Como el carbono-14, este isótopo de potasio puede sufrir desintegración beta en la que un neutrón se convierte espontáneamente en un protón. En este caso, el proceso deja detrás un núcleo de calcio-40. Sin embargo, el 10 % de las veces el potasio-40 se desintegra de una forma algo diferente: el núcleo captura un electrón y uno de sus protones se convierte en un neutrón, lo que produce un átomo de argón-40. Como el carbono-14,

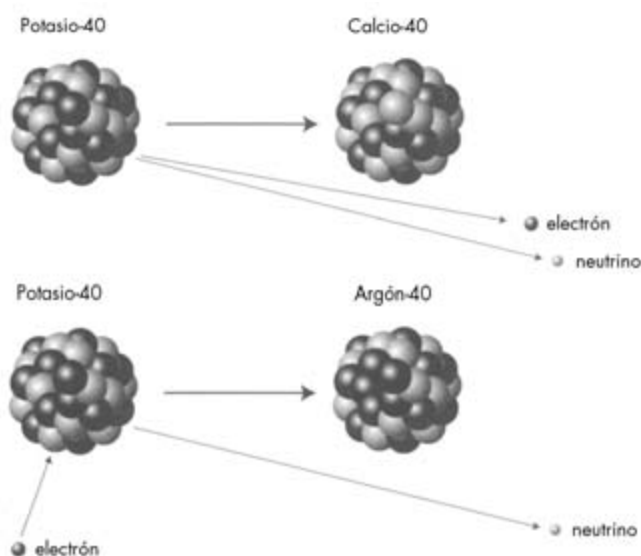
Potasio, argón, ADN y la marcha erguida 133

FIGURA 7.2. Desintegración del potasio-40. Aproximadamente el 90% de las veces sufre desintegración beta como el carbono-14, y un neutrón (círculo negro) se convierte en un protón (círculo gris) para formar calcio-40. El 10% restante de las veces el núcleo captura un electrón, un protón se transforma en un neutrón, y el núcleo se convierte en argón-40.

los átomos de potasio-40 pueden utilizarse como medidores de tiempo porque se desintegran con una semivida bien definida determinada únicamente por el número de protones y neutrones que contiene. Sin embargo, mientras que el carbono-14 tiene una semivida de sólo unos pocos miles de años, el potasio-40 tiene una semivida de 1.280 millones de años, de modo que estos dos isótopos sondan escalas de tiempo muy diferentes. Si tenemos un material de algunos miles de años de edad, ya ha pasado el tiempo suficiente para que una cantidad importante del carbono-14 se haya desintegrado, pero sólo una minúscula fracción de potasio-40 se habrá transformado en calcio o argón. Para dicho material relativamente reciente, el carbono-14 proporciona un indicador de la edad mucho más sensible que el potasio-40. Sin embargo, en el caso de objetos de millones o miles de millones de años, casi todo el carbono-14 original se habrá desintegrado mientras que todavía queda una cantidad importante de potasio-40. Por ello, el

134 Orígenes

potasio-40 puede utilizarse para medir la edad de objetos mucho más antiguos.

Los tipos de materiales que pueden ser datados con estos dos métodos son también muy diferentes porque los átomos relevantes tienen propiedades químicas distintas. Como ya hemos visto, todos los organismos que viven al mismo tiempo reciben cantidades comparables de carbono-14 procedente del dióxido de carbono atmosférico, de modo que este isótopo suele ser útil para datar material derivado de criaturas vivas. Por el contrario, el potasio-40 se utiliza mejor para datar rocas volcánicas, no porque todas éstas tengan contenidos similares de potasio-40, sino porque todas las rocas fundidas no contienen idealmente argón-40.

El argón pertenece a una clase de elementos llamados gases nobles, entre los que se incluyen el helio y el neón. Los gases nobles son únicos en cuanto que —salvo en circunstancias muy extremas— no forman enlaces químicos con otros elementos, de modo que la única forma en que interaccionan con otros átomos es rebotando en ellos. Los gases nobles pueden escapar fácilmente de la lava fundida porque estas rocas supercalentadas están en un estado cuasi-líquido y sus moléculas se están moviendo y chocando unas con otras. En este ambiente, los átomos de argón pueden rebotar hasta que llegan a la superficie y salen a la atmósfera. Por el contrario, el argón puede estar atrapado en una roca sólida porque aquí los átomos están dispuestos en retículos rígidos que forman minúsculas jaulas de las que los átomos de argón no pueden escapar.

Idealmente, las rocas volcánicas recién formadas no deberían contener nada de argón puesto que este gas se escapó antes de que la lava líquida se enfriara para hacerse sólida. Sin embargo, normalmente contienen al menos algo de potasio-40. Con el paso del tiempo este potasio se desintegra en argón-40, que permanece atrapado en la roca sólida y nos permite estimar cuánto potasio-40 se ha desintegrado desde que se formó la roca. Estos datos, combinados con el contenido actual de potasio-40 de la roca, nos dan toda la información que necesitamos para calcular la edad de la roca.

Por ejemplo, supongamos que encontramos una roca volcánica que actualmente contiene 10 microgramos de potasio-40 y 1 micro-

Potasio, argón, ADN y la marcha erguida 135

gramo de argón-40. Esto significa que 1 microgramo de potasio-40 se ha transformado en argón-40 durante el tiempo transcurrido desde que la roca se formó inicialmente. Puesto que sólo alrededor de un 10% de los átomos de potasio-40 se transforman en argón-40, podemos concluir que un total de 10 microgramos de potasio-40 se han desintegrado durante la existencia de la roca. Por consiguiente, la roca contenía originalmente 20 microgramos de potasio-40 cuando se enfrió a partir del flujo de lava, lo que significa que la mitad de los átomos de potasio-40 originales se han desintegrado hasta ahora. Esto nos dice que la roca debe haberse solidificado hace una semivida de potasio-40, o aproximadamente 1.280 millones de años.

Este método de medir la edad de rocas volcánicas —llamado datación por potasio-argón— es una manera simple y elegante de medir la edad porque podemos deducir el contenido original de potasio-40 de la roca directamente del material en la roca, y no necesitamos estimarlo mediante datos de calibración adicionales. En otras palabras, la estimación de la edad descansa sólo en datos proporcionados por la propia roca y la única hipótesis hecha es que la roca no contenía inicialmente nada de argón-40. Pese a todo, esta técnica no es ciertamente infalible, pues existen varios procesos que pueden contaminar el contenido de argón-40 de una roca y corromper la estimación de la edad. El flujo de lava original puede haber contenido algunas rocas no fundidas, lo que eleva por encima de cero el contenido de argón-40 de la lava, o la roca puede haber sido calentada después de que se formara, lo que permite escapar algo del argón-40.

Igual que sucede con la datación por carbono-14, hay una mini-industria dedicada a refinar esta técnica y a desarrollar procedimientos que proporcionan edades precisas y fiables. Por ejemplo, la fiabilidad de las fechas por potasio-argón puede ser evaluada utilizando un poco de alquimia ingeniosa. Antes de extraer el argón, los científicos pueden bombardear la roca con neutrones procedentes de un reactor nuclear. De la misma forma que los neutrones procedentes de los rayos cósmicos convierten nitrógeno-14 en carbono-14 en la parte superior de la atmósfera, los neutrones procedentes del reactor transforman algo del potasio-39 en la roca en argón-39. Puesto que la mayor parte del potasio en cualquier roca está en forma de potasio-39, este proceso genera

136 Orígenes

una forma de argón que «sigue» el contenido de potasio de la roca. Después de este tratamiento, la roca es calentada poco a poco para extraer el argón, y el argón-39 y el argón-40 son separados y medidos utilizando espectroscopía de masas. Puesto que tanto el argón-39 como el argón-40 fueron producidos a partir del mismo elemento, la razón de argón-39 a argón-40 debería ser la misma en toda la roca. Sin embargo, si la roca ha sido calentada en algún momento anterior de su vida y se ha escapado algo del argón-40, diferentes regiones o minerales en la roca tendrán mezclas discordantes de argón-39 y argón-40. Comparando las razones de los isótopos de argón en el gas extraído de la roca a varias temperaturas, podemos tener una manera de determinar si la edad de potasio-argón ha sido corrompida.

Sección 7.3: Volcanes y fósiles en el África Oriental

La datación por potasio-argón nos permite determinar cuándo se solidificaron las rocas volcánicas. Puesto que los huesos no duran mucho tiempo en un flujo de lava ardiente, no es probable que encontremos fósiles contemporáneos insertados en rocas de este tipo. Más bien, la mayoría de los fósiles se encuentran en depósitos sedimentarios, donde el agua o el viento han apilado una capa tras otra de barro, arena y otros materiales. Normalmente, el método de potasio-argón no puede ayudar a datar directamente el material sedimentario. Sin embargo, gracias a un fenómeno geológico llamado el Gran Valle del Rift del África Oriental, la edad de las rocas volcánicas puede ayudar a datar depósitos sedimentarios que contienen primitivos homínidos fósiles.

El Gran Valle del Rift del África Oriental es un lugar en donde la corteza terrestre ha sido desgarrada por procesos relacionados con las fuerzas que provocan que los diferentes continentes se desplacen en la superficie del globo terrestre. Estas fuerzas son impulsadas por el calor contenido en las profundidades de la Tierra, que es tan intenso que hace que allí las rocas sean flexibles y puedan estirarse y fluir. Cerca de la superficie las rocas son más frías y más frágiles, de modo que, en lugar de estirarse, la corteza superior se rompe en trozos que deslizan unos respecto a otros para formar una serie de valles y depresiones

(véase Figura 7.3). Esta falla concreta se extiende desde Eritrea a Mozambique.

El Gran Valle del Rift del África Oriental tuvo tres efectos importantes en el entorno local. En primer lugar, el agua se acumuló en el fondo de las depresiones, formando una serie de lagos y creando hábitats atractivos para la vida salvaje, incluidos algunos homínidos. En segundo lugar, el agua y el viento transportaron sedimentos desde las tierras altas circundantes a las depresiones, lo que enterró y conservó como fósiles a algunos de los animales. Tercero, las tensiones y movimientos de la corteza de la Tierra permitieron que el magma llegara a la superficie, lo que generó una amplia actividad volcánica que en varios momentos cubrió partes de esta región con cenizas y lava. Por

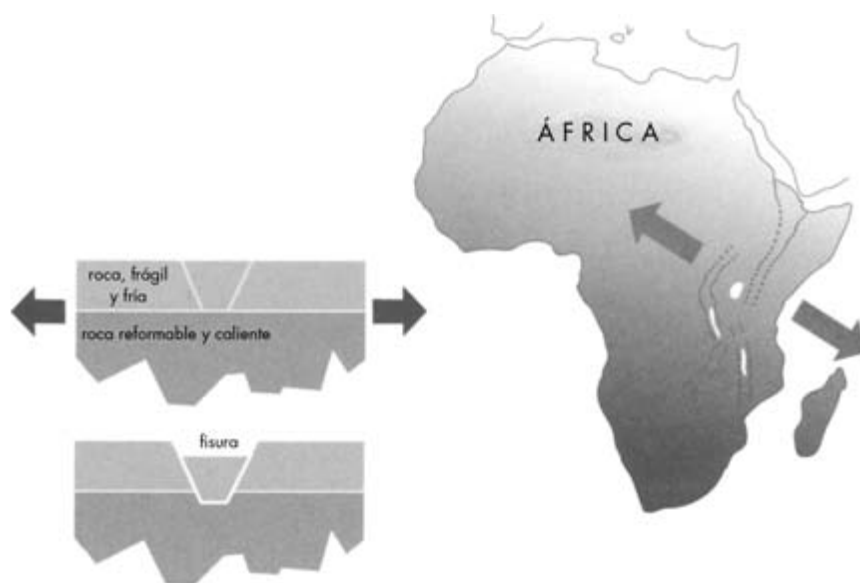


FIGURA 7.3. El Gran Valle del Rift del África Oriental. Izquierda: una sección transversal de una falla. Las fuerzas geológicas abren la corteza en estos lugares. La capa caliente inferior se estira, pero la capa superior más fría se rompe y una cuña descende para formar una depresión. Derecha: el Gran Valle del Rift del África Oriental, con la depresión indicada mediante líneas de puntos. Las flechas indican las fuerzas que pueden haber ayudado a formar estos accidentes.

138 Orígenes

ello, el África Oriental contiene capas de depósitos volcánicos intercaladas con sedimentos que contienen fósiles.

Supongamos que una capa de roca sedimentaria que contiene fósiles está emparedada entre dos capas de rocas volcánicas. La capa que contiene fósiles debe ser más joven que el depósito volcánico sobre el que se encuentra y más vieja que las rocas volcánicas que tiene encima, de modo que la datación de las rocas volcánicas con el sistema potasio-argón pondrá fuertes restricciones sobre la edad de la capa que contiene fósiles. Este método ha dado estimaciones de edad muy fiables para muchos de los restos homínidos del Gran Valle del Rift del África Oriental, incluidos *Ardipithecus* y *Orrorin*. Incluso homínidos encontrados fuera del África Oriental se benefician de las medidas de edad en la falla. Por ejemplo, fósiles que pertenecen a *Sahelanthropus tchadensis* proceden de Chad, a cientos de kilómetros al oeste de la falla y también alejados de cualquier depósito volcánico que facilitara la datación. Sin embargo, estos fósiles se encontraron asociados con los restos de otros animales, como el cerdo salvaje *Nyanzachoerus syrticus*, que también se encuentran en la falla. Utilizando el método antes esbozado, los paleontólogos han deducido que estas bestias prehistóricas vivieron hace aproximadamente seis o siete millones de años. Esto sugiere que los fósiles, incluido el *Sahelanthropus*, son del mismo período de tiempo.

La Figura 7.4 muestra las edades de los homínidos descubiertos en 2006. Hasta hace aproximadamente una década todos los restos de homínidos conocidos procedían de depósitos de menos de cuatro millones de años de antigüedad. Sin embargo, los fósiles recién descubiertos de *Ardipithecus*, *Orrorin* y *Sahelanthropus* datan de hace más de seis millones de años. Estos homínidos recientemente descubiertos son por lo tanto mucho más viejos que los hallazgos previos, pero ¿son suficientemente viejos para documentar los orígenes del bipedalismo? Los restos fragmentarios incluyen huesos de las piernas y los pies de dichas criaturas, y los antropólogos debaten actualmente qué es lo que nos dice el material conservado acerca de la postura de estos primeros homínidos. A pesar de ello, muchos antropólogos tienen grandes esperanzas en el material procedente de este período de tiempo porque estudios de ADN de humanos y otros primates indican que estos restos derivan de un período crucial en la evolución humana.

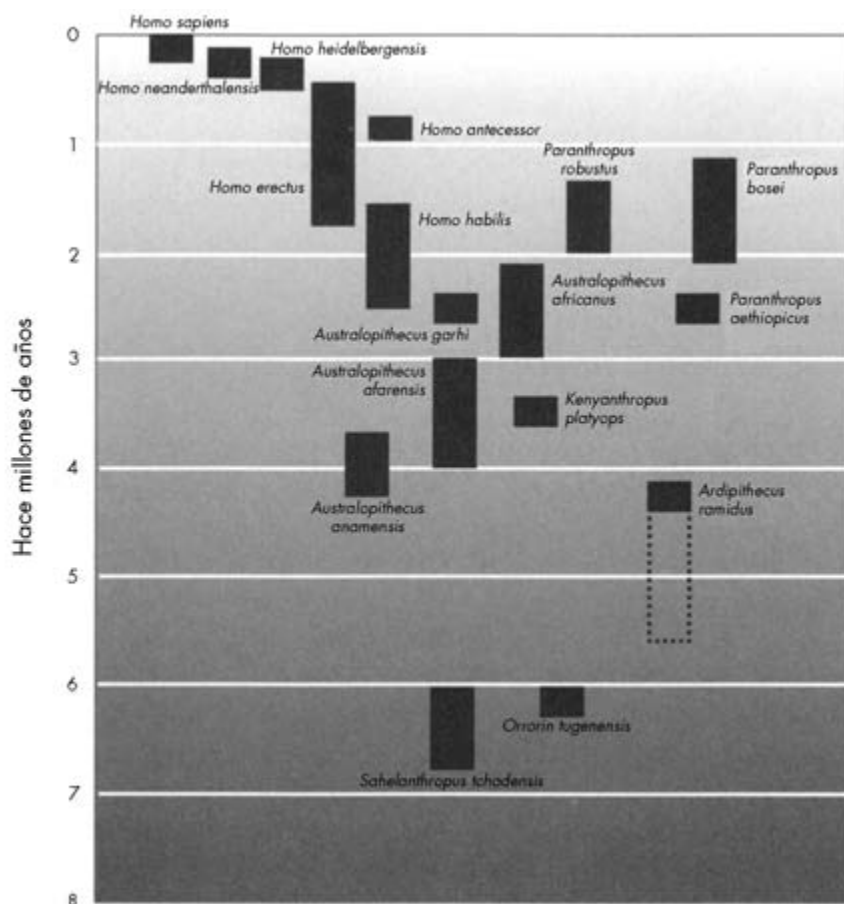


FIGURA 7.4. Fechas de varios tipos de homínidos diferentes, basadas en una figura de Bernard Word, «Hominid Revelations in Chad» en *Nature* 418 (2002): 134-136. Las barras indican el período de tiempo durante el que probablemente vivieron los diversos tipos de homínidos. Los homínidos recientemente descubiertos *Ardipithecus*, *Orrorin* y *Sahelanthropus* son significativamente más viejos que los homínidos previamente conocidos, y probablemente proceden de la época en que los ancestros de los humanos empezaron a caminar erguidos.

Sección 7.4: Midiendo relaciones con ADN

Al igual que los fósiles que se encuentran dentro de la tierra, el ADN que hay dentro de todo organismo vivo contiene información útil sobre la historia de la vida. A medida que los métodos de la biología molecular han ido avanzando y mejorando, los análisis de dichas moléculas han llegado a desempeñar un papel cada vez más importante en los estudios del pasado. Aunque queda aún mucho trabajo por hacer antes de que los datos moleculares puedan tener siquiera una oportunidad de proporcionar medidas de edad que sean tan fiables como otros métodos, los desarrollos recientes son muy prometedores.

La doble hélice del ácido desoxirribonucleico, o ADN, es un icono familiar en biología. Estas moléculas existen en casi todas las células de nuestro cuerpo y están compuestas de dos hebras espirales entrelazadas conectadas por una secuencia de pares de bases, cada uno constituido por un par de nucleótidos. Hay cuatro nucleótidos diferentes en el ADN: adenina, timina, citosina y guanina, que normalmente se representan por las letras A, T, C y G. La secuencia de pares de bases codifica la información que necesita una célula para funcionar e interactuar con otras células en un organismo vivo. Por ejemplo, ciertas partes de la secuencia proporcionan instrucciones para hacer diversas proteínas, mientras que otras partes determinan cuándo deberían hacerse dichas proteínas.

Los nucleótidos tienen propiedades químicas específicas tales como que la adenina y la timina siempre están emparejadas a lo largo de las hebras, como también lo están la citosina y la guanina. Esto significa que si una hebra contiene la serie ACTTGCT, la otra hebra debe contener la secuencia TGAACGA. Cada una de las dos hebras de la molécula de ADN contiene así esencialmente la misma información. Normalmente esta información está encerrada dentro de las espiras de la doble hélice, pero la maquinaria dentro de nuestras células puede separar estas dos hebras cuando es necesario para que se pueda leer la información del interior. Además, todos los datos en la molécula de ADN pueden replicarse separando las dos hebras y utilizando cada una de ellas como una plantilla para la construcción de una copia idéntica de la molécula original. Este proceso ocurre de forma natural cada

Potasio, argón, ADN y la marcha erguida 141

vez que se divide una célula, de modo que cada una de las células conserva un conjunto completo de las instrucciones que requiere para funcionar. Del mismo modo, la información codificada en el ADN de todo organismo se deriva del ADN de sus padres y es heredada por el ADN de su descendencia.

Con el tiempo, a medida que el ADN pasa de una generación a otra, la secuencia de pares de bases cambia. Estos cambios se denominan mutaciones, y pueden ocurrir debido a errores en el proceso de replicación o porque la propia molécula de ADN sufre algún daño. Al cambiar la información codificada en el ADN, estas mutaciones pueden cambiar el funcionamiento de algunas células y, en definitiva, alterar las características físicas del organismo. Suponiendo que el cambio no mate a la célula o al organismo, el ADN mutado puede ser heredado por generaciones futuras de células y organismos. Finalmente, este ADN mutado mutará de nuevo, y de nuevo dicho cambio puede transmitirse a nuevas células. A medida que las mutaciones en el ADN se acumulan durante muchas generaciones, las criaturas que descienden de un único organismo pueden adquirir características muy diferentes. De hecho, es probable que todos los seres vivos en la Tierra desciendan de un ancestro común, y la diversidad de vida que vemos ahora es el resultado de un enorme número de mutaciones durante miles de millones de años.

La acumulación de mutaciones no es sólo responsable de producir la gran diversidad de vida en la Tierra, sino que también nos permite descubrir relaciones entre organismos diferentes. Las mutaciones son sucesos relativamente raros y cuasi-aleatorios, y es improbable —aunque en absoluto imposible— que la misma mutación ocurra dos veces en organismos diferentes. Además, una vez que ha ocurrido una mutación, es poco probable que un organismo con dicha mutación regrese al mismo estado exacto que sus ancestros pre-mutación. Esto significa que, a medida que se acumulan las mutaciones, el número de diferencias entre secuencias del ADN tiende a aumentar con el tiempo, y por ello dos organismos con un ancestro común reciente tienen más similitudes que dos organismos con un ancestro común más antiguo. Por consiguiente, podemos hacernos una idea de la historia de familia de los organismos estudiando sus similitudes y diferencias.

142 Orígenes

Durante muchas décadas los biólogos han utilizado la distribución de diversas características físicas para inferir relaciones entre organismos e investigar las pautas y procesos que hay tras la evolución de dichos rasgos. Hoy día, gracias a una tecnología que puede leer de forma eficiente la secuencia de nucleótidos en moléculas del ADN, los biólogos pueden comparar largas secuencias de nucleótidos de criaturas diferentes. Estos nuevos datos proporcionan nuevas y fascinantes ideas sobre las relaciones entre los organismos. De hecho, estas secuencias de ADN pueden proporcionar un método nuevo e independiente de estimar cuánto tiempo hace que criaturas emparentadas —tales como los chimpancés y los humanos— empezaron a divergir.

Las variaciones en las secuencias de ADN permiten a los biólogos medir las diferencias entre organismos de una manera más cuantitativa de lo que antes era posible. Es casi imposible determinar si un roble o un olmo son «más diferentes» entre sí que los perros y los gatos sobre la sola base de sus apariencias. El hecho de que los gatos caen siempre de pie mientras que los perros no lo hacen, ¿les hace tener una relación menos estrecha que la que tienen el olmo y el roble, o las diferentes formas de las hojas del olmo y las del roble significan que hay más generaciones que los separan que las que separan a gatos y perros? Las dificultades con este tipo de indagación son obvias. Sin embargo, dentro de la molécula de ADN todas estas diferencias se reducen a la adición, eliminación, movimiento y sustitución de un número discreto de nucleótidos. Por consiguiente, es posible contar el número de diferencias entre especies en las hebras de su ADN. Si quisiéramos, podríamos ver cuántas veces la secuencia de ADN de un gato tenía una A donde un perro tenía una T, y luego encontrar el número de lugares en donde un roble tiene una A allí donde un olmo tiene una T. Comparando estos o cualquiera de muchos otros parámetros posibles, podríamos hacer una afirmación realmente cuantitativa sobre las diferencias entre robles y olmos y entre gatos y perros. Estos datos cuantitativos son esenciales para cualquier intento de estimar edades con datos biológicos procedentes de animales modernos.

El número de diferencias entre dos secuencias de ADN es una medida de cuántas mutaciones han ocurrido en las dos secuencias desde que divergieron de un ancestro común, de modo que esperamos que

Potasio, argón, ADN y la marcha erguida 143

este número será cada vez mayor con el paso del tiempo. Además, si suponemos que las mutaciones se acumulan a un ritmo constante, entonces este número es también proporcional al tiempo que ha transcurrido desde que los dos organismos compartieron por última vez un ancestro común. Por ejemplo, un fragmento de ADN en los osos polares difiere en un 1 % del encontrado en los osos pardos, mientras que la misma secuencia difiere en un 3 % en lobos y coyotes. Si es válida la hipótesis anterior, podemos deducir que los ancestros de los lobos y los coyotes han tenido un tiempo tres veces mayor para acumular mutaciones, de modo que si los osos polares y los osos pardos compartieron por última vez un ancestro común hace aproximadamente medio millón de años, podemos estimar que el último ancestro común de lobos y coyotes vivió en algún momento entre hace uno y dos millones de años.

Los seres vivos son mucho más complicados que los isótopos nucleares, y es razonable cuestionar si sus mutaciones se acumulan siempre a un ritmo fijo o incluso calculable. Aunque es cierto que queda aún mucho trabajo por hacer antes de que pueda asegurarse la fiabilidad de este método, hay algo alentador en la evidencia disponible. Muchos animales utilizan la misma maquinaria celular básica para leer, reparar y copiar sus moléculas de ADN, de modo que todas estas criaturas deberían ser susceptibles a mutaciones por igual. Además, mientras que la exposición a ciertas sustancias químicas tóxicas o a grandes dosis de radiación puede acelerar enormemente el ritmo de mutación en los organismos, tales condiciones extremas apenas ocurrían en el pasado lejano. Por consiguiente, cabría esperar razonablemente que las mutaciones ocurrieran a aproximadamente el mismo ritmo en todos los organismos. Exploraremos esta hipótesis con más detalle en el próximo capítulo, pero aquí debemos abordar un problema mucho mayor con la datación molecular, un problema que tiene que ver con la selección natural.

Las mutaciones no pueden acumularse a menos que se transmitan a otra generación, pero con frecuencia la probabilidad de que esto ocurra implica interacciones complejas entre los organismos y su ambiente. Por ejemplo, imaginemos una mutación que hace que un conejo tenga una piel blanca en lugar de una piel oscura. Si el conejo viviera en un

144 *Orígenes*

bosque, destacaría entre la maleza y sería una presa fácil. Pocos o ninguno de los descendientes de este conejo infeliz sobrevivirían para transmitir la mutación. Sin embargo, si viviera en el Ártico estaría bien camuflado y es muy probable que tuviera una importante descendencia. Así, este tipo de mutaciones será transmitido a través de las generaciones a ritmos diferentes dependiendo de la situación concreta. Aunque tales variaciones son de gran interés para los biólogos, estas mutaciones no van a ser evidentemente los marcadores de tiempo más ideales.

Por fortuna, hay también mutaciones que son «silentes», lo que significa que no tienen ningún impacto discernible en la apariencia física o en la capacidad de supervivencia de la criatura. Las mutaciones silentes son posibles porque los organismos no utilizan normalmente toda la información codificada en sus secuencias de ADN. De hecho, aunque todavía no conocemos exactamente qué significa toda la información codificada en el ADN de cualquier criatura, algunas mutaciones pueden identificarse claramente como silentes porque gran parte de la información útil está contenida en segmentos de ADN con ciertas características reconocibles.

Por ejemplo, una porción importante de nuestro ADN contiene instrucciones para hacer diversas proteínas, grandes moléculas formadas por largas cadenas de sustancias químicas llamadas aminoácidos. Las proteínas son moléculas versátiles, y proteínas diferentes pueden tener propiedades químicas muy diferentes dependiendo de la secuencia de aminoácidos que contengan, de modo que las proteínas son responsables de la mayoría de los procesos químicos complejos que permiten que funcione una célula o un organismo. Los datos requeridos para hacer proteínas están empaquetados en segmentos de ADN conocidos como genes. Cada gen contiene una secuencia de nucleótidos que codifica la secuencia de aminoácidos requerida para hacer una proteína particular. Para que la célula sea capaz de traducir esta información en una proteína funcional, necesita que las regiones que la flanquean, localizadas a uno y otro lado de la secuencia que codifica la proteína, le digan dónde está la información relevante. Estas regiones contienen secuencias de nucleótidos características (véase Figura 7.5) que dicen a las máquinas moleculares relevantes dónde empezar y dejar de leer el ADN.

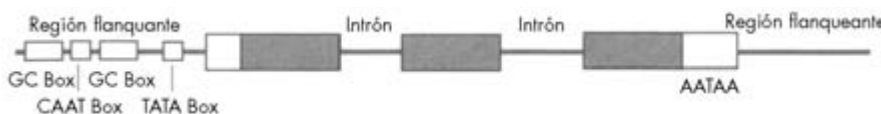


FIGURA 7.5. La estructura general de un gen (basada en una figura de *Molecular Genetics* de Li). Sólo las regiones sombreadas contienen la información para fabricar la proteína. Entre estas regiones están los intrones, que son ignorados cuando se hace la proteína. Hay también regiones flanqueantes, que contienen varias secuencias características que permiten que la maquinaria de la célula identifique dónde está localizada la información útil.

Del mismo modo, los biólogos utilizan estas regiones flanqueantes para identificar todos los genes en un fragmento dado de ADN. El caso es que en humanos y otros mamíferos sólo una pequeña fracción del ADN —aproximadamente un 5 %— está en forma de genes funcionales. Una porción del ADN restante sigue teniendo alguna utilidad. Por ejemplo, se cree que hay secuencias de ADN que regulan cuándo son leídos los diferentes genes. Sin embargo, buena parte de este material puede ser alterado sin tener ningún efecto apreciable en la célula o el organismo. Parte de este ADN ha sido identificado incluso como «genes rotos», antiguos genes con mutaciones en las regiones codificadoras y flanqueantes que hacen estas secuencias de ADN imposibles de leer. Las mutaciones en estas regiones no deberían tener ningún impacto apreciable en la salud o la apariencia de los organismos.

Incluso dentro de los propios genes hay regiones en las que cambios en el ADN no afectan a la estructura de la proteína. Éstos son fragmentos de ADN llamados intrones que no se utilizan en el ensamblaje de una proteína. Además, hay redundancias en el código genético, de modo que varias secuencias diferentes de ADN pueden corresponder a la misma secuencia exacta de aminoácidos. Por ello, muchas mutaciones dentro de los intrones o entre secuencias redundantes deberían ser también silentes.

Puesto que las mutaciones silentes no afectan a la interacción de los organismos con el entorno, tanto la probabilidad de que se dé la mutación como la probabilidad de que se transmita no deberían depender de dónde o cómo vive la criatura. Por lo tanto, es más probable que se acumulen estas mutaciones a un ritmo constante y, por exten-

146 Orígenes

sión, ofrezcan estimaciones de edad razonables. Por supuesto, la única manera de evaluar la fiabilidad de esta técnica es examinar datos reales procedentes de organismos reales.

Sección 7.5: Pautas en las mutaciones de humanos y simios

Los humanos y otros primates han proporcionado un test útil para determinar si el ritmo de acumulación de mutaciones silentes puede ser suficientemente estable para servir como marcador de tiempo. Su ADN ha sido estudiado durante muchos años, y recientemente los biólogos moleculares Feng-Chi Chen y Wen-Hsiung Li publicaron un artículo sobre este tema. Tomaron ADN de un humano, un chimpancé, un gorila y un orangután y obtuvieron las secuencias de cincuenta y tres regiones silentes o no codificadoras (para un total de 24.234 pares de bases de cada animal). Luego buscaron un tipo concreto de mutación conocida como mutación de sustitución puntual. Estas mutaciones ocurren cuando un único par de bases es reemplazado por otro par de bases, por ejemplo cuando la secuencia ACTG se convierte en ACCG. Cambios de este tipo se cuantifican en términos de la fracción de nucleótidos que difiere entre las dos secuencias. Por ejemplo, las secuencias:

ATTTCGCTAGCTAGTCGACGACTTCGATCAGCTAGCAGG-
CATCTGACGAGCT

y

ATATCGCTAGCTAGTCGACGACTTGGAGCAGCTAGCAG-
GAATCTGATGAGCT

tienen nucleótidos diferentes en cinco de las cincuenta posiciones, de modo que la diferencia entre estas dos secuencias es del 10%.*

* En la práctica, el análisis es más complicado porque algunos nucleótidos pueden estar ausentes en una de las secuencias, lo que hace más difícil alinear adecuadamente las dos cadenas de letras. Además, debemos tener en cuenta la posibilidad de que ciertos pares de bases hayan sufrido más de una mutación.

TABLA 7.1. Diferencias genéticas entre humanos, chimpancés, gorilas y orangutanes. Medidas por Chen y Li.

humano-chimpancé	humano-gorila	humano-orangután
1,24 %	1,62 %	3,08 %
	chimpancé-gorila	chimpancé-orangután
	1,63 %	3,13 %
		gorila-orangután
		3,09 %

Con cuatro animales se pueden medir seis diferencias: humano-chimpancé, humano-gorila, humano-orangután, chimpancé-gorila, chimpancé-orangután y gorila-orangután. Chen y Li calcularon todas estas diferencias (Tabla 7.1). A partir de estos seis números podemos deducir las relaciones entre estos simios y también argumentar que el ritmo de acumulación de mutaciones no cambió de modo apreciable entre los diferentes animales.

Reconstruyamos primero las relaciones entre estos animales, suponiendo que ellos y sus ancestros acumularon mutaciones a un ritmo constante. Las relaciones entre animales se representan normalmente mediante un gráfico llamado dendrograma o árbol filogenético, tal como éste:

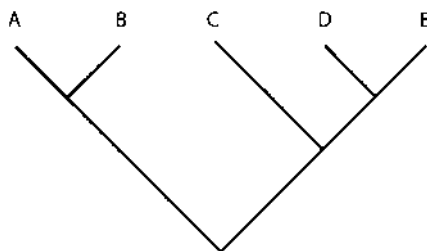


FIGURA 7.6.

Las letras en la parte superior del gráfico indican un conjunto de cinco animales que viven hoy, y las líneas de ramificación ilustran la ascendencia de cada uno de estos organismos. En el pasado reciente todos ellos tenían ancestros distintos, representados por las cinco líneas separadas que llevan a cada letra. Sin embargo, todas estas criaturas derivan en última instancia de un único ancestro común, repre-

148 Orígenes

sentado aquí por el punto en la parte inferior de la gráfica. En medio, los descendientes de este ancestro común adquirieron mutaciones que les separaron de sus parientes. En este caso, los ancestros de las criaturas A y B divergieron de los ancestros de las criaturas C, D y E bastante pronto, mientras que los ancestros de las criaturas D y E divergieron unos de otros sólo recientemente.

Podemos empezar a construir un árbol filogenético para los grandes simios en el estudio de Chen y Li notando que la menor de las seis diferencias es la que hay entre el humano y el chimpancé. Esto implica que estos dos animales han tenido la menor cantidad de tiempo para acumular diferencias, de modo que los ancestros de chimpancés y humanos deben haber divergido después de cualquier división que implique a gorilas u orangutanes. Podemos representar su relación de esta forma:



FIGURA 7.7.

A continuación, observamos que chimpancés y humanos tienen menos diferencias con los gorilas (aproximadamente un 1,6%) que con los orangutanes (aproximadamente el 3,1%), de modo que la divergencia entre los ancestros de chimpancés y humanos y los ancestros de los gorilas ocurrió más recientemente que la separación de los ancestros de los orangutanes. Humanos, chimpancés y gorilas comparten así una ascendencia común que se ilustra mediante el siguiente árbol:

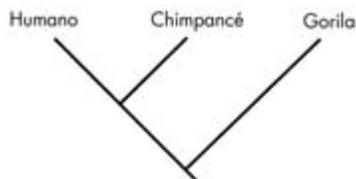


FIGURA 7.8.

Esto deja fuera a los orangutanes, que son los animales que más se distinguen en este estudio. Los ancestros de los orangutanes deben haber estado acumulando mutaciones distintas durante el mayor período de tiempo, de modo que son el primer grupo en ramificarse del ancestro común de todos estos animales, como se ilustra en el árbol filogenético completo:

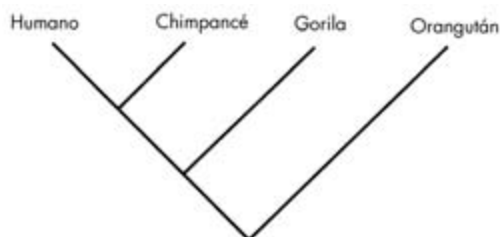


FIGURA 7.9.

Esta gráfica codifica una breve historia de los grandes simios, que empieza con una especie de primate que finalmente daría lugar a los humanos, chimpancés, gorilas y orangutanes. En algún momento del pasado algunos descendientes de este grupo empezaron a adquirir las mutaciones que con el tiempo se convertirían en los rasgos distinguibles de los orangutanes, tales como cuencas oculares muy juntas. Mientras, un grupo diferente de descendientes adquirió mutaciones que produjeron las características visibles en los gorilas, chimpancés y humanos. Más tarde, este segundo grupo de animales se dividió en dos grupos, uno que dio lugar a los gorilas y otro que formaron los ancestros de chimpancés y humanos. Finalmente, los ancestros de humanos y de chimpancés divergen, y cada uno adquiere mutaciones distintivas. Aunque es probable que hubiera muchos otros sucesos de ramificación similares a los tres indicados en esta gráfica, ninguno de estos sucesos produjo descendientes que hayan sobrevivido hasta hoy.

El diagrama anterior se ha generado suponiendo que todos estos animales acumularon mutaciones al mismo ritmo. Podemos comprobar si realmente fue así echando una mirada más detallada a las diferencias medidas. Si los ancestros de los humanos acumularon muta-

150 Orígenes

ciones *más rápidamente* que los ancestros de los chimpancés, entonces la diferencia medida entre humanos y gorilas debería ser mayor que la diferencia entre chimpancés y gorilas, pero esto no es compatible con los datos. Estos datos indican más bien que la diferencia entre humanos y gorilas es casi idéntica a la diferencia entre chimpancés y gorilas, de modo que los ancestros de humanos y chimpancés parecen haber estado acumulando mutaciones casi al mismo ritmo. Asimismo, puesto que gorilas, chimpancés y humanos difieren del orangután en aproximadamente un 3,1 %, los ancestros de estos animales también parecen haber adquirido mutaciones al mismo ritmo. Aunque esto no demuestra absolutamente que el ritmo de acumulación de mutaciones fuera constante, sí tiende a apoyar esta idea. De lo contrario, sería una gran coincidencia que estos tres diferentes primates en tres diferentes ambientes se las arreglaran para acumular un número de mutaciones equivalente en el mismo período de tiempo. Investigaciones más recientes han encontrado que los ritmos de mutación entre los ancestros de los grandes simios diferían ligeramente, pero las variaciones son suficientemente pequeñas (de un 10 % como mucho) para que podamos ignorarlas aquí.

Dado que los grandes simios parecen haber acumulado mutaciones a un ritmo aproximadamente constante, podemos intentar hacer uso de estos datos para estimar cuándo ocurrieron realmente las diversas divisiones y, en consecuencia, cuándo nuestros ancestros adquirieron por primera vez la capacidad de caminar erguidos. Ya hemos visto que puesto que el número de diferencias entre chimpancés y humanos es menor que el número de diferencias entre orangutanes y humanos, los ancestros de chimpancés y humanos deben haberse separado más recientemente que los ancestros de humanos y orangutanes. Ahora seremos más concretos. La diferencia entre chimpancés y humanos (1,24 %) es aproximadamente dos quintos de la diferencia entre orangutanes y humanos (3,08 %), de modo que la separación chimpancé-humano debe ser más reciente en la misma proporción que la separación del orangután. Integrando esta información adicional en el árbol, obtenemos este diagrama:

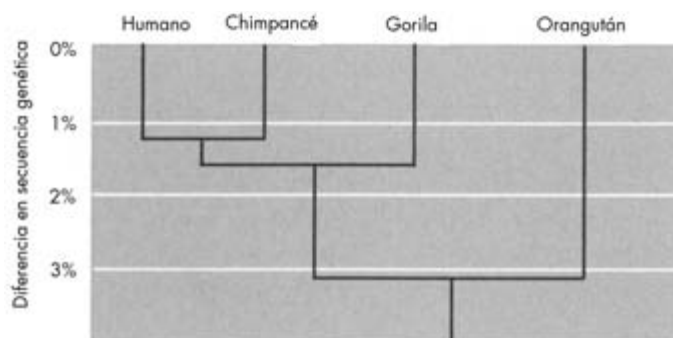
Potasio, argón, ADN y la marcha erguida 151

FIGURA 7.10.

Aquí, las líneas horizontales representan unidades iguales de tiempo, y las posiciones de las diversas ramificaciones indican cuándo ocurrieron estos sucesos. A la izquierda están las diferencias porcentuales en las secuencias de genes. En esta figura la línea del orangután se separa inmediatamente antes del momento correspondiente a la diferencia del 3%, y las líneas de humanos y chimpancés se separan un poco antes del momento que da una diferencia del 1%. Por supuesto, aún necesitamos averiguar cuántos años se necesitan para acumular una variación dada. Quizá en el futuro sea posible calcular las escalas de tiempo relevantes sobre la base de la biología molecular de los organismos relevantes, pero eso no es posible de momento. Por ahora, los ritmos de acumulación de mutaciones se estiman sobre la base del registro fósil.

Aunque el registro fósil de humanos, chimpancés y gorilas aún no ofrece información suficiente para decir cuándo divergieron exactamente los ancestros de los otros simios, los orangutanes son otra historia. Los paleontólogos han encontrado fósiles de un animal llamado *Sivapithecus* cuyo cráneo tiene algunas características —tales como cuencas oculares muy juntas y colmillos de tamaño variable— que ahora sólo se ven en los orangutanes de entre los grandes simios. Estas similitudes indican que el *Sivapithecus* se deriva de la misma línea de animales que dio lugar a los orangutanes modernos. Estos fósiles se han encontrado en depósitos que datan de hace unos doce millones de años, de modo que los ancestros de los orangutanes deben haber em-

152 Orígenes

pezado a adquirir sus rasgos distintivos en algún momento *anterior* a esto.

Otra información sobre el origen de los orangutanes ha sido extraída de un animal fósil llamado *Procónsul*. Este animal tiene características compartidas por todos los grandes simios —por ejemplo, carece de cola— pero no tiene ninguna de las características que son únicas de los chimpancés, humanos, gorilas u orangutanes. Por consiguiente, esta criatura existió probablemente antes de que cualquiera de los ancestros de los simios ahora vivientes adquiriera estas características distintivas. Esta bestia se ha encontrado en depósitos de hace veinte millones de años, de modo que los ancestros de los orangutanes adquirieron probablemente sus características distintivas en algún momento *posterior* a esto.

En conjunto, la existencia del *Sivapithecus* hace doce millones de años y la del *Procónsul* hace veinte millones de años sugieren con fuerza que los ancestros de los orangutanes divergieron de los ancestros de los otros simios hace unos dieciséis millones de años, millón más o menos. Puesto que se necesitan dieciséis millones de años para que los orangutanes y otros simios adquieran diferencias del 3,1 % en estas secuencias de ADN, las diferencias entre dos líneas de grandes simios deben aumentar a un ritmo de aproximadamente un 1 % por cada cinco millones de años, lo que nos permite finalmente poner una escala de tiempo adecuada a nuestro árbol de familia de los grandes simios.

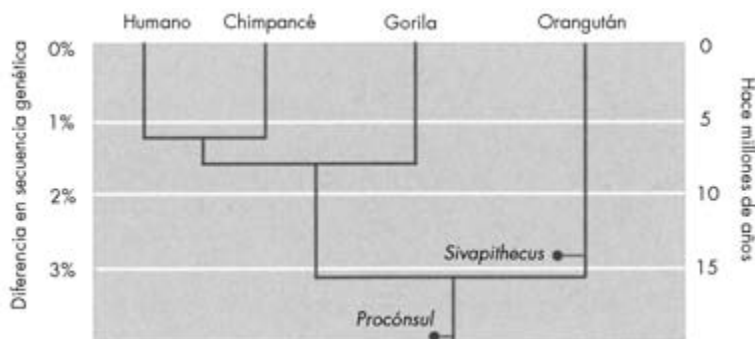


FIGURA 7.11.

Además, podemos estimar que las líneas que llevan a los humanos y chimpancés —que hoy difieren en aproximadamente un 1,24%— empezaron a divergir hace 6,5 millones de años aproximadamente. Este tipo de análisis se ha hecho muchas veces utilizando métodos similares pero combinaciones diferentes de primates y calibradores fósiles, y los resultados son habitualmente los mismos.

En conjunto, las pruebas molecular y fósil sugieren que los antropólogos están en el umbral de hacer un descubrimiento muy excitante. Los fósiles de *Australopithecus* muestran que nuestros ancestros eran ya capaces de caminar sobre dos piernas hace 4,5 millones de años. Mientras, los datos moleculares indican que nuestros ancestros empezaron a adquirir rasgos distintivamente humanos —como el bipedalismo— sólo entre seis y siete millones de años atrás. Por consiguiente, los primeros homínidos en caminar habitualmente sobre dos piernas deben haber vivido hace alrededor de cinco o seis millones de años.

Los fósiles recientemente descubiertos *Ardipithecus*, *Orrorin* y *Sahelanthropus* datan de este período de tiempo crítico. Por ahora, el material disponible es todavía demasiado fragmentario para documentar claramente las primeras etapas del bipedalismo homínido, pero a medida que se encuentren más restos de estos u otros antiguos homínidos similares cabe esperar que documenten cuándo, dónde y cómo empezaron a andar erguidos nuestros ancestros. Tales hallazgos serían una bendición para el estudio de la evolución de humanos y primates y también para validar los métodos moleculares de medida del paso del tiempo. Por supuesto, fósiles más completos de estos animales también podrían sorprendernos y quizá obligarnos a reevaluar nuestra relación con los otros simios. En cualquier caso, el futuro de este campo debería ser muy interesante.

Más allá del estudio de los orígenes humanos, los nuevos datos de secuencias genéticas están teniendo también un impacto importante en muchas otras áreas de la biología y la paleontología. Por ejemplo, los datos moleculares pueden ofrecer claves importantes sobre las interrelaciones y orígenes de grupos modernos de mamíferos tales como murciélagos, roedores, primates y ballenas. Como veremos en el capítulo siguiente, este tipo de investigación requiere técnicas analíticas mucho más sofisticadas para tratar la gran cantidad de datos de se-

154 Orígenes

cuencias de ADN implicadas así como las divergencias relativamente grandes entre organismos. La fiabilidad de estos métodos es algo incierta por el momento, pero aún pueden proporcionar datos intrigantes y pueden dar con el tiempo una imagen más clara de la evolución de los mamíferos durante el final de la era de los dinosaurios.

Sección 7.6: Lecturas adicionales

Para información sobre la evolución humana a un nivel divulgativo, consultar Ian Tattersall y Jeffrey Schwartz, *Extinct Humans* (Westview Press, 2000) y Carl Zimmer, *Smithsonian Intimate Guide to Human Origins* (Smithsonian Books, 2005). Una buena fuente en la web con muchos enlaces es www.talkorigins.org/faqs/homs/. Para más detalles, consultar Glenn C. Conroy, *Reconstructing Human Origins* (W. W. Norton, 1997).

Para información detallada sobre los antiguos homínidos recientemente descubiertos, véase el artículo B. Word, «Hominids Revelations from Chad» en *Nature* 418 (2002): 133-136. Discusiones posteriores sobre estos primeros homínidos pueden encontrarse en K. Galik *et al.*, «External and Internal Morphology of the BAR 1002'00 Orrorin tugenensis fémur» en *Science* 305 (2004): 1450-1453, y T. D. White *et al.*, «Asa Issie, Aramis and the origin of Australopithecus» en *Nature* 440 (2006): 883-889.

Para la datación por potasio-argón, véase R. E. Taylor y M. J. Aitken, *Chronometric Dating in Archaeology* (Plenum Press, 1997), capítulo 4. También puede encontrarse un bonito tratamiento en libros de texto de geología como Brian J. Skinner y Stephen C. Porter, *The Dynamic Earth*, 2.^a ed. (John Wiley and Sons, 1992).

Para las ideas básicas de la genética, un buen lugar donde empezar es Larry Gonick y Mark Wheeler, *The Cartoon Guide to Genetics* (Perennial Press, 1991).

Algunos libros sobre la reconstrucción de relaciones a partir de datos genéticos a un nivel universitario son Wen-Hsiung Li, *Molecular Evolution* (Sinauer, 1997) y M. Nei y S. Kumar, *Molecular Evolution and Phylogenetics* (Oxford University Press, 2000).

Potasio, argón, ADN y la marcha erguida 155

Para los detalles del análisis genético citado en este capítulo, véase Feng-Chi Chen y We-Hsiung Li, «Genomic Divergences between Humans and Other Hominids» en *American Journal of Human Genetics* 68 (2001): 444-456. Para un análisis más reciente del ADN de grandes simios, véase Navin Elango *et al.*, «Variable molecular clocks in hominoids» en *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103 (2006): 1370-1375.

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes

Hace aproximadamente sesenta y cinco millones de años tuvieron lugar una serie de sucesos que culminaron en uno de los cambios más drásticos en la historia de la vida sobre la Tierra. Una intensa actividad volcánica en lo que iba a convertirse en la India liberó probablemente grandes cantidades de gases tóxicos en la atmósfera, y un meteorito de unos 10 kilómetros de diámetro se estrelló en el borde norte de la península de Yucatán, con el resultado de una devastación general. Estos sucesos catastróficos, quizá en combinación con procesos a más largo plazo que incluyen enfermedades o cambios climáticos, sometieron la biosfera a una gran tensión. Durante estos tiempos difíciles se extinguieron los últimos de los grandes dinosaurios como el *Triceratops* y el *Tyrannosaurus*, junto con pterosaurios, mosasaurios, plesiosaurios y muchas otras criaturas.

Mientras que esto marcó el final de la era de los dinosaurios gigantes, fue el principio de una nueva era para los mamíferos. Antes de los sucesos de hace sesenta y cinco millones de años los mamíferos eran criaturas tipo musaraña, generalmente pequeñas, aunque algunas eran tan grandes como un perro de tamaño mediano. Después de eso se convirtieron en parte importante de muchos ecosistemas y diferentes grupos de mamíferos adquirieron una gran variedad de rasgos especializados, incluidos pezuñas, garras, aletas e incluso alas. La evidencia fósil revela que buena parte de este gran aumento en la diversidad sucedió de un modo relativamente rápido, en menos de diez millones de años

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 157

tras el impacto del meteorito. Los mamíferos que sobrevivieron al impacto del meteorito se difundieron probablemente por múltiples entornos, y a medida que grupos diferentes se adaptaron a situaciones diferentes, desarrollaron una variedad de características diferentes.

Esta era formativa en la evolución de los mamíferos promete ofrecer muchas ideas sobre cómo responden grupos de animales a cambios en los ecosistemas del mundo. Sin embargo, los mismos cambios que hacen tan interesante este período de tiempo, hacen también que su estudio constituya un desafío. El registro fósil sólo conserva los restos de algunas de las criaturas que vivieron en un lugar dado en un momento dado. Las características físicas distintivas en los restos fósiles suelen ofrecer información suficiente para documentar las relaciones entre criaturas procedentes de depósitos diferentes, lo que permite a los paleontólogos trazar la historia de diferentes grupos de animales. Sin embargo, hay pocas relaciones que puedan utilizarse para vincular los mamíferos tipo musaraña del final de la era de los dinosaurios con grupos concretos de mamíferos posteriores como roedores o primates, así que las relaciones entre estos primeros mamíferos son bastante inciertas. Mientras los paleontólogos siguen descubriendo fósiles de este importante período de tiempo, otros biólogos están intentando rastrear los orígenes y la historia de los mamíferos modernos utilizando el ADN de animales vivos para estimar las edades de varias ramas del árbol de familia de los mamíferos.

Sección 8.1: La diversidad de los mamíferos

Antes de que empecemos a investigar la historia de los mamíferos debemos familiarizarnos primero con los diferentes tipos de mamíferos que viven hoy. Hay miles de especies diferentes de mamíferos vivos, con una amplia variedad de tamaños y formas: gatos, perros, personas, osos, armadillos, murciélagos, ratas, ratones, cobayas, cabras, vacas, hipopótamos, ballenas, caballos, osos hormigueros, erizos, monos, manatíes, cerdos hormigueros, por nombrar sólo unos pocos.

Para los biólogos modernos, estos y otros atributos en común no sólo proporcionan un modo de distinguir a los mamíferos de otros or-

158 Orígenes

ganismos sino que también revelan algo sobre los ancestros de estos animales. Características como la piel cubierta de pelo aparecieron debido a una serie de mutaciones en el código genético de varios organismos que se transmitieron a sus descendientes. Si muchos animales tienen un rasgo similar, entonces o bien todos ellos heredaron este rasgo de un ancestro común que tenía dicha característica, o bien las mutaciones responsables del rasgo se dieron más de una vez en organismos diferentes. Puesto que las mutaciones ocurren casi aleatoriamente a lo largo del ADN de un organismo, las probabilidades de que las mutaciones concretas responsables de un rasgo particular ocurran más de una vez son pequeñas. Por consiguiente, características compartidas debidas a mutaciones sugieren un ancestro común.

Aunque los rasgos comunes pueden proporcionar pruebas de las relaciones entre organismos, debemos tener cuidado en contemplar la posibilidad de convergencia. Si se colocan organismos lejanamente relacionados en ambientes similares, entonces rasgos similares pueden ser ventajosos para la supervivencia de ambos organismos y sus descendientes. Por ejemplo, un conejo y un zorro que vivan en el Ártico encontrarán preferible una piel blanca durante el invierno. Esto significa que las mutaciones que producen una piel invernal blanca tendrán una gran probabilidad de ser transmitidas a lo largo de las generaciones entre los descendientes del conejo o del zorro. Por consiguiente, los descendientes de estos dos animales podrían desarrollarse fácilmente con pieles blancas, no porque todos descendieran de un único animal de pelo blanco, sino más bien porque este rasgo era favorable para conejos y para zorros. Para distinguir los rasgos derivados de un ancestro común de los debidos a convergencia, los biólogos deben estudiar cuidadosamente muchas características y sus distribuciones entre organismos diferentes.

Además de sus pieles peludas, la capacidad de producir leche y sus altos metabolismos, todos los mamíferos comparten una variedad de características más sutiles que les separan de otros animales: la disposición de tres huesos minúsculos en nuestro oído medio no se encuentra en aves ni en reptiles, y los dientes de los mamíferos son en general mucho más complejos que los de otras criaturas. Todo esto es una buena prueba de que todos los mamíferos compartimos un ancestro

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 159

común particular y de que todos estamos más estrechamente relacionados entre nosotros que cualquiera de nosotros lo está con cualquier otro animal.

Además de mostrar que todos los mamíferos están relacionados, un estudio detallado de las características físicas ofrece también una manera de clasificar estas criaturas. Todos los mamíferos actuales pueden dividirse en tres grandes grupos: monotremas, marsupiales y placentarios. Los monotremas son mamíferos que ponen huevos, tales como el ornitorrinco o el equidna. Los marsupiales, tales como los canguros y los koalas, paren crías que se desarrollan dentro de la bolsa de su madre. Los mamíferos placentarios, que constituyen casi el 90% de los mamíferos actuales, llevan crías vivas y utilizan placentas para mantener al feto durante la gestación.

En este capítulo nos centraremos exclusivamente en los mamíferos placentarios, que se subdividen en aproximadamente veinte grupos llamados órdenes (Tabla 8.1). Los nombres de algunos de estos grupos pueden parecer extraños al principio, pero este esquema de clasificación no es ni mucho menos tan esotérico como podría sugerir la nomenclatura. Los animales en cada orden comparten varias características que les distinguen claramente de otros mamíferos y sugieren que pertenecen a la misma rama del árbol de familia de los mamíferos.

Uno de los subconjuntos más obvios de mamíferos placentarios es el de los murciélagos, los únicos mamíferos que pueden volar realmente. Todos los murciélagos tienen alas formadas por una membrana soportada por sus dedos muy alargados. Ningún otro mamífero tiene alas así, y esta característica por sí sola hace casi imposible confundir un murciélago con cualquier otro tipo de mamífero. Un estudio más detallado de su anatomía revela otras características únicas de los murciélagos, muchas de las cuales son adaptaciones a un vuelo enérgico. Por lo tanto, los murciélagos se colocan en su propio orden Chiroptera.

Otro agrupamiento familiar de mamíferos lo constituyen las ballenas y los delfines. Estos mamíferos pasan su vida en el agua. Tienen cuerpos aerodinámicos, largas colas con «aletas» horizontales al final, ningún miembro posterior externo y miembros delanteros conformados como aletas. Al igual que los murciélagos, estos mamíferos tienen su propio orden, llamado Cetácea.

160 Orígenes

TABLA 8.1. Órdenes de mamíferos placentarios exceptuando los Insectívora (véase Tabla 8.2). Números de especies basados en D. E. Wilson y D. M. Reeder, *Mammals of the World*, 2.^a ed. (Smithsonian Institution Press, 1993).

Órdenes	Número de especies	Incluye
Rodentia	1995	ratones, ardillas, cobayas
Lagomorpha	80	conejos, liebres
Chiroptera	925	murciélagos
Carnívora	280	osos, gatos, perros, comadrejas, focas
Primates	233	monos, simios, humanos
Cetácea	78	ballenas, delfines
Artiodactyla	215	vacas, cerdos, llamas, ciervos, ovejas
Perissodactyla	18	caballos, rinocerontes, tapires
Xenarthra	29	perezosos, osos hormigueros, armadillos
Pholidota	7	pangolines
Dermoptera	2	lémures voladores
Tubulidentata	1	cerdos hormigueros
Sirenia	4	manatíes, dugones
Hyracoidea	11	hyraxes
Proboscidea	2	elefantes
Macroscelidea	15	musarañas elefante
Scandentia	19	musarañas arborícolas

Algunos grupos de mamíferos se identifican más fácilmente por sus dientes. Muchos mamíferos, como ratones, ratas, ardillas y cobayas, tienen el mismo tipo de incisivos de gran tamaño, un par en cada una de sus mandíbulas superior e inferior. Estos dientes crecen durante toda su vida y adquieren un borde cincelado gracias a un constante desgaste. Los mamíferos con dientes como éstos se agrupan en el orden Rodentia. Otros mamíferos, tales como los conejos, tienen un conjunto similar de incisivos que crecen constantemente, pero también tienen otros dos incisivos en constante crecimiento en su mandíbula superior que no están presentes en los roedores. Por esta diferencia, entre otras, es por lo que los conejos y las liebres no se clasifican como roedores, sino que en su lugar se colocan en el orden separado Lagomorpha.

Otro grupo de mamíferos con dientes característicos incluye a gatos, perros, osos, comadrejas y focas. Por supuesto, los dientes más destacados en muchos de estos animales son sus colmillos. Sin embar-

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 161

go, también encontramos caninos grandes en babuinos y otros mamíferos, de modo que, aunque impresionantes, estos dientes no son útiles para la clasificación. En su lugar, debemos buscar más atrás en la boca, el último premolar en la mandíbula superior y el primer molar en la mandíbula inferior, que están especializados para actuar como un par de cizallas. Los animales con este rasgo se colocan en el orden Carnívora, así llamado porque la mayoría de sus miembros son carnívoros.

En lugar de por sus dientes, algunos grupos de mamíferos se distinguen por sus manos y pies. Por ejemplo, los monos, lémures y simios (humanos incluidos) tienen dedos oponibles y uñas en lugar de garras, al menos en el dedo gordo de los pies. También tendemos a tener grandes cerebros y ojos grandes. Estos rasgos permiten que estos mamíferos se coloquen en el orden Primates.

Otro tipo distintivo de pies son las pezuñas que encontramos en los caballos y las vacas. De hecho, hay dos tipos muy diferentes de animales con pezuñas cuyos pies tienen estructuras muy diferentes. En muchos animales con pezuñas, incluidos vacas, ovejas, cabras y cerdos, el eje del pie corre entre dos dedos, de modo que estos animales suelen tener un número par de pezuñas. Estos animales de pezuña hendida se agrupan en el orden Artiodactyla. Por el contrario, en caballos y rinocerontes el eje del pie corre a lo largo de un dedo, y estos animales suelen tener uno o tres dedos. Esto requiere una estructura de pie y tobillo significativamente diferente, de modo que estos animales de pezuña con dedos impares se colocan en un orden separado, Perisodactyla.

Hay un grupo de mamíferos que se distingue no por los dedos de las manos o los pies, sino por sus columnas vertebrales. Osos hormigueros, armadillos y perezosos son criaturas de aspecto muy extraño que proceden básicamente de América del Sur. Todos estos animales tienen un conjunto de rasgos distintivos en las vértebras inferiores de su columna que no se encuentran en otros mamíferos placentarios. Por consiguiente, se colocan en su propio orden, Xenarthra.

Ciertos tipos de animales poseen rasgos tan únicos que tienen sus propios órdenes. Los elefantes, por ejemplo, son los únicos ejemplos vivos del orden Proboscidea.

162 *Orígenes*

Tabla 8.2. Familias incluidas históricamente en el orden Insectivora. Números de especies basados en D. E. Wilson y D. M. Reeder, *Mammals of the World*, 2.^a ed. (Smithsonian Institution Press, 1993).

<i>Familia</i>	<i>Número de especies</i>	<i>Incluye</i>
Erinaceidae	21	erizos
Talpidae	42	topos
Soricidae	312	mayoría de las musarañas
Tenrecidae	24	tenrecs
Chrysochlorioidea	18	topos dorados
Aolwnosonrisae	2	solenodontes

Algunos mamíferos tienen similitudes superficiales con alguno de los grupos anteriores, pero en un examen más detallado se encuentra que carecen de las características diagnósticas de dichos grupos. Por ejemplo, los pangolines («osos hormigueros con escamas») y los cerdos hormigueros se parecen mucho a los osos hormigueros, y de hecho los tres animales se alimentan principalmente de hormigas y termitas. Sin embargo, ni los pangolines ni los cerdos hormigueros tienen en sus vértebras rasgos xenarthranos distintivos. Esto significa que ninguno de estos animales puede colocarse en el orden Xenarthra. Además, cada uno de estos animales tiene sus propios rasgos únicos. Los pangolines, por ejemplo, están cubiertos con grandes «escamas» que les hacen parecer piñas. Por consiguiente, a estos animales se les dan sus propios órdenes: Pholidota para los pangolines y Tubulidentata para los cerdos hormigueros.

De un modo similar, los hyraxes se parecen un poco a roedores del tamaño de un gato, pero estos mamíferos tienen cuatro incisivos en su mandíbula inferior y uñas parecidas a pezuñas que no se encuentran en un roedor, de modo que para ellos se creó el orden independiente Hyracoidea. Los manatíes y los dugones o vacas marinas, por el contrario, son completamente acuáticos y tienen una forma corporal similar a las ballenas. Sin embargo, son estrictamente herbívoros y tienen una trompa y unos dientes característicos específicamente adaptados para pastar la vegetación submarina. Se colocan en el orden Sirenia. Finalmente, están los llamados lémures voladores, un nombre doblemente equivocado porque estos animales no son lémures ni pueden volar realmente. Más bien planean gracias a una membrana peluda

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 163

que se extiende entre sus patas delanteras y traseras. También tienen extraños dientes delanteros dispuestos como pequeños peines. Estos animales inusuales se colocan en el orden Dermoptera.

Hay varios centenares de especies de mamíferos placentarios que no están incluidos en ninguno de estos órdenes. Son principalmente criaturas pequeñas tales como musarañas, topos y erizos. Todos estos animales estuvieron en otro tiempo colocados en un único orden, Insectívora, porque la mayoría de ellos comen insectos. Sin embargo, no hay rasgos distintivos comunes a todos los miembros de este grupo, y hace tiempo que se ha reconocido que este «orden» podría ser sólo un cajón de sastre para varios grupos diferentes de animales. De hecho, ahora es generalmente aceptado que las musarañas elefante, que tienen una trompa larga y flexible, y las musarañas arborícolas, similares a ardillas, pertenecen a sus propios órdenes distintos, llamados Macroscelidea y Scandentia, respectivamente.

Más recientemente se ha cuestionado la unidad de los restantes «insectívoros». La Tabla 8.2 lista las seis familias de mamíferos típicamente incluidas dentro de los Insectívora. La familia Erinacidae incluye a los erizos, mientras que la familia Talpidae incluye a los topos. La familia Soricidae contiene la mayoría de los tipos de musarañas. La familia Tenrecidae es un grupo diverso de mamíferos confinados a Madagascar y África, que superficialmente pueden parecerse a musarañas, topos, erizos e incluso nutrias. Asimismo, los Chrysochloridae o topos dorados africanos son animales cavadores como los topos, pero sus patas delanteras están bajo su cuerpo mientras cavan, a diferencia de los topos, cuyas patas delanteras sobresalen lateralmente. Finalmente, la familia Solenodontidae consta de dos especies de solenodontes parecidos a musarañas que se encuentran en Cuba y Haití.

Sección 8.2: Disponiendo los órdenes con morfología y moléculas

Las similitudes dentro de cada uno de los órdenes anteriores (excepto quizá los Insectívora) sugieren que los mamíferos pertenecientes a un orden comparten un ancestro común. En otras palabras, cada orden

164 *Orígenes*

corresponde a una rama diferente del árbol de familia de los mamíferos. Sin embargo, ha sido difícil identificar las relaciones entre estos grupos diferentes. Aunque cada orden tiene sus propias características únicas, hay pocos rasgos informativos que sean compartidos por varios órdenes. Esto hace difícil averiguar, por ejemplo, si los murciélagos están más estrechamente asociados con los roedores, los primates o las musarañas. Incluso si los paleontólogos han encontrado fósiles que representan a todos los órdenes diferentes (véase Figura 8.1), por el momento pocos de estos fósiles arrojan luz sobre las relaciones entre órdenes diferentes. Por ejemplo, los fósiles de murciélagos más antiguos conocidos pertenecen a criaturas que realmente tenían alas plenamente funcionales. Éstos, por supuesto, no ofrecen mucha información sobre cómo o cuándo adquirieron los murciélagos su capacidad de volar.

Una excepción importante a esta situación implica a los ancestros de las ballenas. Recientemente se han encontrado esqueletos que pertenecen a primitivos ancestros de las ballenas. Estos fósiles se encontraron en regiones de Pakistán que solían ser lagos o partes de un mar antiguo, y las proporciones de sus miembros confirman que estas proto-ballenas eran realmente semiacuáticas. Sin embargo, a diferencia de las ballenas modernas, estos animales tenían patas traseras. Los tobillos de estas criaturas incluyen un hueso llamado astrágalo con una forma característica de «doble polea», que permite que los huesos a ambos lados del mismo roten adelante y atrás. Este tobillo distintivo es un rasgo que ahora sólo se encuentra en los artiodáctilos como vacas, cerdos e hipopótamos. Esto sugiere que, a pesar de las muchas diferencias hoy obvias, existe realmente una estrecha relación entre los cetáceos y los artiodáctilos.

Después de muchos descubrimientos de este tipo quizá podamos llegar a documentar claramente los orígenes de todos los diferentes tipos de mamíferos placentarios; pero hasta entonces, las relaciones entre los órdenes deben inferirse sobre la base de las características de los animales modernos. Durante algún tiempo los biólogos han intentado construir árboles de familia de los mamíferos utilizando estudios detallados de rasgos físicos bastante sutiles. Los resultados de uno de estos análisis pueden verse en la Figura 8.1. En este árbol, el orden de los

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 165

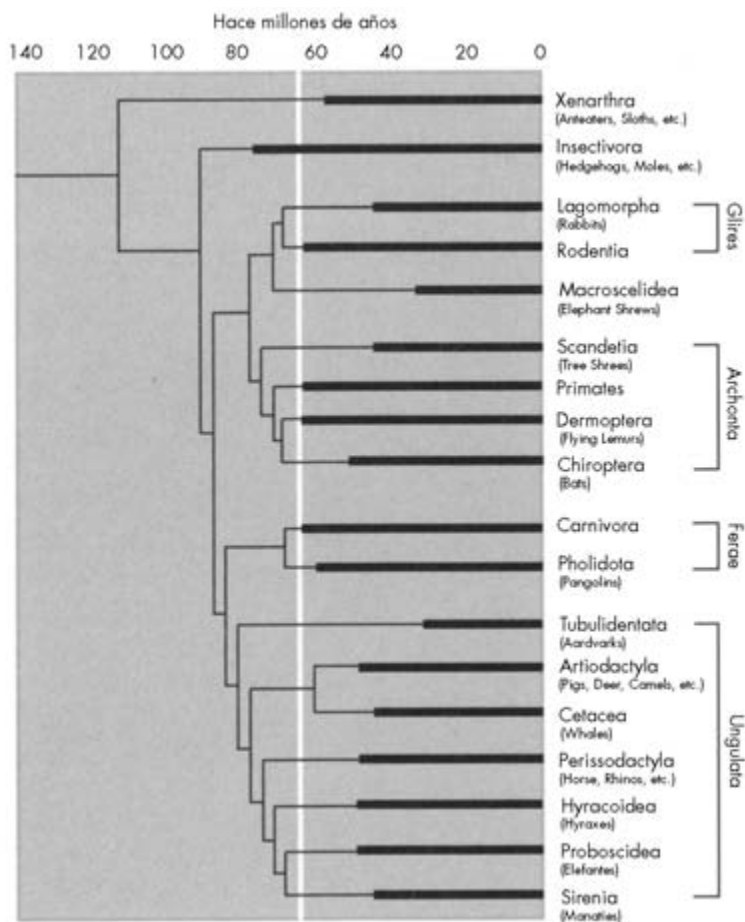


FIGURA 8.1. El registro fósil y las relaciones entre los órdenes de mamíferos placentarios basadas en rasgos morfológicos (físicos). De Jeheskel Shoshani y Malcolm C. McKenna, «Higher Taxonomic Relationship among extant Mammals Based on Morphology» en *Molecular Phylogenetics and Evolution* 9 (1998): 572-584. Las líneas gruesas indican hasta dónde se remonta el registro fósil de cada grupo (no se muestran las interrupciones en estos registros ni los grupos sólo conocidos a partir de fósiles). Las líneas finas indican las relaciones entre estos órdenes basadas en la comparación de rasgos morfológicos en estos organismos. Nótese que la cronología de las diversas bifurcaciones en el árbol es bastante arbitraria, puesto que es muy difícil determinar cuándo se ramificaron unos grupos a partir de otros sobre la sola base de rasgos morfológicos sin suficiente evidencia fósil. Se ha sugerido, sobre la base de que la mayoría de los grupos sólo se remontan hasta hace sesenta y cinco millones de años (indicado por la línea blanca vertical), cuando desaparecieron los dinosaurios, que la mayoría de estos grupos divergieron aproximadamente en esa época.

166 *Orígenes*

Xenarthra es el primero que se separa del resto de los mamíferos placentarios, seguido por muchos tipos de insectívoros. Los placentarios restantes caen aproximadamente en cuatro grupos mayores: Glires, que incluye a roedores y lagomorfos; Archonta, que incluye a murciélagos y primates; Ferae, que incluye a carnívoros y pangolines; y Ungulata, que incluye a los dos tipos de animales con pezuña, ballenas y elefantes. Dentro de los Ungulata, los elefantes, hyraxes y manatíes forman un grupo a veces llamado Paenungulata.

Algunas de las relaciones aquí mostradas parecen intuitivamente plausibles, como el parentesco entre roedores y lagomorfos. Otras conexiones, como las que existen entre murciélagos y primates, son mucho menos obvias. Por desgracia, la mayoría de estas relaciones están apoyadas por unas pocas características que muchos considerarían oscuras, tales como la forma del contacto entre dos huesos del cráneo. Esto significa que, pese al hecho de que se han asignado nombres a grupos como Archonta y Ungulata, estas categorías podrían resultar poco fiables.

Los datos procedentes de secuencias de ADN pueden ser una gran ayuda en esto. Como vimos en el último capítulo, las diferencias entre secuencias de ADN son más fáciles de cuantificar que las características morfológicas, de modo que ofrecen una forma prometedora de recuperar las relaciones entre diversos organismos. Además, de la misma forma que utilizando datos moleculares pudimos estimar cuándo empezaron a divergir los ancestros de los humanos y de los chimpancés, quizá sea incluso posible hacer estimaciones de cuándo emergieron los diferentes órdenes de mamíferos basadas en el número de diferencias entre las secuencias de ADN relevantes.

Como sucedía con los grandes simios, los datos en bruto para este análisis son una colección de secuencias de ADN comparables, esta vez de una variedad representativa de mamíferos placentarios vivos —al menos uno de cada orden—. Cada una de estas secuencias de ADN se compara con todas las demás para identificar todos los lugares en donde difieren, tales como cuando ATGC en una secuencia corresponde a ATTC en otra. En el último capítulo aprendimos que el número de diferencias entre dos secuencias nos permite estimar cuán íntimamente relacionados están los dos animales. Recordemos, sin embargo, que

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 167

el análisis anterior también suponía que el ritmo de acumulación de mutaciones en las secuencias relevantes, no codificadoras, de ADN era aproximadamente el mismo para todos los grandes simios. Ahora estamos considerando una variedad de animales mucho mayor, y hay pruebas de que algunas de estas criaturas han estado acumulando mutaciones más rápidamente que otras.

La Figura 8.2 muestra estimaciones de los ritmos de acumulación de mutaciones para una secuencia particular en varios animales diferentes, obtenidas a partir de una combinación de datos moleculares y fósiles. Por ejemplo, en esta secuencia particular humanos y chimpancés tienen pares de bases diferentes aproximadamente un 10% de las

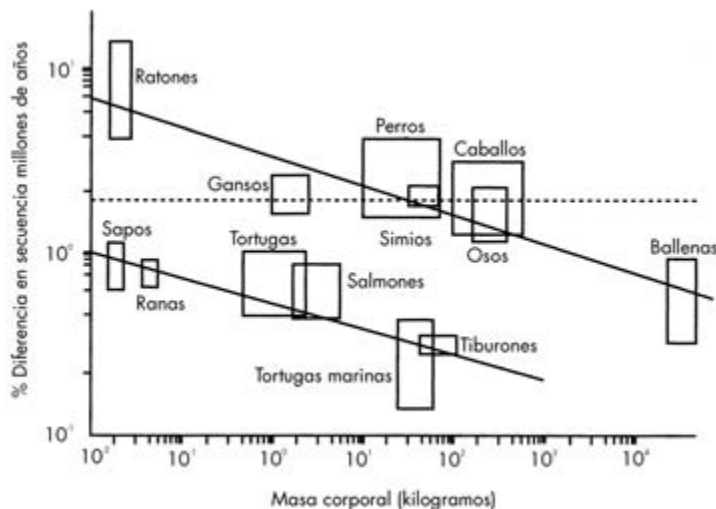


FIGURA 8.2. Diferentes ritmos de acumulación de mutaciones en diferentes animales. Esta figura es de A. P. Martin y S. R. Palumbi, «Body Size, Metabolic Rate, Generation Time, and the Molecular Clock» en *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 90 (1993): 4083. El ritmo de acumulación de mutaciones en el ADN mitocondrial de diferentes animales se representa en función de la masa corporal del animal. Cada caja corresponde a un tipo concreto de animal. La línea de trazos indica dónde podrían estar las cajas si todos los animales acumularan mutaciones al mismo ritmo. Nótese que los animales más grandes tienen ritmos menores que los más pequeños, y los animales de sangre fría tienen ritmos menores que los animales de sangre caliente.

168 Orígenes

veces. Como vimos en el último capítulo, los ancestros de humanos y chimpancés empezaron a separarse hace unos seis millones de años, de modo que estos animales han estado acumulando mutaciones a un ritmo de aproximadamente un 2% por cada millón de años.* Si las mutaciones se hubieran acumulado a este ritmo en todos los animales, entonces todos los animales caerían a lo largo de una línea horizontal en esta gráfica. Sin embargo, es evidente que no es así. De hecho, los ritmos de acumulación de mutaciones van desde un valor tan alto como un 5% por millón de años a un valor tan bajo como un 0,2%. Es interesante señalar que estas variaciones no son aleatorias: aparentemente los animales grandes tienden a acumular mutaciones más lentamente que los animales pequeños, y las criaturas de sangre fría acumulan mutaciones más lentamente que las criaturas de sangre caliente. Estas y otras tendencias observadas en los ritmos de acumulación de mutaciones de varios animales no son aún plenamente entendidas.

Para complicar más las cosas, la mayoría de los datos moleculares utilizados para descifrar las relaciones entre los mamíferos placentarios proceden de regiones codificadoras de su ADN. En regiones no codificadoras no hay nada que impida a cualquier mutación ser transmitida a la siguiente generación, de modo que el ritmo de acumulación es relativamente rápido, hasta varios tantos por ciento por millón de años. La evidencia fósil indica que la mayoría de los órdenes placentarios empezaron a divergir hace más de sesenta y cinco millones de años, lo que significa que es probable que cada par de bases en estas secuencias haya adquirido al menos una mutación. Esto hace casi imposible encajar las secuencias entre dos animales cualesquiera, y también significa que este ADN casi no contendrá información sobre la ascendencia común de estos dos organismos. Por lo tanto, necesitamos utilizar secuencias de ADN que acumulan mutaciones a un ritmo más lento, que se encuentran en los genes. Recordemos que estas secuencias contienen información para hacer proteínas, de modo que es poco probable que la mayoría de las mutaciones en estas regiones se

* Esto es significativamente más rápido que el 1% por cada cinco millones de años obtenido en el capítulo anterior, lo que indica que diferentes partes de la secuencia de ADN pueden acumular mutaciones a ritmos diferentes.

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 169

transmitan a generaciones futuras puesto que afectarían negativamente a la salud del organismo. Esto reduce el ritmo de acumulación de mutaciones a un nivel aceptable, pero también complica las cosas al aumentar la variabilidad entre los ritmos de estas secuencias.

Felizmente para nosotros, aún podemos descubrir relaciones y estimar tiempos de divergencia incluso si las mutaciones se están acumulando a ritmos diferentes en animales diferentes. Para ilustrarlo utilizaremos una secuencia particular de unos trescientos nucleótidos de un perro, un oso, una llama y un antílope Bongo.* Como hicimos con los simios discutidos en el último capítulo, podemos comparar estas secuencias y calcular el número de diferencias entre cada par de animales (Tabla 8.3).

TABLA 8.3. Diferencias de nucleótidos entre osos, perros, llamas y antílopes.

oso-perro	oso-llama	oso-antílope
36	45	50
	perro-llama	perro-antílope
	35	46
		llama-antílope
		38

Si todas estas criaturas acumularan mutaciones al mismo ritmo, entonces cabría esperar que los dos animales con el mínimo número de diferencias entre ellos fueran los dos animales que están más estrechamente relacionados entre sí. En este caso, el mínimo número de diferencias se da entre el perro y la llama. Esto es sorprendente porque esperaríamos que el perro esté más estrechamente relacionado con el oso, pues ambos pertenecen al orden Carnívora. También esperaríamos que la llama esté más estrechamente relacionada con el antílope puesto que ambos son artiodáctilos.

Incluso sin saber nada sobre las apariencias físicas de estos animales, un examen detallado de los datos genéticos demostraría que es

* Las secuencias de ADN pueden encontrarse en la base de datos PubMed (www.pubmed.org), con números de acceso AY011250, AY011249, AY011239 y AY011240.

170 Orígenes

poco probable que el perro y la llama estén estrechamente relacionados. En primer lugar, examinemos la fila superior de la tabla anterior. Ésta dice que hay 36 diferencias entre el oso y el perro, y 45 diferencias entre el oso y la llama. Si el perro y la llama tuvieron realmente el ancestro común más reciente, entonces esto significa que los ancestros de la llama adquirieron más mutaciones que los ancestros del perro; es decir, el linaje de la llama habría acumulado mutaciones más rápidamente que el del perro. Sin embargo, si examinamos la última columna de la misma tabla encontramos que hay 46 diferencias entre el perro y el antílope, y sólo 38 diferencias entre la llama y el antílope. Esto indicaría que era el linaje del perro el que estaba acumulando mutaciones a ritmo más rápido, y no el linaje de la llama. Por consiguiente, las comparaciones que implican al oso y al antílope se contradicen directamente si se supone que el perro y la llama tienen el ancestro común más reciente.

Tal inconsistencia flagrante no ocurre si suponemos en su lugar que el perro y el oso están más estrechamente relacionados entre sí que lo que uno u otro están con la llama o el antílope. La llama tiene 45 diferencias respecto del oso y sólo 35 respecto del perro, lo que indica que los ancestros del oso acumularon mutaciones más rápidamente que los del perro. Análogamente, hay un número mayor de diferencias entre el antílope y el oso que entre el antílope y el perro. Este nivel de consistencia indica que el perro y el oso comparten de hecho una estrecha relación. De un modo similar, los biólogos pueden inferir las relaciones correctas entre animales incluso si el ritmo de mutaciones no es constante.

Se puede advertir que en esta secuencia particular el linaje del oso acumuló más mutaciones que el del perro, contrariamente a la tendencia general mostrada en la Figura 8.2. Además, obtenemos estimaciones ligeramente diferentes de las variaciones del ritmo de acumulación de mutaciones entre perros y osos dependiendo de si comparamos estas secuencias de carnívoros con la llama y el antílope. Estas discrepancias residuales ocurren porque una gran fracción de los aproximadamente 300 nucleótidos son diferentes en las diferentes secuencias, de modo que no podemos suponer que cada nucleótido haya sufrido sólo una única mutación. Tales complicaciones suelen surgir en el análisis de datos de secuencias reales. Sin embargo, con las herramientas

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 171

matemáticas apropiadas para evaluar la calidad y consistencia de los datos, los biólogos son aún capaces de descubrir las relaciones adecuadas entre estos organismos.

Debería señalar también que el análisis anterior es tan sólo una manera posible de inferir relaciones a partir de secuencias de ADN. Otros métodos, en lugar de basarse en el número total de diferencias entre organismos, examinan cada diferencia por separado y suponen que es poco probable que una mutación individual aparezca más de una vez. Por ejemplo, si el oso y el perro tienen la secuencia ATTG donde la llama y el antílope tienen ATCG, es más probable que los dos carnívoros deriven de un único ancestro con la secuencia ATTG que ambos adquirieran esta misma mutación por separado. Podemos deducir así las relaciones entre los organismos si encontramos el árbol filogenético que minimice el número de mutaciones coincidentes.

En el análisis de datos de ADN real hay programas informáticos que encuentran el dendrograma más probable. Los algoritmos que utilizan el número total de diferencias entre secuencias se conocen como métodos de distancia, mientras que los que incluyen datos de mutaciones individuales se conocen como métodos de máxima parsimonia y máxima probabilidad. Todas estas técnicas tienen sus propias ventajas e inconvenientes, y su utilidad relativa en diferentes situaciones es un tema de activo debate.

La Figura 8.3 muestra los resultados de uno de estos análisis que utiliza datos de más de 15.000 pares de bases y más de cuarenta mamíferos. Algunos de los grupos observados en la Figura 8.1 aparecen también aquí: roedores y lagomorfos forman de nuevo un grupo bien definido, y se encuentra una vez más que elefantes, hyraxes y manatíes están muy estrechamente relacionados. Asimismo, artiodáctilos y ballenas resultan estar muy estrechamente relacionados, lo que es compatible con la evidencia fósil. De hecho, estos análisis nos dicen que algunos artiodáctilos —como los hipopótamos— están más estrechamente relacionados con las ballenas que con otros artiodáctilos, tales como llamas y cerdos. En consecuencia, estos dos órdenes son aquí considerados un único grupo llamado Cetartiodactyla.

Al mismo tiempo, hay muchas relaciones y agrupamientos que no se veían en el árbol anterior. En particular, los datos moleculares su-

172 Orígenes

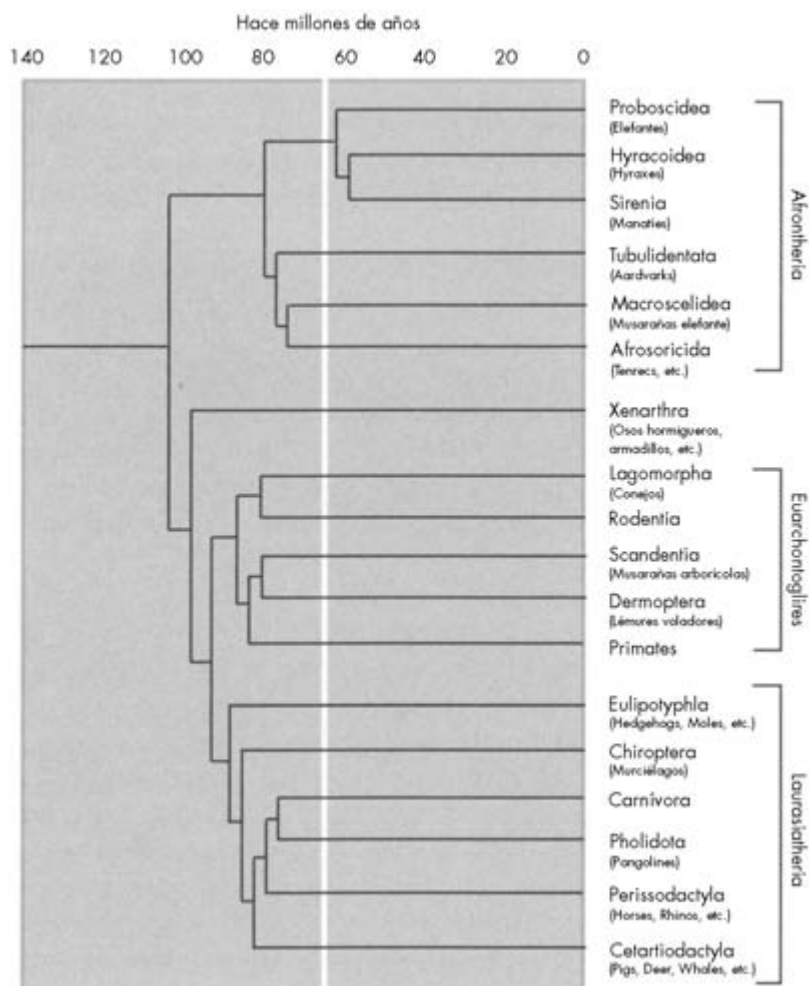


FIGURA 8.3. Las relaciones entre los mamíferos placentarios basadas en datos moleculares. De M. Springer *et al.*, «Placental Mammal Diversification and the Cretaceous-Tertiary Boundary» en *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 100 (2003): 1056-1061. Las relaciones derivadas mediante este método no son exactamente las mismas que las mostradas en la Figura 8.1. En esta figura, las edades de los diversos grupos se basan en datos moleculares, que indican que los órdenes divergieron mucho antes de hace sesenta y cinco millones de años, cuando desaparecieron los últimos dinosaurios. Nótese que Cetácea y Artiodactyla se funden en un nuevo orden; esto se debe a que las ballenas están más estrechamente relacionadas con ciertos artiodáctilos, como los hipopótamos, que los hipopótamos lo están con otros artiodáctilos, como los cerdos. Eulipotyphla y Afrosoricida son dos grupos de familias insectívoras: Enriceidea + Talpidae + Soricidae + Solenodontidea = Eulipotyphla; Tenrecidae + Chrysochloridae = Afrosoricida.

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 173

gieren que todos los mamíferos placentarios caen en uno de cuatro grupos: Afrotheria, Xenarthra (que consiste solamente en el orden con dicho nombre), Euarchontoglires y Laurasiatheria. Todos los animales dentro de un grupo están más estrechamente relacionados entre sí que cualquiera de ellos lo está con un animal de otro grupo. Estas cuatro categorías han aparecido en varios estudios moleculares, y están apoyadas por el hecho de que los miembros de cada uno de estos grupos comparten ciertas mutaciones —tales como la supresión de un tramo concreto de pares de bases— que es muy poco probable que ocurra más de una vez.

Hay todavía cierta incertidumbre sobre las relaciones entre estos grupos, pero el árbol que se presenta aquí es de momento una de las opciones con mejor apoyo. En este caso, el primer grupo en separarse de los otros es el Afrotheria, que incluye elefantes, hyraxes, manatíes y cerdos hormigueros. También contiene a la musaraña elefante y dos insectívoros familiares, los tenrecs y los topos dorados. Como su nombre implica, la mayoría de estos animales se encuentran en África.

El siguiente es el Xenarthra, el orden que incluye a perezosos, osos hormigueros y armadillos. Hoy día, la mayoría de estos animales se encuentran en América del Sur.

Finalmente divergen Euarchontoglires y Laurasiatheria. Euarchontoglires contiene roedores, conejos, primates, lémures voladores y musarañas arborícolas. En otras palabras, contiene a todos los miembros de los grupos Glires y Archonta anteriormente mencionados, excepto los murciélagos.

Laurasiatheria es el grupo más diverso. Contiene murciélagos, carnívoros, pangolines, ballenas y artiodáctilos tanto como perisodáctilos. También incluye a las familias de insectívoros Erinaceidae, Talpidae y Soricidae: los erizos, las musarañas y los topos.

Superficialmente, quizá este conjunto de relaciones no parezca más o menos plausible que las relaciones basadas en rasgos físicos dadas en la Figura 8.1. Sin embargo, esta cuádruple división de mamíferos placentarios muestra algunas pautas geográficas intrigantes. Los afrotherianos son de África, los xenarthranos son de América del Sur, y el registro fósil sugiere que euarchontoglires y laurasiatherianos —que hoy día se encuentran por todo el mundo— se originaron en los

174 *Orígenes*

continentes septentrionales. Esta posible conexión entre relaciones entre mamíferos y geografía ha captado el interés de muchos biólogos evolucionistas, porque potencialmente ofrece claves importantes sobre la temprana historia de los mamíferos placentarios.

Sección 8.3: Encontrando el momento con estadística bayesiana

Para explorar más las posibles relaciones entre geografía y evolución de los mamíferos necesitamos conocer cuándo empezaron a divergir los diferentes grupos. Los fósiles de los más antiguos representantes conocidos de la mayoría de los órdenes datan de hace aproximadamente sesenta y cinco millones de años, cuando desaparecieron los últimos dinosaurios. Por supuesto, había mamíferos antes de esa época, pero la relación entre estas primeras criaturas y los órdenes modernos no está clara. De hecho, algunos paleontólogos argumentan que la mayoría o todos los órdenes de mamíferos placentarios aparecieron aproximadamente al mismo tiempo, hace sesenta y cinco millones de años, cuando los mamíferos empezaron a llenar los muchos nichos ecológicos que dejó vacantes la extinción de los grandes dinosaurios, etc. Este escenario está siendo ahora cuestionado por investigadores que han intentado estimar cuándo aparecieron las diversas ramas del árbol de familia de los mamíferos utilizando datos de secuencias de genes.

De entrada puede parecer que utilizar datos genéticos para medir el paso del tiempo sería imposible en este caso. Después de todo, hemos visto que mamíferos diferentes acumulan mutaciones a ritmos muy diferentes. Sin embargo, cuidadosos análisis de los datos de secuencias revelan a menudo las variaciones de los ritmos de acumulación de mutaciones de linajes diferentes. En el sencillo ejemplo anterior, el número de diferencias entre los animales era suficiente para establecer que —en una secuencia concreta— los ancestros de los osos acumularon mutaciones más rápidamente que los ancestros de los perros. Las secuencias de ADN contienen así información que pueden utilizar los biólogos para corregir variaciones en el ritmo de acumulación de mutaciones.

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 175

Incluso con esta información, extraer la información cronológica a partir de datos de secuencias no es tan sencillo. Si conociéramos el ritmo de acumulación de mutaciones para cada rama sería bastante fácil calcular el número de diferencias que deberían existir entre los animales actuales. Sin embargo, trabajar hacia atrás y utilizar las diferencias observadas para inferir los ritmos relevantes es una tarea mucho más difícil. Varias combinaciones diferentes de ritmos podrían haber producido las diferencias observadas entre secuencias, y queremos descubrir cuál de estas posibilidades tiene más probabilidades de haber ocurrido realmente. Para lograrlo, algunos biólogos moleculares se han valido de una aproximación conocida como análisis de probabilidad o estadística bayesiana.

Para mostrar cómo trabaja la estadística bayesiana, consideremos el lanzamiento de una moneda. Si nos dijeran que se ha lanzado una moneda diez veces y quisiéramos saber las probabilidades de sacar cinco caras, entonces tenemos un típico problema de estadística. Todo lo que hay que hacer para resolverlo es escribir todos los resultados posibles de diez lanzamientos de moneda y luego calcular qué fracción de los mismos da cinco caras. Si recordamos algo de combinatoria podemos evitar el paso tedioso de escribir todos los resultados posibles, pero, de una manera o de otra, obtenemos la respuesta correcta. Del mismo modo, es una cuestión trivial obtener las probabilidades de sacar cinco caras si lanzamos una moneda seis veces, cien veces o mil veces.

Sin embargo, ¿qué pasa si supiéramos que la moneda salió cara cinco veces y quisiéramos estimar cuántas veces fue lanzada la moneda? Seguramente conjeturaríamos que la moneda fue lanzada unas diez veces, puesto que sabemos que debería haber salido cara aproximadamente la mitad de las veces. Sin embargo, la mayoría de las técnicas estadísticas no nos permiten calcular las probabilidades de que la moneda fuera lanzada diez veces, antes que ocho veces o veinte veces. La estadística bayesiana puede ayudarnos a resolver este problema al coste de una única hipótesis, conocida como el prior. En este caso, podemos suponer que la moneda podría haber sido lanzada cualquier número de veces. En ausencia de cualquier otra información sobre la situación, esta hipótesis prior parece perfectamente razonable.

Supuesto este prior, podemos ahora calcular la probabilidad de que la moneda fuera lanzada un cierto número de veces y de que la moneda

176 Orígenes

saliese cara cinco veces. Puesto en una ecuación, este número es la probabilidad de que la moneda fuera lanzada el número de veces especificado multiplicada por la probabilidad de obtener cinco caras con dicho número de tiradas. Operando bajo la hipótesis de que la moneda pudiese haber sido lanzada cualquier número de veces, la primera probabilidad es la misma para cualquier número de lanzamientos de la moneda. Por el contrario, la probabilidad de obtener cinco caras no es la misma para cualquier número total de lanzamientos. Por ejemplo, no es posible obtener cinco caras cuando lanzamos la moneda menos de cinco veces. Si la moneda se lanza cinco veces es improbable que salga cara en todas ellas. Si, por el contrario, la moneda se lanza cien veces, es todavía más improbable que sólo salga cara cinco veces. Sólo cuando la moneda se lanza unas diez veces es razonablemente probable que la moneda haya salido cara cinco veces. Por lo tanto, incluso si hemos supuesto que la moneda *podría haber sido lanzada* cualquier número de veces, el hecho de que haya salido cara cinco veces indica que lo más probable es que *realmente* fuera lanzada unas diez veces. Si queremos, podemos incluso determinar la probabilidad relativa de cualquier número de lanzamientos utilizando esta aproximación.

Incluso si estos cálculos se basan en la hipótesis de una probabilidad prior en el número de lanzamientos de la moneda, hay mucha libertad en los tipos de prior que podemos suponer. Antes supusimos que todos los números de lanzamientos eran igualmente probables, pero también podríamos haber supuesto que la moneda sólo pudo haber sido lanzada un máximo de treinta veces. Puesto que las probabilidades de obtener sólo cinco caras con más de treinta lanzamientos son muy bajas, esta hipótesis no afecta fuertemente al resultado: diez lanzamientos de la moneda sigue siendo la respuesta más probable. De hecho, las únicas hipótesis prior que pueden alterar el cálculo son aquellas que limitan en exceso el número de lanzamientos de moneda o que exigen que el número de lanzamientos sea mucho mayor que diez. Sin información adicional no hay base para hacer estas hipótesis tan extrañas. Este método ofrece entonces resultados razonablemente precisos, lo que permite a los científicos explorar problemas en donde es más directo calcular la probabilidad de obtener un resultado de un proceso dado que computar algo acerca de los procesos que llevan a dicho resultado.

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 177

La estadística bayesiana puede ser aplicada incluso a la cuestión de la evolución de los mamíferos. En este caso, el prior supuesto podría ser algo como esto: cada rama del árbol mostrado en la Figura 8.3 podría haber aparecido en cualquier momento, con tal de que el orden de las ramas se conserve, y el ritmo de acumulación de mutaciones en cualquier rama podría tomar cualquier valor. La probabilidad relativa de que un conjunto dado de tiempos de ramificación y ritmos de acumulación sean los valores reales puede ser calculada entonces como la probabilidad de que dichos tiempos y ritmos hubieran producido las diferencias observadas en las secuencias de ADN.* Por supuesto, hay demasiados ritmos y tiempos para calcular las probabilidades para todos ellos, así que los biólogos utilizan algoritmos para buscar los valores más probables, haciendo algunas hipótesis adicionales acerca de que los ritmos no varían incontroladamente de una rama a la siguiente.

Un beneficio adicional de esta aproximación es que permite que datos procedentes del registro fósil sean incorporados directamente en el cálculo de las diferentes escalas de tiempo. Por ejemplo, los fósiles de las primera ballenas sugieren que los cetáceos empezaron a divergir de los artiodáctilos terrestres hace más de cincuenta millones de años. Los filogenetistas pueden tener esto en cuenta en el análisis bayesiano imponiendo el prior de que la rama de la ballena no puede divergir de la rama del hipopótamo (o cualquiera que se suponga que es el pariente más próximo de la ballena) hace menos de cincuenta millones de años. Esta información no sólo ayuda a restringir las variaciones en los ritmos de acumulación de mutaciones, sino que también proporciona los puntos de referencia necesarios para obtener edades en años reales.

Este método de obtener la edad de diferentes linajes con ritmos de mutación variables es nuevo, y pasará algún tiempo antes de que los biólogos puedan asegurar que es suficientemente fiable. Incluso si los datos de la secuencia de ADN dan la pauta correcta de ramas en el árbol de familia de los mamíferos, las hipótesis adicionales requeridas para computar las fechas podrían conducir a resultados incorrectos. Varios investigadores están trabajando actualmente para poner a prueba y refinar este método de datación. Mientras tanto, sigue siendo in-

* Incluso es posible incluir pautas diferentes de ramas en este análisis.

178 Orígenes

interesante considerar los resultados de uno de estos análisis —que se ilustra en la Figura 8.3— que indica que la mayoría de los órdenes de los mamíferos placentarios ya estaban establecidos hace más de sesenta y cinco millones de años. En otras palabras, estos grupos habrían aparecido antes de que desaparecieran los dinosaurios. Esto no significa que tuviéramos mamíferos parecidos a los caballos o a los monos actuales jugueteando con el *Tyrannosaurus rex*, pero implica que órdenes diferentes aparecieron de reservas independientes de mamíferos mesozoicos.

Otro resultado intrigante de estos análisis es que los ancestros de los Afrotheria —un grupo ahora básicamente confinado en África— se ramificaron de los ancestros de otros modernos mamíferos placentarios hace aproximadamente ciento cinco millones de años. Esta división ocurre en un momento crucial en la geografía del hemisferio austral. América del Sur y África estaban unidas originalmente como parte de un continente más grande llamado Gondwana. Sin embargo, hace aproximadamente cien millones de años la deriva continental separó América del Sur de África, y entre ambas apareció un joven océano Atlántico austral (véase Figura 8.4). Si hace alrededor de ciento diez millones de años había una población de mamíferos placentarios primitivos en Gondwana, esta ruptura geológica habría producido dos grupos de mamíferos más o menos aislados, uno en África y otro en América del Sur. El primero se convertiría en los ancestros de los afrotherianos, y el último lo constituirían los ancestros de los xenarthranos, euarchontoglires y laurasiatherianos. Incluso podemos imaginar que unos pocos millones de años más tarde algunos de los mamíferos de América del Sur llegaron al hemisferio septentrional, quizá a través de una cadena de islas entre América del Norte y América del Sur que finalmente se convertirían en Cuba, La Española y Puerto Rico. Los animales que hicieron este intrépido viaje serían los ancestros de los euarchontoglires y los laurasiatherianos, mientras que los que quedaron atrás darían lugar a los xenarthranos.*

* Algunos estudios de ADN sugieren que los xenarthra fueron el primer grupo que divergió de los otros mamíferos, seguido de los afrotheria. En este caso, los ancestros de los euarchontoglires y laurasiatheria se habrían movido hacia el norte desde África en lugar de América del Sur.

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 179

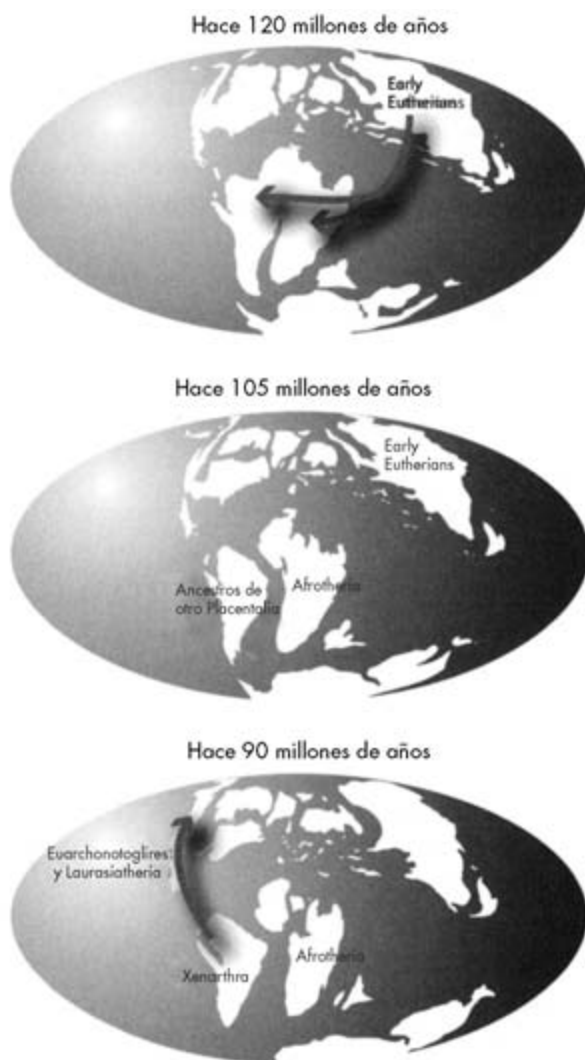


FIGURA 8.4. Un posible escenario para los movimientos de los primeros mamíferos placentarios durante el final de la era de los dinosaurios. Estos mapas muestran los continentes en diferentes momentos en el pasado, junto con una posible distribución de mamíferos eutherianos basada en los datos de secuencias de ADN. En primer lugar, algunos primeros mamíferos eutherianos llegaron al hemisferio austral. Hace unos ciento cincuenta millones de años África y América del Sur se separaron, aislando a los ancestros de mamíferos afrotherianos de otros grupos. Entre cinco y diez millones de años más tarde, algunos de los animales de América del Sur migran a los continentes septentrionales, dejando atrás a los ancestros de los Xenarthra. Los mamíferos que llegaron al norte se convirtieron finalmente en los euarchontoglires y laurasiatheria.

180 Orígenes

La cuestión ahora es saber si esta imagen de los mamíferos mesozoicos trotamundos es compatible con la evidencia fósil. Como mencionamos antes, los primeros animales con rasgos diagnósticos de órdenes concretos aparecen sólo hace alrededor de sesenta y cinco millones de años. Sin embargo, quizá los primeros mamíferos simplemente no habían desarrollado todavía estos rasgos distintivos, de modo que sus relaciones con los mamíferos modernos han quedado oscurecidas. Para explorar esta posibilidad los paleontólogos están examinando aquellos fósiles de la era de los dinosaurios que parecen pertenecer a criaturas estrechamente relacionadas con los modernos mamíferos placentarios. Por supuesto, tales restos antiguos no proporcionan una prueba clara de que estos animales tuvieran un modo de reproducción verdaderamente placentario. Sin embargo, los dientes y huesos de dichas criaturas tienen características que los separan de los marsupiales, los monotremas y otros tipos de mamíferos e indican que comparten un ancestro con los modernos placentarios. Puesto que no sería apropiado suponer que los primeros miembros de este grupo ya tenían una placenta funcional completa, se utiliza el término más neutro «eutherianos» para referirse a los miembros de toda esta rama del árbol de familia de los mamíferos, que incluye a los modernos mamíferos placentarios.*

El primer eutheriano conocido procede de China. Fue descrito en 2002, basado en un espécimen bien conservado consistente en un esqueleto casi completo y, notablemente, huellas del pelo de los animales. Esta criatura, llamada *Eomaia scansoria*, tenía unos 20 centímetros de longitud de hocico a cola y puede reconocerse como un eutheriano por la estructura de su tobillo. Vivió hace unos ciento veinticinco millones de años, lo que significa que los eutherianos existían realmente como un grupo distinto de mamíferos más de veinte millones de años antes del momento en que se supone que los ancestros de los modernos

* Algunos paleontólogos utilizan el término «Eutheria» para referirse a todos los animales más estrechamente relacionados con los mamíferos placentarios que con los marsupiales modernos, y el término «Placentalia» para referirse a todos los animales que descienden del último ancestro común de todos los mamíferos placentarios modernos. En esta situación, todos los mamíferos placentarios modernos pertenecen tanto a Placentalia como a Eutheria, pero algunos animales fósiles podrían ser eutherianos pero no placentalianos.

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 181

placentarios empezaron a divergir unos de otros. A este respecto, al menos, la evidencia fósil es compatible con los datos moleculares. Sin embargo, el *Eomaia* no tiene ningún rasgo que indique que está directamente relacionado con algún grupo concreto de los modernos mamíferos placentarios, de modo que este fósil no puede decirnos si grupos como los Afrotheria o Xenarthra aparecieron realmente durante el Mesozoico.

Hay algunos fósiles que pueden proporcionar evidencia de la antigüedad de algunos órdenes de los eutherianos modernos. Estos restos pertenecen a dos tipos de criaturas —llamados zambalestidos y zhelestidos— que vivieron principalmente en Asia hace entre setenta y cinco y noventa millones de años. Recientemente algunos paleontólogos han argumentado, basados en un estudio detallado de los dientes, que los zambalestidos están estrechamente relacionados con los ancestros de conejos y roedores, y que los zhelestidos están estrechamente relacionados con los animales con pezuña. Sin embargo, estos resultados son aún muy controvertidos debido al número limitado de mamíferos modernos incluidos en el análisis. Actualmente hay estudios en curso para realizar análisis más completos de las relaciones entre primitivos y modernos mamíferos eutherianos, algunos de los cuales incorporan incluso información de secuencias de ADN y rasgos físicos. La combinación de conjuntos de datos tan heterogéneos presenta muchas dificultades, pero cabe esperar que lleve a una determinación robusta de las relaciones entre los modernos mamíferos placentarios y sus ancestros mesozoicos. Hasta entonces —o hasta que nuevos fósiles clarifiquen las relaciones entre estos primeros mamíferos— seguirá siendo una cuestión abierta si algunos de estos antiguos eutherianos fueron o no ancestros de grupos específicos de los mamíferos placentarios modernos.

Un problema mucho mayor para la imagen anterior de base molecular de la difusión de los primeros mamíferos placentarios tiene que ver con *dónde* se han encontrado hasta ahora estos primitivos eutherianos fósiles. Casi todos los fósiles de los mamíferos eutherianos que tienen más de noventa millones de años —incluido el *Eomaia*— proceden de Asia. Depósitos ligeramente más recientes en Europa y América del Norte también contienen mamíferos eutherianos. Muy

182 *Orígenes*

pocos eutherianos primitivos se han encontrado en América del Sur o en África. Incluso los parientes más antiguos conocidos de los afrotherianos se encuentran en los continentes septentrionales. Por ello, muchos paleontólogos son escépticos acerca de la idea de que los orígenes de todos los mamíferos placentarios modernos se remiten al hemisferio sur. Por supuesto, los depósitos fósiles en los continentes australes no están en general tan bien explorados como sus contrapartidas septentrionales, de modo que futuros descubrimientos en África o América del Sur pueden confirmar con el tiempo la historia de los primeros mamíferos placentarios presentada en la Figura 8.4.

Alternativamente, otros investigadores han argumentado que en lugar de ser los ancestros de los euarchontoglires y laurasiatherianos los que fueron hacia el norte, quizá hayan sido los afrotherianos y xenarthranos los que fueron hacia el sur desde los continentes septentrionales. Tal idea sería más compatible con la evidencia fósil disponible. Sin embargo, para que este escenario sea compatible con las relaciones inferidas de los datos moleculares, todos los euarchontoglires y laurasiatherianos modernos deben descender de una reserva de primitivos mamíferos placentarios en el hemisferio norte, que estaban más estrechamente relacionados con los mamíferos que llegaron a América del Sur que con los que llegaron a África (o viceversa, según algunos análisis). No es en absoluto evidente por qué debería ser así.

Obviamente, nuestra comprensión de los orígenes de los mamíferos placentarios no está ni mucho menos completa. Incluso así, los nuevos datos moleculares han despertado un renovado interés en el tema e incluso han sugerido nuevas y prometedoras áreas de investigación futura. Por ejemplo, algunos biólogos están particularmente intrigados por el gran número de ejemplos de convergencia y paralelismo que aparecen entre cuatro grupos importantes en el árbol filogenético anterior: los osos hormigueros en los Xenarthra, los cerdos hormigueros en los Afrotheria, y los pangolines en los Laurasiatheria se han adaptado de forma similar a comer hormigas y termitas, mientras que los topos en los Laurasiatheria, las ratas topo en los Euarchontoglires, y los topos dorados en los Afrotheria están bien adaptados para vivir bajo el suelo, por dar sólo dos ejemplos. Si los ancestros de estos diferentes grupos de mamíferos estuvieran asentados en

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 183

diferentes rincones del mundo en el momento en que desaparecieron los últimos de los grandes dinosaurios, cabe imaginar que mamíferos de tipo musaraña en diferentes regiones del mundo empezaron a diversificarse y evolucionar para llenar una amplia diversidad de nichos ecológicos. Esto significa que diferentes animales en diferentes lugares se estaban adaptando para explotar los mismos recursos aproximadamente en la misma época, y con el tiempo adquirieron rasgos ventajosos similares. La comparación de estos animales y sus linajes ofrecería así claves importantes sobre cómo evolucionaron tales características. Los esfuerzos para desvelar la historia de los eutherianos darán muchas ideas nuevas sobre los procesos que han conformado la historia de la vida.

Futuros descubrimientos de fósiles y técnicas analíticas más refinadas deberían permitir a los biólogos dar una explicación detallada —compatible tanto con los datos morfológicos como con los datos moleculares— de la distribución, relaciones y características de los mamíferos placentarios que vivieron antes de la llegada del meteorito fatídico hace sesenta y cinco millones de años. Cualquiera que fuera el papel que tuvo este impacto en el declive de los dinosaurios y el ascenso de los mamíferos, ciertamente abrió un nuevo capítulo en la historia de la vida en la Tierra. También marca el final de la línea para un objeto que quizá haya estado volando por el espacio durante miles de millones de años. Como veremos en el próximo capítulo, los meteoritos no son sólo agentes de destrucción, sino que también suelen conservar un valiosísimo registro de la historia temprana del Sistema Solar.

Sección 8.4: Lecturas adicionales

Para un bonito resumen a nivel divulgativo de los mamíferos actuales, véase E. Gould y G. McKay, *Encyclopedia of Mammals* (Academia Press, 1998). Para detalles más técnicos consultar G. A. Feldhammer *et al.*, *Mammalogy* (McGraw-Hill, 1999). Para la evidencia fósil sobre la evolución de los mamíferos, véase E. H. Colbert *et al.*, *Colbert's Evolution of the Vertebrates* (Wiley, 2001); Robert Carroll, *Vertebrate Paleontology and Evolution* (W. H. Freeman, 1988), y Joel Cracraft

184 Orígenes

y M. G. Donoghue, *Assembling the Tree of Life* (Oxford University Press, 2004).

Para algo más específico sobre los mamíferos primitivos, véase Z. Kielan-Jaworowska *et al.*, *Mammals from the Age of Dinosaurs* (Columbia University Press, 2004) y K. A. Rose y J. D. Archibald, *The Rise of Placental Mammals* (Johns Hopkins University Press, 2005).

Para detalles sobre los recién descubiertos ancestros de las ballenas, véase J. G. M. Thewissen *et al.*, «Skeletons of Terrestrial Cetaceans and the Relationship of Whales to Artiodactyls» en *Nature* 413 (2001): 277-281. Para detalles sobre el descubrimiento del *Eomaia*, véase Q. Ji *et al.*, «The Earliest Eutherian Mammal» en *Nature* 416 (2002): 816-822.

Buenas páginas web para explorar las relaciones entre organismos son tolweb.org y palacos.com; también pueden encontrarse muchos artículos útiles en www.pubmed.org y www.plos.org.

Para detalles de varios métodos para extraer árboles filogenéticos de datos moleculares, véase Wen-Hsiung Li, *Molecular Evolution* (Sinauer, 1997) y M. Nei y S. Kumar, *Molecular Evolution and Phylogenetics* (Oxford University Press, 2000).

Para los últimos trabajos sobre datación de las divergencias de los mamíferos eutherianos con técnicas moleculares, véase M. Springer *et al.*, «Placental Mammal Diversification and the Cretaceous-Tertiary Boundary» en *Proceedings of the National Academy of Sciences* (USA) 100 (2003): 1056-1061 y M. Hasegawa *et al.*, «Tunes Scale of Eutherian Evolution without Assuming a Constant Rate of Molecular Evolution» en *Genes and Genetic Systematics* 78 (2003): 267-283.

Un artículo reciente que presenta una pauta ligeramente diferente de la evolución de los mamíferos es J. O. Kriegs *et al.*, «Retroposed Elements as Archives for the Evolutionary History of Placental Mammals» en *PLoS Biology* 4 (2006): 0537. Algunos buenos artículos de revisión sobre los trabajos en curso para interpretar estos nuevos datos son M. Springer *et al.*, «Molecules Consolidate the Placental Mammal Tree» en *Trends in Ecology and Evolution* 19 (2004): 430-438; J. D. Archibald, «Timing and Biogeography of the Eutherian Radiation: Fossils and Molecules Compared» en *Molecular Phylogenetics and Evolution* 28 (2003): 350-359, y J. P. Hunter y C. M. Janis, «Spiny

La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes 185

Norman on the Garden of Eden? Dispersal and Early Biogeography of Placentalia» en *Journal of Mammal Evolution* 13 (2006): 89-123.

También pueden encontrarse posturas escépticas sobre los datos moleculares: Cracraft y Donoghue, *Assembling the Tree of Life* y Rose y Archibald, *Rise of the Placental Mammals*, antes mencionados. Un artículo interesante que señala algunas limitaciones fundamentales a la precisión de los métodos genéticos para medir la edad es T. Britton, «Estimating Divergence Times in Phylogenetic Trees without a Molecular Clock» en *Systematic Biology* 54 (2005): 500-507.

Finalmente, otro trabajo reciente que utiliza datos de ADN para explorar cuándo pueden haber aparecido diferentes reservas de mamíferos hacia el final de la era de los dinosaurios puede encontrarse en O. R. P. Bininda-Emonds *et al.*, «The Delayed Rise of Present-Day Mammals» en *Nature* 446 (2007): 507-512.

Los meteoritos y la edad del Sistema Solar

Poco antes de la medianoche del 26 de marzo de 2003, quienes vivían en los barrios al sur de Chicago tuvieron unos visitantes inesperados. Minutos antes había entrado en nuestra atmósfera una roca procedente del espacio exterior con una masa de al menos 900 kilogramos. A medida que se acercaba a la Tierra, se frenó, calentó y finalmente se rompió en muchos pedazos. Los fragmentos más pequeños se vaporizaron en la atmósfera, pero aún quedaron centenares de meteoritos del tamaño de un guijarro o un adoquín que llovieron sobre la vecindad durmiente y se estrellaron contra aceras, casas y automóviles. Los objetos más grandes —con masas de hasta 5 kilogramos— cayeron en un pueblo llamado Park Forest, por lo que este material se llegó a conocer en conjunto como el meteorito de Park Forest.

Por supuesto, ésta no era la primera vez que rocas procedentes del espacio se estrellaban contra la Tierra. Objetos mucho más grandes —como el que quizá haya desempeñado un papel importante en la desaparición de los dinosaurios gigantes— han colisionado con nuestro planeta durante los últimos miles de millones de años, y la posibilidad de un gran impacto futuro ha espoleado los esfuerzos por catalogar y seguir la pista de objetos potencialmente dañinos y ha inspirado muchas películas de ciencia ficción. Pero aunque la llegada de un meteorito puede ser un suceso muy espectacular, el propio objeto es también un recurso precioso para la investigación del Sistema Solar.

Los meteoritos y la edad del Sistema Solar 187

Exceptuando las rocas de la Luna traídas por las misiones Apolo y Lunik, y algunos granos cometarios menores traídos por la nave espacial *Stardust*, los meteoritos son las únicas muestras no microscópicas procedentes del espacio exterior que podemos estudiar aquí en la Tierra. Además, muchos meteoritos son como cápsulas del tiempo que contienen pequeños fragmentos de residuos rocosos procedentes de una era en la que el planeta todavía no se había acabado de formar. La composición química y las características físicas de estas minúsculas reliquias son muy variadas, lo que indica que se formaron en diferentes condiciones y en diferentes momentos. La química, la mineralogía e incluso la edad de estos objetos proporcionan así claves importantes sobre los orígenes y la temprana historia de nuestro Sistema Solar.

Sección 9.1: Rocas procedentes del cielo

En total, hay más de cincuenta tipos de meteoritos diferentes. Los más espectaculares son los denominados meteoritos metálicos, que están compuestos básicamente de aleaciones de hierro y níquel, y los rocoso-metálicos, que contienen mezclas de metal y roca. Cuando se abren y pulen o se hacen incisiones en ellos, estos objetos pueden mostrar intrincadas pautas hexagonales o una bella disposición de cristales verdosos suspendidos en un fondo metálico. Sin embargo, sólo un 5 % aproximadamente de los meteoritos contienen grandes cantidades de metal, y la gran mayoría son rocas formadas básicamente por silicatos. Estos meteoritos rocosos se dividen en dos amplios grupos dependiendo de si su estructura interna incluye cóndrulos, pequeñas esferas de roca de aproximadamente 1 milímetro de tamaño. Los meteoritos rocosos que poseen estos gránulos rocosos se conocen como condritas, y los que carecen de ellos se denominan acondritas.

Las condritas son la clase más común de meteoritos; constituyen casi el 90 % de los hallazgos conocidos. También tienen composiciones químicas particularmente interesantes. La mezcla de elementos que se encuentra en ciertas clases de condritas es notablemente similar a la del Sol. En otras palabras, estas rocas y el Sol tienen aproximadamente las mismas cantidades relativas de silicio, hierro, magnesio, so-

188 Orígenes

dio, níquel, fósforo, etc. La única diferencia importante entre la composición de las condritas y la constitución del Sol es que el Sol tiene concentraciones más altas de hidrógeno, helio, carbono, oxígeno, nitrógeno, neón y argón.* Todos estos elementos son o bien ligeros o bien químicamente inertes, de modo que pueden escapar fácilmente de objetos que carecen de un campo gravitatorio intenso como el del Sol. Por ello, los cosmoquímicos (las personas que estudian estas cosas) sospechan que tanto las condritas como el Sol se formaron a partir de los mismos materiales. Esto implica que las condritas son parte de nuestro Sistema Solar y no intrusos interestelares.

Su composición sugiere también que las condritas son reliquias de una etapa muy temprana en la historia del Sistema Solar, cuando los planetas empezaban a formarse a partir de un disco de polvo y gas que giraba alrededor de un Sol joven. Nuestro Sistema Solar entero surgió probablemente a partir de una enorme nube de polvo y gas que colapsó bajo su propia gravedad. Si esta nube estaba rotando antes de que empezara a colapsar, este movimiento circular favorecería de forma natural la formación de una estrella central rodeada por un disco aplastado. De hecho, observaciones recientes confirman que muchas estrellas jóvenes están rodeadas de un disco semejante. Este disco —que estaba compuesto esencialmente del mismo material que la estrella en su centro— suministró así la materia prima para los planetas, lunas, asteroides y cometas que se encuentran hoy en el Sistema Solar. Sin embargo, aunque condritas y planetas se formaron probablemente a partir del mismo material, las rocas encontradas en la Tierra y en otros planetas no tienen habitualmente composiciones condriticas debido a diversos procesos que alteraron la distribución de elementos en los objetos grandes. Por ejemplo, buena parte del hierro de la Tierra está localizado ahora en las profundidades de su núcleo, mientras que su corteza es rica en elementos como el silicio. Esta diferenciación refleja una redistribución global de material que probablemente ocurrió en un momento muy temprano en la historia de la Tierra, cuando el calor

* Las condritas también suelen tener fracciones más altas de litio que el Sol, probablemente porque las reacciones nucleares que dan energía al Sol suelen consumir litio.

procedente de la desintegración radiactiva y las colisiones con otros objetos mantenía el planeta en un estado parcialmente fundido, lo que permitió que se segregaran elementos con diferentes masas y propiedades químicas. Procesos similares han afectado a todos los planetas, la mayoría de las lunas e incluso ciertos asteroides. Puesto que las condritas parecen haber evitado estos fenómenos, estos objetos extremadamente antiguos pueden proporcionar una ventana a los orígenes del Sistema Solar.

Sección 9.2: Datación radiométrica para meteoritos

Como en los casos de la materia orgánica prehistórica y las rocas volcánicas descritos en capítulos anteriores, los científicos deducen la edad de los meteoritos a partir de la desintegración de núcleos inestables. Sin embargo, las técnicas radiométricas utilizadas con los meteoritos no son exactamente las mismas que los métodos de datación por carbono-14 y potasio-argón ya discutidos. La datación de meteoritos utiliza diferentes isótopos inestables y emplea una técnica distinta —y muy ingeniosa— para inferir cuántos núcleos inestables había originalmente en el material.

La datación de meteoritos plantea desafíos particulares porque no se dispone de ningún conjunto de datos que pueda utilizarse para documentar la composición isotópica original de los meteoritos; esto significa que las edades de los meteoritos no pueden calibrarse como las fechas por carbono-14. Además, a diferencia de la mayoría de las rocas en la Tierra, los meteoritos han sufrido colisiones antes de salir lanzados hacia nosotros. Estos choques podrían haber sido suficientemente violentos para que se perdieran todos o parte de los gases nobles de la roca. Por esta razón, técnicas como la datación por potasio-argón no dan necesariamente una estimación fiable de cuándo se formó el propio meteorito.

Si queremos estimar la edad de un meteorito tenemos que utilizar isótopos radiactivos que se desintegren en elementos que no puedan escapar fácilmente de la roca durante su tumultuosa vida. Uno de estos isótopos es el rubidio-87, una variante inestable del rubidio, un

190 Orígenes

elemento poco destacable. Este isótopo se convierte mediante desintegración beta en una variante estable del estroncio —estroncio-87, para ser exactos—. La semivida para esta desintegración es de unos 50.000 millones de años, de modo que podemos utilizar este núcleo para medir la edad de rocas muy viejas como los meteoritos. A diferencia del argón en el sistema potasio-argón, que normalmente es químicamente inerte, tanto el rubidio como el estroncio son elementos químicamente reactivos. Así, todo el estroncio-87 producido por la desintegración de rubidio-87 permanece en la roca incluso si ésta está expuesta a fuertes colisiones.

Sin embargo, las propiedades químicas del estroncio-87 también complican los esfuerzos por extraer una edad de la roca. Imaginemos que encontramos una roca que contiene 300 miligramos de rubidio-87 y 300 miligramos de estroncio-87. Entonces sabemos que siempre tuvo un total de 600 miligramos de alguna combinación de rubidio-87 y estroncio-87. Sin embargo, a diferencia del argón-40, el estroncio-87 es químicamente reactivo, de modo que existe la posibilidad de que alguna cantidad de este isótopo entrara en el meteorito cuando se estaba formando. Con sólo estos dos números es imposible decir cuánto del estroncio-87 estaba allí desde el principio y cuánto es producto de desintegración nuclear. Por consiguiente no podemos decir si la roca tenía inicialmente 600, 500 o 350 miligramos de rubidio-87. Necesitamos más información si queremos utilizar este contenido de rubidio y estroncio de la roca para estimar su edad.

Afortunadamente, las rocas, los meteoritos e incluso los cóndrulos no son objetos homogéneos sino que están hechos de varios minerales diferentes. Midiendo los contenidos de rubidio y estroncio de los diferentes componentes de la roca, podemos extraer información suficiente para obtener una fecha. Por ejemplo, supongamos que rompemos un meteorito en dos trozos con diferentes composiciones minerales; entonces podríamos medir la cantidad de rubidio-87 y estroncio-87 en ambos trozos. Además, por razones que se harán evidentes en un momento, medimos la cantidad de otro isótopo del estroncio, el estroncio-86, que no se produce por desintegración nuclear de otro elemento. Pongamos, hipotéticamente, que las composiciones de estos dos trozos del meteorito son:

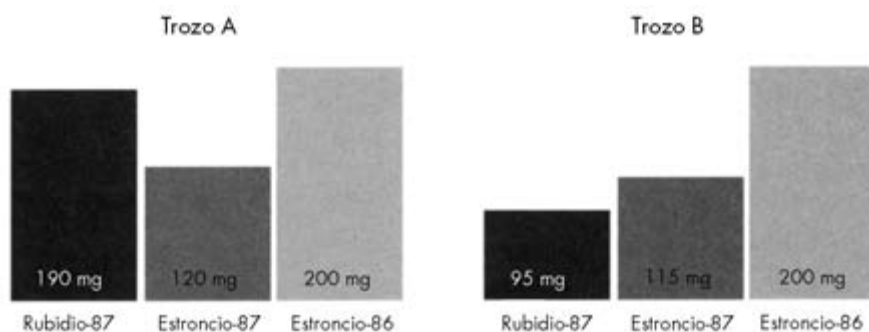
Los meteoritos y la edad del Sistema Solar 191

FIGURA 9.1.

El trozo A y el trozo B resultan tener la misma cantidad de estroncio-86, y diferentes cantidades de rubidio-87. Puesto que el rubidio y el estroncio tienen propiedades químicas diferentes, no es sorprendente que diferentes partes del meteorito tengan diferentes mezclas de dichos elementos. Sin embargo, la muestra con más rubidio-87 tiene también más estroncio-87. Esto sugiere que algo del estroncio-87 es resultado de desintegración nuclear y que la roca se formó hace algún tiempo.

Imaginemos que en algún momento teníamos una masa de roca fundida flotando en el espacio. A medida que este material se enfriaba, los diversos minerales en su interior empezaron a solidificarse. Debido a diferencias en su química, estos minerales incorporaron diferentes cantidades de rubidio y estroncio en sus estructuras cristalinas. Por el contrario, el estroncio-86 y el estroncio-87 son isótopos del mismo elemento, por lo que cualquier mineral debería haber absorbido a ambos al mismo ritmo. Esto significa que inmediatamente después de que el meteorito se formara, las dos muestras deberían haber contenido la misma cantidad no sólo de estroncio-86 sino también de estroncio-87. Con el paso del tiempo, una porción del rubidio-87 se desintegra, lo que produce más estroncio-87. El trozo A contiene más rubidio-87 que el trozo B, de modo que el trozo A ha sido capaz de acumular más estroncio-87 que el trozo B.

Puesto que sabemos las cantidades actuales de rubidio y estroncio en los dos trozos y la semivida del rubidio-87, podemos estimar cuán-

192 Orígenes

to rubidio-87 y estroncio-87 había en los dos trozos en cualquier instante en el pasado. Se necesitan aproximadamente 3.500 millones de años para que un 5 % del rubidio-87 se convierta en estroncio-87. Por lo tanto, hace 3.500 millones de años las muestras contenían un 5 % más de rubidio-87 que el que contienen ahora. El trozo B tendría así 100 miligramos de rubidio-87 en lugar de 95, y el trozo A tendría 200 miligramos en lugar de 190. Por consiguiente, la composición de los dos trozos de la roca hace 3.500 millones de años sería:

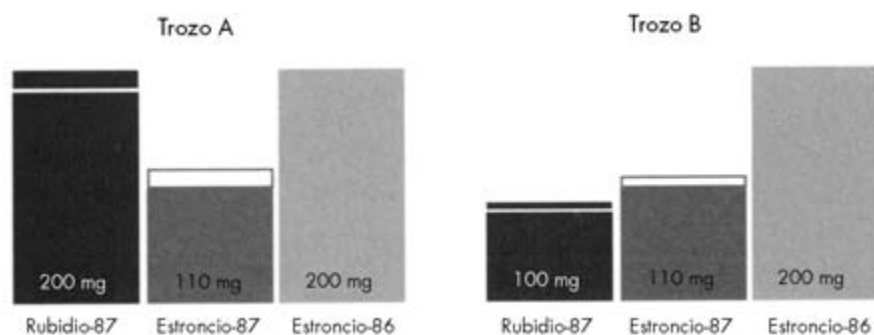


FIGURA 9.2.

Según estos cálculos, las dos partes del meteorito tendrían las mismas cantidades de estroncio-87 (110 mg) con relación a estroncio-86 (200 mg) hace 3.500 millones de años. Esto es lo que esperaríamos si los minerales se hubieran acabado de solidificar entonces, de modo que estos datos indican que la roca podría haberse formado hace 3.500 millones de años. Cálculos similares para otros porcentajes de desintegración demuestran que éste es el único momento en que las dos muestras tendrían la misma mezcla de estroncio-86 y estroncio-87. Si los dos trozos coalescieron al mismo tiempo en el mismo ambiente, ellos —y el meteorito— sólo podrían tener 3.500 millones de años.

El análisis anterior es una forma muy básica de datación isócrona, una técnica muy utilizada en el estudio de los meteoritos y otras rocas antiguas. En este sencillo ejemplo teníamos que suponer que ambas partes de la roca se formaron al mismo tiempo y en el mismo ambiente. En la práctica suele haber información suficiente en las rocas para determinar si los diversos minerales se formaron a la vez o no, de

Los meteoritos y la edad del Sistema Solar 193

modo que es realmente posible verificar esta hipótesis con datos de la propia roca. Para aprovechar todas las posibilidades que ofrece este método de datación, los cosmoquímicos deben medir los contenidos de rubidio-87, estroncio-87 y estroncio-86 de muchos minerales diferentes en el material. Con estos datos podemos calcular cuántos gramos de rubidio-87 o estroncio-87 hay por gramo de estroncio-86 en cada muestra, y con ello hacer una gráfica del contenido de rubidio-87 de los minerales frente a su contenido de estroncio-87. Este tipo de gráficas, habitualmente conocidas como diagramas isócronos, no sólo documentan la edad de la roca sino que también indican si dicha fecha es fiable.

Imaginemos, por ejemplo, que tuviéramos un meteorito que se aglutinó a partir de minerales que se formaron en momentos diferentes y en ambientes diferentes. En este caso, los contenidos de estroncio-87, estroncio-86 y rubidio-87 de estos minerales no tendrían ninguna relación obvia entre sí y el diagrama isócrono se parecería al de la Figura 9.3. Cada punto en este diagrama representa la composición de un solo mineral en este hipotético meteorito. Su posición a lo largo del eje vertical da la razón de estroncio-87 a estroncio-86, y su posición a lo largo del eje horizontal indica la razón de rubidio-87 a estroncio-86. Nótese que para esta colección aleatoria de minerales los

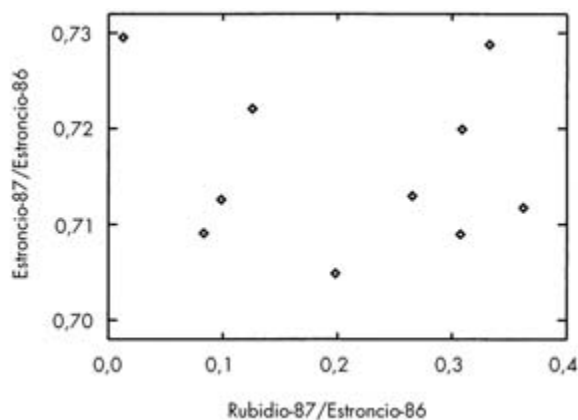


FIGURA 9.3. El diagrama isócrono de una roca agregada a partir de minerales formados en diferentes momentos y diferentes ambientes.

194 Orígenes

puntos están diseminados al azar, lo que muestra gráficamente la falta de cualquier relación entre el contenido de rubidio-87 y estroncio-87 de los minerales.

A continuación, imaginemos que tuviéramos una colección de minerales que se hubieran formado recientemente a partir de una única fuente. Si esta fuente contuviera 7 gramos de estroncio-87 por cada 10 gramos de estroncio-86, entonces todos los minerales tendrían también esta misma mezcla de isótopos de estroncio. El diagrama isócrono de dicha colección se parecería al de la Figura 9.4. Puesto que todos los minerales tienen la misma razón estroncio-87/estroncio-86, los puntos caen a lo largo de una línea horizontal. La distribución de puntos en un diagrama isócrono depende así de si los minerales tienen una fuente común o no. Esta distinción permanece incluso a medida que la roca envejece.

Supongamos ahora que pudiéramos dejar esta roca durante 5.000 millones de años y luego volviéramos a medir los contenidos de rubidio y estroncio de los diversos minerales. Durante este tiempo, alrededor de un 7 % del rubidio-87 se habrá desintegrado para dar estroncio-87. Esto significa que la muestra que originalmente tenía 0,3 gramos de rubidio-97 por gramo de estroncio-86 tendrá ahora sólo 0,28 gramos de rubidio-87 y 0,02 gramos adicionales de estroncio-87 por gra-

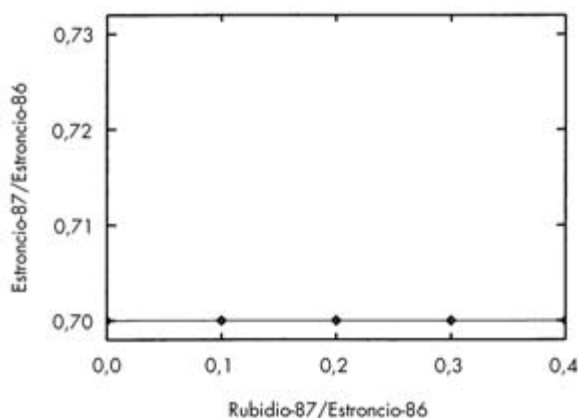


FIGURA 9.4. El diagrama isócrono de una colección de minerales que se formaron recientemente a partir de una misma fuente.

mo de estroncio-86. Por la misma razón, el mineral que tenía un contenido original de rubidio-87 de 0,4 tendrá hoy un contenido de rubidio-87 de aproximadamente 0,37 y casi un 0,03 adicional en su contenido de estroncio-87. Si volvemos a dibujar el diagrama isócrono, obtenemos algo parecido a la Figura 9.5 (los puntos claros indican cómo ha cambiado la composición de cada mineral durante los últimos 5.000 millones de años). Los puntos siguen cayendo a lo largo de una recta, pero ésta ya no es horizontal porque los minerales que contenían más rubidio-87 tienen una cantidad mayor de estroncio-87 generado mediante desintegración radiactiva. Nótese que la recta sigue cortando al eje-y en 0,7, que es la razón estroncio-87/estroncio-86 que tenía la roca originalmente. Para entender por qué sucede esto, advirtamos que el eje y de este diagrama corresponde a un mineral que carece por completo de rubidio-87, y el contenido de estroncio-87 de dicho mineral no cambia nunca. Por consiguiente, el punto de corte de esta recta con el eje y ofrece una medida del contenido original de estroncio-87 de todos los minerales. Conocido este número, podemos calcular cuánto estroncio-87 en cualquier mineral es debido a la desintegración de rubidio-87 y determinar la edad del meteorito. Alternati-

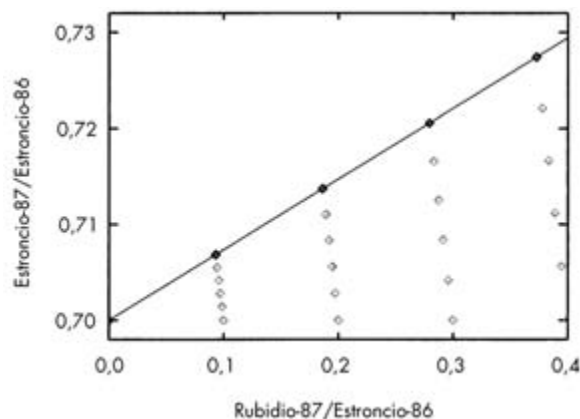


FIGURA 9.5. El diagrama isócrono de una roca formada a partir de una misma fuente hace 5.000 millones de años. (Los puntos grises indican cómo ha cambiado la composición de cada mineral durante los últimos 5.000 millones de años.)

196 Orígenes

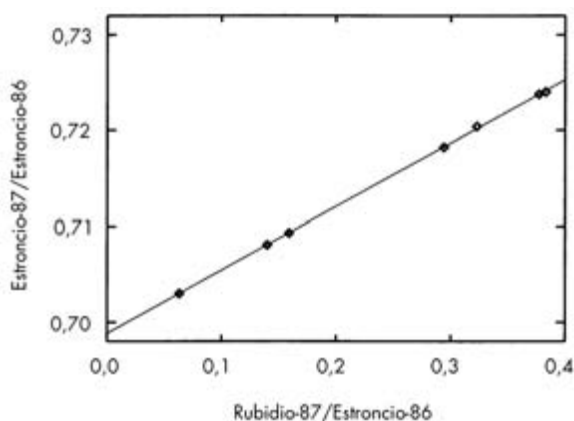


FIGURA 9.6. Diagrama isócrono del meteorito condrito Tieschitz.

vamente, podemos encontrar la edad de la roca midiendo simplemente la pendiente de la recta, que aumenta continuamente a medida que la roca envejece.

Finalmente, la Figura 9.6 presenta algunos datos reales de un meteorito condrito llamado Tieschitz.* Nótese que los datos caen a lo largo de una recta, lo que indica que los diversos componentes del meteorito se formaron al mismo tiempo a partir de una fuente común. La ordenada en el origen de esta recta indica que la razón estroncio-87/estroncio-86 original era aproximadamente 0,7, y la pendiente de la recta nos dice que los minerales en este cuerpo se solidificaron hace aproximadamente 4.500 millones de años. Casi todas las condritas bien datadas y muchas acondritas tienen edades estimadas comparables, lo que las hace decenas de millones de años más viejas que las rocas más antiguas encontradas en la Tierra. Esto apoya la idea de que estos objetos son reliquias del primitivo Sistema Solar y sugiere que podrían proporcionar ideas sobre la formación de objetos sólidos en el Sistema Solar.

* Datos procedentes de J.-F. Minster y C. J. Allegre, «⁸⁷Rb-⁸⁷Sr Chronology of the H Chondrites...» en *Earth and Planetary Science Letters* 42 (1979): 333-347.

Sección 9.3: Isótopos de corta vida y edades refinadas

La transformación de un disco de polvo y gas alrededor de un Sol joven en los asteroides, cometas, lunas y planetas de hoy fue un proceso complicado. Simulaciones por computador y observaciones de discos de polvo y sistemas solares en torno a otras estrellas han contribuido a nuestra comprensión de cómo se formó el Sistema Solar. Los meteoritos —especialmente las condritas— también pueden desempeñar un papel particularmente importante en esta área de conocimiento debido a su antigüedad.

Los meteoritos condriticos son básicamente aglomeraciones de muchas gotas de tamaño milimétrico de material, como los cóndrulos, que se mantienen unidas en una matriz rocosa. Muchos investigadores sospechan que la mayoría de los objetos en el Sistema Solar interno se formaron originalmente a partir de tales cuerpos minúsculos, como se ilustra en la Figura 9.7. Según este modelo, los cóndrulos y otros objetos pequeños son una combinación de granos de polvo fundidos y gases condensados. Estos pequeños trozos de roca chocaban unos con otros, y en ocasiones se quedaban pegados para formar terrones de varios tamaños. Algunos de éstos no acumularon mucho material y quedaron como aglomerados compactos y relativamente pequeños de cóndrulos y polvo. Otros consiguieron acumular más material. El calor aportado a estas rocas por la desintegración nuclear y las colisiones no podía escapar eficazmente de estos cuerpos más grandes, lo que elevó su temperatura interna hasta que la roca se fundió parcial o totalmente. Esto destruyó la textura condritica de las rocas, puso a cero sus relojes radiométricos y permitió que materiales con diferentes propiedades químicas se redistribuyeran a lo largo del cuerpo, dando un núcleo rico en metales y una capa externa rica en silicatos.

Con el tiempo, las rocas más pequeñas fueron agregándose en objetos cada vez más grandes. Cuanto más grande es un objeto, más intenso es el campo gravitatorio que crea, de modo que los objetos más grandes pudieron crecer rápidamente y la mayor parte del material acabó finalmente en unos pocos objetos del tamaño de planetas. Parte del material, sin embargo, permaneció en forma de cuerpos más pequeños tales como asteroides. Las colisiones entre estos objetos pro-

198 Orígenes

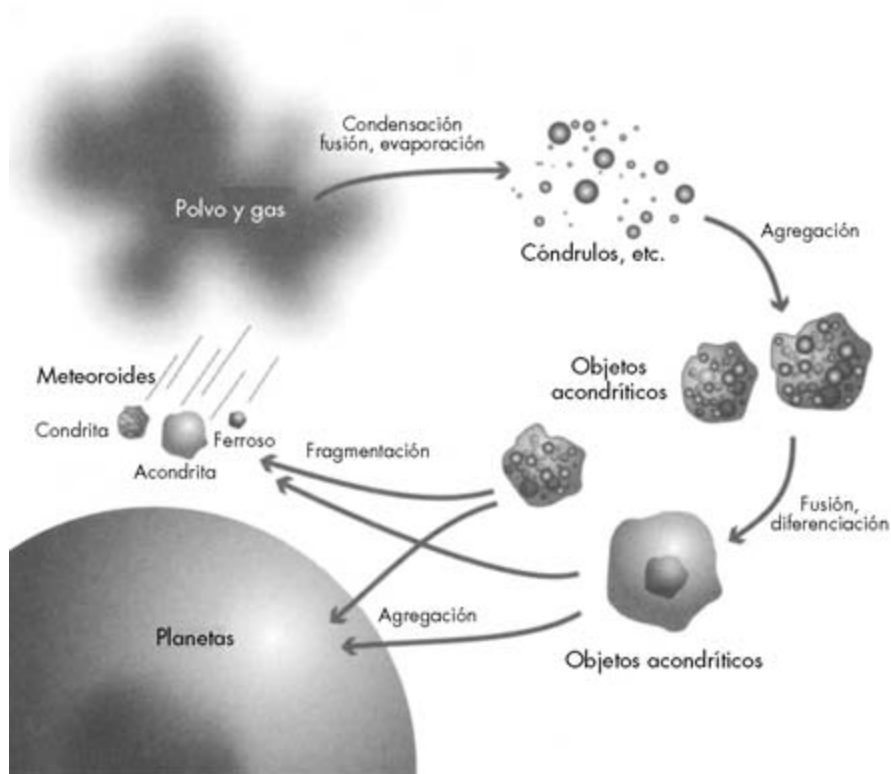


FIGURA 9.7. Una ilustración de los pasos por los que podría haberse formado el material sólido en el Sistema Solar interno. En primer lugar, el polvo y el gas que rodean al primitivo Sol se condensan y funden para formar pequeños objetos (de aproximadamente 1 milímetro) como condritas. A continuación, estos objetos se agregan en objetos condriticos cada vez más grandes. Algunos de estos objetos se funden y diferencian, lo que destruye los cóndrulos en su interior. Cuando estos objetos colisionan entre sí, a veces producen fragmentos como meteoritos, mientras que otras veces se quedan adheridos. Unos pocos objetos acumulan material suficiente para crecer hasta alcanzar el tamaño de planetas.

ducirían fragmentos que salían disparados a través del espacio para estrellarse finalmente en la Tierra. Las colisiones entre asteroides suficientemente pequeños o suficientemente fríos para seguir siendo una colección de cóndrulos produjeron las condritas, mientras que ob-

Los meteoritos y la edad del Sistema Solar 199

jetos que se habían fundido parcial o totalmente dieron lugar a algunas acondritas o meteoritos metálicos.

Es importante advertir que sólo objetos en ciertas órbitas pueden colisionar con la Tierra, de modo que los meteoritos que tenemos para estudiar no nos dan necesariamente una imagen completa de todo el Sistema Solar. Por ejemplo, es probable que a distancias suficientemente alejadas del Sol el material rocoso se formara junto con grandes cantidades de hielo sólido. El primitivo Sistema Solar externo, donde ahora residen los planetas gigantes, tuvo probablemente una historia muy diferente de las regiones más próximas a nosotros. Por consiguiente, quizá el modelo anterior sólo sea aplicable a la formación del Sistema Solar interno, donde se encuentran Mercurio, Venus, la Tierra, Marte y muchos de los asteroides.

Incluso si la secuencia básica de sucesos ilustrada en la Figura 9.7 es razonable dados los datos disponibles,* hay muchas cuestiones abiertas sobre los detalles de estos diferentes pasos, tales como: ¿qué hizo que el polvo se fundiera?, ¿cómo quedaron incorporados los cóndrulos en objetos del tamaño de asteroides?, ¿cuánto tiempo se necesitó para que se diferenciaran los objetos grandes? Para responder a este tipo de preguntas los investigadores han estado examinando con gran detalle los diversos componentes de meteoritos condriticos. Aunque las condritas en conjunto pueden tener una constitución química similar a la del Sol, diferentes partes de estas rocas contienen minerales con una variedad de estructuras y composiciones. Los minerales y las mezclas de elementos que se encuentran en los cóndrulos no son los mismos que los que se encuentran en la matriz que les rodea, e incluso los propios cóndrulos pueden contener varias estructuras minerales y un abanico de composiciones de elementos e isótopos diferentes. Estudios cuidadosos de la mineralogía y la composición isotópica de estos diferentes componentes están ofreciendo una información fasci-

* Nótese que algunos científicos planetarios han sugerido escenarios alternativos en los que los cóndrulos no se formaron directamente a partir de una acumulación de polvo y gas, sino que aparecieron cuando objetos más grandes y parcialmente fundidos colisionaron entre sí. Ellos sugieren que tales colisiones producirían espráis de roca líquida en el espacio, que luego se solidificarían en granos minúsculos similares a cóndrulos.

200 Orígenes

nante sobre las temperaturas y ambientes químicos en que dichos cuerpos se formaron. Sin embargo, métodos de datación más precisos también pueden ofrecer ideas sobre la secuencia y duración de los sucesos que produjeron tanto condritas como acondritas.

El escenario ilustrado en la Figura 9.7 sugiere que los cóndrulos o las condritas deberían ser en general algo más viejos que las acondritas. Además, dentro de las condritas, regiones con propiedades químicas diferentes podrían haberse condensado en momentos diferentes. Por ejemplo, en los meteoritos hay trozos de material con formas irregulares que contienen grandes cantidades de calcio y aluminio. Estas inclusiones ricas-en-calcio-y-aluminio, o CAI, contienen minerales y elementos que se funden a temperaturas más altas que los materiales que se encuentran típicamente en otras partes de las condritas. También estos minerales se condensarían con relativa rapidez a partir de un estado líquido o gaseoso, de modo que esperamos que las CAI se hubieran formado incluso antes que los cóndrulos y el resto de los materiales condriticos.

Para poner a prueba hipótesis de este tipo, los científicos planetarios necesitan una manera de medir con precisión las diferencias de edad entre CAI, cóndrulos y acondritas. Este tipo de datación de precisión no incluye habitualmente el método por rubidio-estroncio descrito antes. La semivida extremadamente larga del rubidio-87, que le hace útil para medir la edad absoluta de rocas antiguas, también significa que se necesita mucho tiempo para que el contenido del rubidio-87 cambie en una cantidad detectable. Por consiguiente, es difícil establecer si las CAI son más viejas que los cóndrulos con este isótopo de larga vida. Para resolver claramente diferencias de edad entre estos objetos, los científicos emplean núcleos radiactivos con semividas más cortas. De hecho, se ha obtenido mucha información útil a partir de isótopos de corta vida como el aluminio-26, que se transforma en magnesio-26 con una semivida de sólo 730.000 años.

A primera vista puede parecer extraño que un isótopo como el aluminio-26 pueda proporcionar información útil sobre sucesos que ocurrieron hace más de 4.500 millones de años. Ciertamente, todo el aluminio-26 en cualquier CAI o cóndrulo se ha desintegrado hace tiempo, de modo que no podemos medir el contenido de aluminio-26

Los meteoritos y la edad del Sistema Solar 201

en un meteorito hoy y calcular cuánto tiempo hace que se formó la roca. Sin embargo, puesto que es probable que la cantidad de aluminio-26 existente cuando se formaron los cóndrulos y las CAI cambie con el tiempo por desintegración de los núcleos, objetos que se forman en diferentes momentos tendrán en principio diferentes contenidos de aluminio-26 cuando se solidifican. Por consiguiente, si podemos medir el contenido inicial de aluminio-26 de estos objetos, quizá podamos descubrir qué objetos se formaron primero y cuáles se formaron más tarde.

La cantidad inicial de aluminio-26 en una roca puede medirse porque deja una huella detectable en el contenido de magnesio y aluminio de la roca. Más exactamente, la presencia pasada de aluminio-26 deja un exceso de magnesio-26 en varios minerales, igual que la presencia pasada de rubidio-87 deja un exceso de estroncio-87. Ya hemos visto que los datos procedentes de minerales diferentes nos permiten descubrir cuánto del estroncio-87 en la roca estaba allí originalmente y cuánto era debido a la desintegración del rubidio-87. De un modo similar podemos determinar cuánto del magnesio-26 en la roca es primordial y cuánto deriva de la desintegración del aluminio-26. Para hacerlo debemos comparar el contenido de magnesio-26 de varios minerales con diferentes concentraciones de los isótopos estables y no radiogénicos de magnesio y aluminio —el magnesio-24 y el aluminio-27.

Imaginemos que hemos extraído un solo cóndrulo o una CAI de un meteorito y hemos medido los contenidos de magnesio-24, magnesio-26 y aluminio-27 de varios minerales diferentes en su interior. A partir de estos datos podríamos calcular cuánto aluminio-27 y magnesio-26 hay por miligramo de magnesio-24 en cada mineral, y representar estos datos en una gráfica. La Figura 9.8 muestra algunos ejemplos de resultados de este tipo de análisis, que incluyen datos de una CAI perteneciente al meteorito Allende junto con las medidas de un cóndrulo del meteorito Inman. Recordemos que el magnesio-24 y el magnesio-26 tienen propiedades químicas casi idénticas, de modo que esperamos que todos estos objetos contuvieran la misma mezcla de isótopos de magnesio cuando se formaron, con tal de que todos se formaran en el mismo ambiente y obtuvieran su magnesio de la misma

202 Orígenes

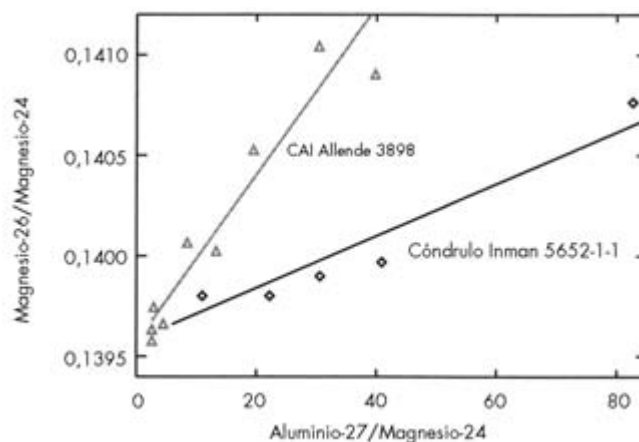


FIGURA 9.8. Diagramas isócronos que revelan los contenidos iniciales de aluminio-26 de una CAI y un cóndrulo. Los triángulos son datos de una CAI perteneciente al meteorito Allende, y los rombos proceden de un cóndrulo del meteorito Inman. Los datos están ligeramente resaltados por claridad, y las líneas dibujadas a través de los puntos sirven simplemente para guiar la vista. Tanto el meteorito Allende como el cóndrulo Inman muestran una correlación entre magnesio-26 y aluminio-27, lo que sugiere que ambos contenían algo de aluminio-26 cuando se formaron. La mayor pendiente de los datos de la CAI implica que contenía más aluminio-26 que el cóndrulo, y por ello es probable que se formara antes.

fuelle. Sin embargo, para la CAI Allende y el cóndrulo Inman encontramos hoy que cuanto más aluminio contiene un mineral, mayor es su razón magnesio-26/magnesio-24. Por lo tanto, el contenido de magnesio de dichos minerales debe haber cambiado después de que dichos objetos se solidificaran. Puesto que el contenido de magnesio-26 está correlacionado con el contenido de aluminio-27, es muy probable que la desintegración del aluminio-26 sea responsable de las razones de magnesio alteradas. Imaginemos que cuando se formaron inicialmente los minerales en estos objetos contenían aluminio-26 y aluminio-27. De nuevo, las propiedades químicas de estos dos isótopos del aluminio son casi las mismas, de modo que los minerales que tienen hoy más aluminio-27 también debían haber tenido más aluminio-26 cuando se solidificaron. Al cabo de algunos millones de años, este alumi-

Los meteoritos y la edad del Sistema Solar 203

nio-26 se convirtió en magnesio-26, aumentando así la razón magnesio-26/magnesio-24 en las muestras. Los minerales con un contenido de aluminio más alto habrían adquirido entonces más magnesio-26 de la desintegración del aluminio-26 que los minerales con concentraciones de aluminio más bajas, exactamente como observamos.

Como sucede con el diagrama isócrono rubidio-estroncio, podemos calcular el contenido original de magnesio y aluminio de los diversos minerales ajustando una recta a los datos. De nuevo, el punto en donde la recta corta al eje y nos dice el contenido de magnesio-26 de un mineral que nunca contuvo aluminio. Un mineral que no tiene nada de aluminio no obtendrá magnesio-26 por desintegración radiactiva, de modo que dicho material seguirá teniendo la misma razón magnesio-26/magnesio-24 que tenía cuando se formó inicialmente. Suponiendo que todos los minerales de cada roca se formaron en el mismo ambiente, éste debería ser también el contenido original de magnesio-26 de todos los minerales. En este ejemplo resulta que los dos objetos tenían originalmente una razón magnesio-26/magnesio-24 de aproximadamente 0,139. Hoy, sin embargo, la CAI contiene claramente más magnesio-26 que el cóndrulo. Por lo tanto tenía que contener más aluminio-26 cuando se formó. De hecho, para cualquier valor dado de la razón aluminio-27/magnesio-26, la CAI tiene un exceso de magnesio-26 cuatro veces mayor que el cóndrulo, de modo que la CAI debería haber contenido originalmente cuatro veces más aluminio-26 que el cóndrulo.

Si ahora suponemos que estos dos objetos se formaron en el mismo ambiente en momentos diferentes, entonces la diferencia en el contenido de aluminio-26 de las dos rocas nos permite estimar la diferencia entre las edades de dichos objetos. Para ver cómo funciona esto, imaginemos que la CAI y el cóndrulo coalescieron en momentos diferentes a partir de una nube de polvo y gas que contenía aluminio-26. Con el paso de los milenios el nivel de aluminio-26 decrece de manera constante, lo que deja menos aluminio-26 disponible para ser absorbido en las rocas sólidas que se van formando. Puesto que la CAI contenía originalmente más aluminio-26 que el cóndrulo, la CAI debe haberse formado antes, cuando el contenido de aluminio-26 de la nube era más alto. Además, el cóndrulo contenía originalmente una

204 *Orígenes*

cuarta parte del aluminio-26 que contenía la CAI, de modo que el contenido de aluminio-26 de la nube debe haber disminuido en un factor cuatro entre los momentos en que se formaron la CAI y el cóndrulo. Puesto que la semivida del aluminio-26 es de unos 730.000 años, el cóndrulo debe haberse solidificado poco más de 1,5 millones de años después de que lo hiciera la CAI.

Medidas del contenido inicial de aluminio-26 de CAI y cóndrulos revelan pautas muy interesantes. Las CAI típicas, como la CAI de Allende, tenían originalmente unos 45 microgramos de aluminio-26 por gramo de aluminio. Por el contrario, la mayoría de los cóndrulos que han estudiado los cosmoquímicos tenían originalmente menos de 20 microgramos de aluminio-26 por gramo de aluminio. Por último, se ha encontrado que el contenido original de aluminio-26 de varias acondritas era extremadamente bajo (sólo unas pocas partes por millón). Estos datos indican que las CAI estaban entre los primeros objetos en solidificarse en el primitivo Sistema Solar, lo que es ciertamente razonable dada su composición química refractaria. Recientemente se han descubierto algunos cóndrulos con niveles de aluminio-26 comparables a los de las CAI, lo que implica que al menos algunos cóndrulos empezaron a formarse aproximadamente al mismo tiempo que las CAI. Sin embargo, el menor contenido de aluminio-26 de muchos cóndrulos sugiere que siguieron apareciendo durante algunos millones de años después. Finalmente, los minúsculos, casi indetectables niveles de aluminio-26 de algunas acondritas, implican que éstas se formaron aún más tarde, posiblemente por re-procesado de cóndrulos. Esta secuencia de sucesos es más o menos compatible con el modelo de formación de cuerpos sólidos que se ilustra en la Figura 9.7.

Por supuesto, estas estimaciones de edad suponen que todos estos objetos obtuvieron su aluminio-26 de una fuente común distribuida uniformemente a lo largo del primitivo Sistema Solar. Además, suponen que el contenido de aluminio-26 de dicha fuente disminuyó continuamente con el tiempo y nunca se repuso. Esto plantea la pregunta de cuál era el origen de este aluminio-26 y por qué estaba presente precisamente cuando se estaban formando las CAI. Una fuente posible de aluminio-26 es el propio Sol. Partículas de alta energía creadas por

Los meteoritos y la edad del Sistema Solar 205

una estrella joven podrían producir algo de aluminio-26 cuando colisionan con el polvo y el gas de la nube que le rodea. Si fuera así, entonces habría un flujo constante de aluminio-26 en la nebulosa solar y no deberíamos considerar que el aluminio-26 sea un método fiable de medir el tiempo. De hecho, si nuestro Sol fuera la fuente del aluminio-26, entonces las diferencias entre CAI y cóndrulos nos dirían más acerca de *dónde* se formaron estos objetos que acerca de *cuándo* se formaron. Por ejemplo, podría ser cierto que las CAI se formaron más cerca del Sol, donde los niveles de aluminio-26 eran altos, y los cóndrulos se formaron más lejos del Sol. Sin embargo, hay evidencias de otros isótopos de corta vida (como el manganeso-53) que sugieren que esta explicación no es muy probable. Cada uno de estos isótopos puede utilizarse para estimar cuándo se formaron estos objetos, y todos presentan una imagen similar de la secuencia de sucesos que acaecieron en el primitivo Sistema Solar. Asimismo, la distribución de estos isótopos en cóndrulos y CAI parece ser incompatible con la predicha radiación de partículas energéticas desde el Sol.

Otra explicación para el aluminio-26 y otros núcleos de corta vida en el primitivo Sistema Solar es que vinieron de fuera del Sistema Solar en una única ráfaga, quizá debida a la explosión de una estrella relativamente próxima —un fenómeno conocido como supernova—. Esta teoría es atractiva por dos razones. En primer lugar, las partículas lanzadas al espacio por una explosión semejante podrían sembrar el primitivo Sistema Solar de aluminio-26 y otros núcleos inestables. En segundo lugar, las ondas de choque asociadas con la supernova podrían haber perturbado una nube de polvo y gas, haciéndola colapsar y desencadenando la formación del Sistema Solar aproximadamente al mismo tiempo en que se estaba llenando de aluminio-26. En este escenario es probable que las estimaciones de edad basadas en estos elementos radiactivos de corta vida sean básicamente correctas. No obstante, incluso si una supernova produjo la mayor parte del aluminio-26 en el primitivo Sistema Solar, sigue siendo posible que también el Sol añadiera algo de aluminio-26 a la mezcla. También hay una posibilidad de que el aluminio-26 no estuviera distribuido uniformemente en el Sistema Solar. Estas cuestiones podrían complicar nuestros esfuerzos por entender el Sistema Solar primitivo.

206 Orígenes

Gracias a los avances en geoquímica, es ahora posible poner a prueba la hipótesis de que tanto el aluminio-26 como otros núcleos estaban distribuidos uniformemente a lo largo del Sistema Solar. Recientemente, un método de datación similar a la aproximación rubidio-estroncio se ha refinado hasta el punto de que puede dar una medida precisa y extremadamente fiable de cuánto tiempo hace que se formó un cóndrulo o una CAI. Este método utiliza el más famoso de los isótopos radiactivos, el uranio.

Sección 9.4: Escala fina de fechas absolutas con el sistema uranio-plomo

El elemento uranio tiene un núcleo muy pesado, con 92 protones y mucho más de 100 neutrones. En la naturaleza se encuentran dos isótopos comunes del uranio, el uranio-235 y el uranio-238. Ambos son inestables y se desintegran a través de una compleja serie de pasos en dos isótopos diferentes del plomo: el uranio-235 se desintegra en plomo-207 con una semivida de 700 millones de años; el uranio-238 se desintegra en plomo-206 con una semivida de 4.500 millones de años.

Las semividas de los isótopos de uranio son suficientemente largas para que cierta cantidad de uranio persista en los meteoritos cóndríticos en la actualidad. Por ello, podríamos hacer un análisis de los contenidos de uranio y plomo de diversos minerales en un material (similar al análisis anterior del contenido de rubidio-estroncio) para obtener una estimación de la edad del material. Puesto que las semividas de los isótopos de uranio son considerablemente más cortas que la del rubidio-87, los datos uranio-plomo deberían producir una estimación más precisa que los datos rubidio-estroncio. Sin embargo, aún podemos hacer algo mejor. Puesto que hay dos isótopos diferentes de uranio que se desintegran en dos diferentes isótopos de plomo con dos semividas diferentes, el contenido de plomo de la roca nos proporciona por sí solo una estimación de cuándo se formó el material.

Imaginemos otra vez un meteorito recién formado compuesto de varios minerales diferentes. Extraemos minerales de esta roca y medimos la cantidad de plomo-206, plomo-207 y plomo-204 en cada uno.

Los meteoritos y la edad del Sistema Solar 207

Recordemos que los isótopos del mismo elemento tienen una química prácticamente idéntica, de modo que son recogidos en las mismas proporciones por cualquier mineral dentro de la roca. Por lo tanto, las diversas muestras tendrán la misma mezcla de isótopos, y si hacemos un diagrama de la cantidad de plomo-207 y plomo-206 por gramo de plomo-204 en cada muestra, todos los puntos caerán en el mismo lugar, como se muestra en el panel superior izquierdo de la Figura 9.9.

Esta sencilla situación no durará, sin embargo, porque estos minerales también adquirieron cierta cantidad de uranio, y con el tiempo el uranio se desintegrará en plomo y alterará las razones isotópicas de los diferentes minerales. El plomo-204 no es producido por desintegración nuclear, de modo que su cantidad en cada muestra permanecerá constante. Mientras tanto, los niveles de plomo-206 y plomo-207 aumentarán continuamente a medida que se desintegran el uranio-238 y el uranio-235. Puesto que el uranio-235 y el uranio-238 son también isótopos del mismo elemento, todos los minerales contenían originalmente la misma mezcla de estos dos núcleos. A medida que se desintegra el uranio, todos los minerales adquirirán las mismas proporcio-

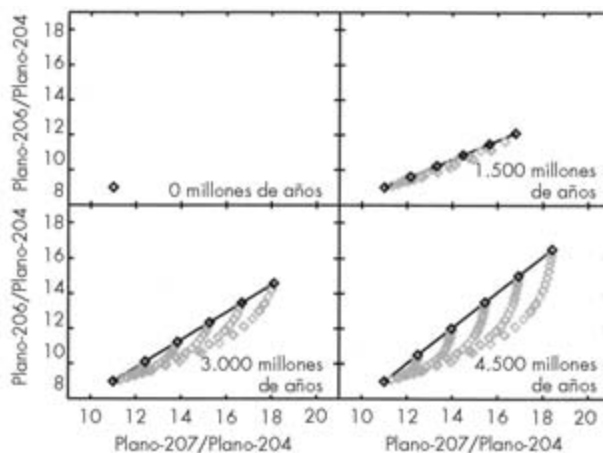


FIGURA 9.9. Datación isócrona plomo-plomo. Cada panel muestra la mezcla de isótopos de plomo en una roca hipotética en varios momentos después de su formación. Los puntos grises muestran cómo ha cambiado con el tiempo la composición isotópica de cada mineral. Nótese que la pendiente de la recta aumenta continuamente con el tiempo.

208 *Orígenes*

nes de los nuevos plomo-206 y plomo-207. Sin embargo, la cantidad total de uranio será diferente en muestras diferentes, de modo que la cantidad total de plomo-206 y plomo-207 producidos varía de una mezcla a otra.

Supongamos que examinamos de nuevo los minerales 1.500 millones de años después de que se formaran. Esto nos daría un diagrama como el que se muestra en el panel superior derecho de la Figura 9.9. Los puntos caen a lo largo de una línea recta porque todos los minerales producen el mismo número de gramos de plomo-207 por gramo de plomo-206. La pendiente de esta recta es pequeña porque el uranio-235 tiene una semivida más corta que el uranio-238, de modo que la cantidad de plomo-207 en cualquier muestra aumenta más rápidamente que la cantidad de plomo-206. Sin embargo, conforme pasa el tiempo la recta se hace más inclinada porque se desintegra cada vez más uranio, como se muestra en los paneles inferiores de la Figura 9.9. La pendiente de esta recta proporciona así una manera de estimar cuándo se formó la roca, igual que lo hacía el sistema rubidio-estroncio antes descrito. Sin embargo, una estimación de la edad basada en el contenido de plomo de la roca puede, en principio, ser mucho más fiable y precisa que una basada en un análisis rubidio-estroncio. No sólo las semividas relevantes son más cortas sino que es menos probable que las propias medidas se vean afectadas por errores sistemáticos. Una estimación de la edad basada en el sistema rubidio-estroncio nos obliga a determinar las cantidades de dos elementos diferentes en cada muestra. Puesto que estos elementos tienen propiedades químicas diferentes, hay que asegurarse de que el equipo de medida no detecte el rubidio de forma más eficiente que el estroncio, o viceversa. Por el contrario, con el sistema uranio-plomo sólo es necesario medir las cantidades relativas de tres isótopos de un solo elemento. Esto es en principio una tarea sencilla, de modo que las estimaciones de edad que proporciona este proceso pueden ser extremadamente precisas.

En 1992 se obtuvo para una acondrita una edad de 4.558 millones de años, con una incertidumbre de sólo 500.000 años. Luego, en 2002, otro equipo estimó la edad de cóndrulos de una condrita en 4.564 miles de millones de años y la edad de dos CAI de otra condrita en 4.567 miles de millones de años, siempre con márgenes de error significati-

Los meteoritos y la edad del Sistema Solar 209

vamente menores que un millón de años. Estos datos —que son impresionantemente exactos para objetos tan antiguos— confirman que algunos cóndrulos se formaron algunos millones de años después de las CAI, y que los materiales acondríticos se formaron todavía más tarde. Esto significa que la cronología basada en núcleos de corta vida es básicamente correcta, y que probablemente una gran cantidad de aluminio-26 se depositó en el primitivo Sistema Solar en una sola ráfaga. Esto apoya la idea de que una supernova cercana puede haber desempeñado un papel central en la historia temprana de nuestro Sistema Solar.

Los datos procedentes de isótopos de corta vida y del sistema uranio-plomo —junto con otros métodos de datación y estudios cuidadosos de las estructuras minerales presentes en objetos como CAI y cóndrulos— nos ayudan a entender cómo era nuestro Sistema Solar hace 4.500 millones de años. Por ejemplo, el hecho de que CAI y cóndrulos no se formaran al mismo tiempo significa que no aparecieron tras un suceso único como la supernova antes citada. En su lugar, los procesos responsables de la creación de estos objetos deben haber actuado durante millones de años: ondas de choque en el disco, llamaradas solares, colisiones e incluso relámpagos nebulares son algunas posibilidades que están siendo consideradas.

Queda aún mucho trabajo por hacer antes de que tengamos una comprensión sólida de cómo una nube de polvo y gas se convirtió en una colección de objetos sólidos. Por ejemplo, actualmente sólo tenemos estimaciones de edad para un número limitado de cóndrulos y CAI. Esto no se debe sólo a que estas medidas requieran tiempo, sino también a que las rocas tienen que tener cantidades detectables de aluminio o uranio. A medida que se han ido refinando estas técnicas, los cosmoquímicos han podido datar cada vez más fragmentos de meteoritos condriticos. Esto no sólo servirá para confirmar o negar la cronología anterior, sino que también nos ayudará a entender cómo se incorporaron estas partículas de tamaño milimétrico en cuerpos mayores. Según algunos investigadores, el gas en el primitivo Sistema Solar debería haber frenado los objetos pequeños como cóndrulos y CAI y los habría enviado en trayectorias espirales hacia el Sol. No está claro cómo las CAI podrían haber evitado el Sol durante millones

210 Orígenes

de años mientras se formaban las condritas. Quizá las CAI encontraron refugio en objetos más grandes a medida que se desarrollaban los cóndrulos, o quizá vientos y descargas del Sol primitivo mantuvieron a estos cuerpos en el espacio durante algunos millones de años hasta que todos fueron barridos por asteroides primitivos y proto-planetas. Confiamos en que, midiendo las distribuciones de edad de CAI y cóndrulos de meteoritos individuales, algún día sabremos cuál de estos escenarios está más próximo a lo que sucedió realmente.

Ya se está avanzando en esta empresa. En 2004, un informe describía los contenidos de aluminio-26 de CAI y cóndrulos extraídos de un único meteorito. En esta roca todas las CAI tenían prácticamente los mismos contenidos iniciales de aluminio-26, aproximadamente 50 partes de aluminio-26 por millón de partes de aluminio. Los cóndrulos, por el contrario, tienen un abanico de contenidos iniciales de aluminio-26: desde 50 partes por millón a menos de 20 partes por millón. Esto implica que este meteorito contiene granos con un abanico de edades. Más recientemente incluso, en 2005, un equipo anunció que ciertas acondritas pueden ser tan viejas como los cóndrulos, lo que implica que algunos objetos se estaban diferenciando muy pronto. A medida que se extraigan más datos de meteoritos en los próximos años, los investigadores deberían poder encajar estas piezas de información en una imagen mucho más clara de los orígenes e historia temprana de nuestro Sistema Solar.

Por supuesto, hay muchos otros sistemas estelares además del nuestro dispersos a lo largo de la galaxia, y cada uno de ellos tiene una historia que contar. Puesto que sólo podemos observarlos a distancia, obtener información detallada de estrellas más allá de nuestro Sol plantea retos especiales, pero un examen cuidadoso de la luz de ciertas estrellas ha proporcionado claves valiosas sobre sus historias y sus edades.

Sección 9.5: Lecturas adicionales

Para detalles sobre el meteorito de Park Forest, véase S. B. Simon *et al.*, «The Fall, Recovery, and Classification of the Park Forest Meteorite» en *Meteoritics and Planetary Science* 39, n.º 4 (2004): 625-634.

Para una bonita introducción a los meteoritos, véase Harry McSween, *Meteorites and Their Parent Planets*, 2.^a ed. (Cambridge University Press, 2000) y J. Nelly Beatty, Carolyn C. Petersen y Andrew Chaikin, *The New Solar System*, 4.^a ed. (Cambridge University Press, 1999) y Paul Weissman, Lucy-Ann L. McFadden y Torrence Johnson, *Encyclopedia of the Solar System* (Academic Press, 1999).

Para revisiones más técnicas sobre meteoritos, consultar Vincent Mannings, Alan P. Boss y Sara S. Russell, eds., *Protostars and Planets IV* (University of Arizona Press, 2000); A. M. Davis, ed., *Meteorites, Comets, and Planets*, vol. I de *Treatise on Geochemistry*; H. D. Holland y K. K. Turekian, editores generales (Pergamos, 2004); y Robert Hutchinson, *Meteorites* (Cambridge University Press, 2004).

Para más detalles sobre diagramas isócronos y datación radiométrica véase libros de texto sobre geoquímica tales como A. H. Brownlow, *Geochemistry*, 2.^a ed. (Prentice may, 1996). Hay también una buena discusión en la web en www.talkorigins.org/faqs/isochron-dating.html.

Para los datos utilizados en la elaboración de la Figura 9.8, véase Frank A. Podosek *et al.*, «Correlated Study of the Inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y Al-Mg Isotopic Systematics and Petrologic Properties in a suite of Refractory Inclusions from the Allende Meteorite» en *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55 (1991): 1083-1110 y S. S. Russell *et al.*, «Evidence for Widespread ^{26}Al in the Solar Nebula» en *Nature* 273 (1996): 757-762. Una buena revisión sobre la datación por aluminio-26 puede encontrarse en G. J. McPherson *et al.*, «The distribution of aluminium-26 in the early solar system —a reappraisal» en *Meteorites* 30 (1995): 365-386.

Para las últimas estimaciones de edad de alta precisión utilizando el sistema uranio-plomo, véase G. W. Lugmair y S. J. G. Galer, «Age and Isotopic Relationships amongst the Angrites» en *Geochimica and Cosmochimica Acta* 56 (1992): 1673-1694; Yuri Amelin *et al.*, «Lead Isotopic Ages of Chondrules and Calcium-Aluminium-Rich inclusion» en *Science* 297 (2002): 1678-1683; Yuri Amelin *et al.*, «Unraveling the Evolution of Chondrite Parent Asteroids by Precise U-Pb Dating and Thermal Modeling» en *Geochimica and Cosmochimica Acta* 69 (2005): 505-518; y Joel Baker *et al.*, «Early Planetesimal Melting from an Age of 4.662 Gyr for Differentiated Meteorites» en *Nature* 436 (2005): 1127-1131.

212 Orígenes

Algunos estudios recientes de los contenidos de aluminio-26 de cóndrulos y CAI se encuentran en Martin Bizarro *et al.*, «Mg Isotope Evidence for Contemporaneous Formation of Chondrules and Refractory Inclusions» en *Nature* 431 (2004): 275-278, y Alexander N. Krot *et al.*, «Chronology of the Early Solar System from Chondrule-Bearing Calcium-Aluminium-Rich Inclusions» en *Nature* 434 (2005): 998-1001.

Para los interesados en el estado actual de la investigación en meteoritos y la formación del primitivo Sistema Solar, un buen lugar para empezar es la página web del Lunar and Planetary Institute, <http://www.lpi.usra.edu/resources>.

Colores, brillos y la edad de las estrellas

El 24 de febrero de 1987 el mundo asistió a un raro espectáculo astronómico. En menos de un solo día, el brillo de una estrella que hasta entonces sólo había podido ser observada con un telescopio se multiplicó repentinamente por un factor mil y se hizo visible a simple vista. Después de eso, el objeto se desvaneció lentamente durante los meses siguientes. Este suceso, denominado Supernova 1987A, demostraba espectacularmente que las estrellas no son joyas celestes eternas. De hecho, no cabe esperar que una estrella brille para siempre.

Toda estrella, incluido nuestro Sol, es una enorme bola de (fundamentalmente) hidrógeno que se mantiene unida por la gravedad e iluminada por las reacciones nucleares que ocurren en su interior profundo. Con el tiempo, el horno nuclear de cualquier estrella agotará su combustible y perderá su capacidad para generar grandes cantidades de luz. Por lo tanto, las estrellas que vemos hoy a nuestro alrededor no pueden ser infinitamente viejas. En su lugar, toda estrella debe haberse formado en un momento definido y medible en el pasado. Muchos astrofísicos creen incluso que hubo un tiempo en que no había estrellas brillando. Midiendo las edades de estrellas diferentes, los astrónomos pueden establecer en qué momento las primeras estrellas empezaron a iluminar el universo.

Sección 10.1: Estudiando la luz estelar

Uno de los mayores desafíos a los que se enfrentan los astrónomos al estudiar muchas estrellas son las enormes extensiones de espacio que las separan de nuestro Sistema Solar. Incluso las estrellas más próximas más allá de nuestro Sistema Solar están a más de treinta billones de kilómetros. Para hacernos una idea de esta distancia consideremos esto: la luz viaja a la extraordinaria velocidad de casi 300.000 kilómetros por segundo y puede cubrir toda la distancia del Sol a la Tierra en menos de diez minutos, pero la luz procedente del Sol ¡tarda varios años en llegar a las estrellas más próximas! Las estrellas del cielo nocturno están tan alejadas que casi siempre aparecen como simples puntos luminosos incluso en los más potentes telescopios. Esto significa que normalmente no podemos observar directamente la forma o el tamaño de una estrella, y mucho menos discernir las características de su superficie.

A pesar de estas limitaciones, los astrónomos son capaces de extraer una considerable cantidad de datos sobre las características de las estrellas a partir de la luz que ellas producen. Gran parte de esta información está codificada en los espectros de las estrellas, que se obtienen al descomponer la luz estelar en sus colores componentes. Esto podría hacerse utilizando un prisma, pero en la práctica son preferibles aparatos como redes de difracción e interferómetros. En cualquier caso, la luz que atraviesa el aparato forma el familiar arco iris de colores que se extiende del rojo al violeta y más allá. Esto sucede porque la luz es una onda electromagnética, y la longitud de onda de la luz afecta a su interacción con objetos materiales como un prisma o una red de difracción. Rayos de luz de longitudes de onda diferentes salen del aparato en direcciones diferentes, de modo que la luz roja, que tiene una longitud de onda más larga, se separa de la luz azul, que tiene una longitud de onda más corta. Una vez que la luz se ha dispersado de esta forma, podemos cuantificar el espectro de la estrella midiendo el brillo de la luz en varias longitudes de onda. Puesto que la longitud de onda de la luz está relacionada con su color, estos diagramas proporcionan una descripción general del color de la estrella.

Colores, brillos y la edad de las estrellas 215

Los espectros estelares muestran normalmente un máximo ancho que abarca un amplio rango de longitudes de onda (combinado con una serie de mínimos muy localizados; véase Figura 10.1). La anchura y posición de este máximo es diferente para estrellas diferentes, pero la forma básica es siempre característica de la radiación térmica —la luz producida por los movimientos aleatorios de átomos, electrones y núcleos—. El espectro de la radiación térmica no es muy sensible a la composición o la estructura del objeto, y en su lugar depende básicamente de la temperatura. Cuando aumenta la temperatura, las partículas se mueven cada vez más rápidas, lo que da como resultado que el máximo del espectro se desplaza hacia longitudes de onda cada vez más cortas. Un objeto con un resplandor azulado está por lo tanto más caliente que uno con un resplandor rojizo. Esto significa que la forma del espectro suele proporcionar una buena medida de la temperatura de las partes visibles de la estrella.

Obtener espectros detallados requiere tiempo, y para muchas estrellas no puede hacerse fácilmente en un tiempo razonable. Por ello, los astrónomos que examinan muchas estrellas prefieren estimar los espectros midiendo la cantidad total de luz transmitida a través de unos pocos filtros diferentes, cada uno de los cuales deja pasar sólo una parte del espectro. Estos filtros se etiquetan con letras que identifican las longitudes de onda que atraviesan el filtro (véase Figura 10.1). Por ejemplo, el filtro *B* transmite luz *azul* («Blue») mientras que el filtro *V* transmite luz *visible* de longitud de onda más larga.

Por convenio, la cantidad de luz transmitida a través de un filtro se describe en términos de una magnitud aparente. Para la mayoría de los no astrónomos, las magnitudes son cosas complicadas de entender porque no hay una «unidad» en el sentido convencional, como metros o segundos. Mientras que una carrera de 500 metros es cinco veces más larga que una de 100 metros, y un concierto de tres horas es tres veces más largo que un concierto de una hora, una estrella de cuarta magnitud no es dos veces más brillante que una de segunda magnitud. En su lugar, una estrella de magnitud 1 es 2,5 veces más brillante que una estrella de magnitud 2, que a su vez es 2,5 veces más brillante que una estrella de magnitud 3. Nótese que las estrellas de magnitudes mayores son más débiles. Además, la *diferencia* entre las magnitudes de dos estre-

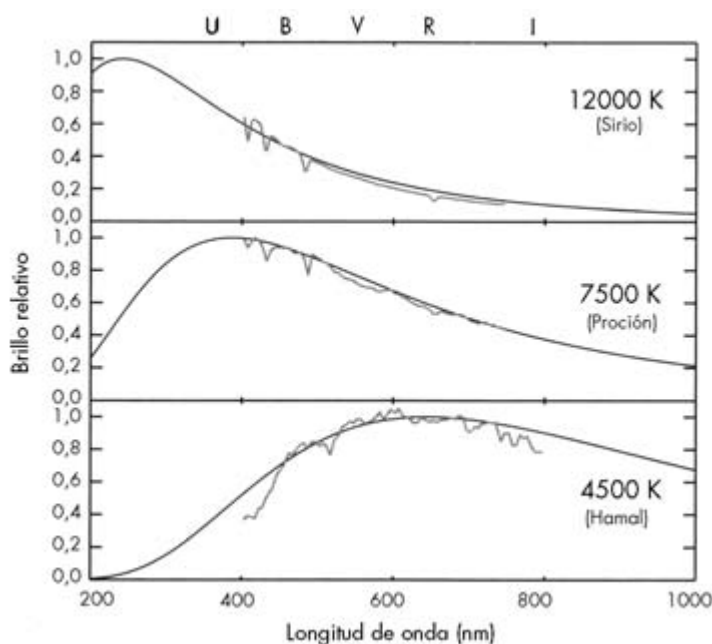
216 *Orígenes*

FIGURA 10.1. Ejemplos de espectros estelares que ilustran cómo puede variar el brillo de las estrellas en función de la longitud de onda de la luz (el azul está hacia la izquierda, el rojo está hacia la derecha). Los espectros reales de tres estrellas (aquí mostrados en gris) tienen varios mínimos y oscilaciones. Sin embargo, la forma básica de los espectros es compatible con la emisión térmica. Los espectros térmicos, ilustrados por las curvas suaves, tienen un máximo ancho a una longitud de onda que depende de la temperatura de la fuente. Las etiquetas sobre cada curva indican la temperatura efectiva (en Kelvins) para cada espectro estelar. Nótese que los objetos a temperaturas más altas tienen un espectro con su máximo a longitudes de onda más cortas. Las letras en la parte superior del diagrama representan algunos de los filtros comúnmente utilizados para medir luz estelar (U = «Ultravioleta», B = «Blue» [azul], V = «Visible», R = «Rojo», I = «Infrarrojo»). Los espectros estelares visibles proceden del catálogo Burnashev (1985) en <http://vizier.cfa.harvard.edu/vic-bin/VizieR?-source=III/126>.

Colores, brillos y la edad de las estrellas 217

llas indica la *razón* entre sus brillos. Esto significa que una estrella de magnitud 23 es 2,5 veces más brillante que una estrella de magnitud 24, igual que una estrella de magnitud 1 es 2,5 veces más brillante que una estrella de magnitud 2. Aunque a primera vista este sistema de medir el brillo podría parecer extraño y confuso, tiene algunas ventajas para los astrónomos. En particular, un factor de un millón en brillo corresponde a una diferencia de sólo 15 magnitudes, de modo que pueden considerarse grandes intervalos de brillo sin tener que tratar con números muy grandes o muy pequeños.

La magnitud de una estrella medida a través de un filtro particular depende de su espectro. Por ejemplo, una estrella relativamente fría (la curva más baja en la Figura 10.1) produce más luz en la parte *V* de su espectro que en la parte *B*, de modo que la magnitud en la banda *B* es más alta que la magnitud en la banda *V* para dicha estrella. Por el contrario, las estrellas más calientes producen más luz en la parte *B* del espectro, de modo que sus magnitudes en la banda *B* pueden ser menores que sus magnitudes en la banda *V*. La diferencia en las magnitudes *B-V* proporciona así una medida cruda de la forma del espectro y la temperatura de la estrella. En la jerga astronómica estas diferencias se conocen como colores. Tengamos en cuenta que puesto que una magnitud menor corresponde a más luz, un valor *menor* de *B-V* significa que la estrella es *más azul* y por lo tanto está *más caliente*.

Si el espacio interestelar fuera un vacío perfecto, el color de una estrella no dependería de lo lejos que está: una estrella a 100 años luz parecería igual de roja que si estuviera a 200 años luz. Por el contrario, el brillo total de una estrella está directamente relacionado con la distancia que la separa de nosotros. Conforme la luz viaja desde la estrella, se dispersa sobre un área cada vez mayor, lo que la hace cada vez más débil. Sin embargo, el solo hecho de que una estrella en el cielo parezca menos brillante que otra no quiere decir necesariamente que la primera esté más lejos. Las estrellas también pueden aparecer más brillantes o más débiles simplemente porque producen más o menos luz. Por ejemplo, la estrella brillante que utilizaban los egipcios para marcar el comienzo del Año Nuevo —hoy conocida como Sirio— tiene una estrella compañera en órbita a su alrededor. Ambas estrellas están a la misma distancia de nosotros, pero Sirio es más de mil veces

218 Orígenes

más brillante que su compañera. Por lo tanto, estas dos estrellas están generando cantidades de luz muy diferentes.

Como ocurre con la forma de su espectro, la cantidad total de luz producida por una estrella también proporciona claves importantes sobre sus propiedades físicas. Sin embargo, sólo podemos calcular este parámetro después de que hayamos averiguado a qué distancia está la estrella. Puesto que las estrellas están muy remotas, los astrónomos han tenido que desarrollar varias técnicas ingeniosas para medir sus distancias. El método más directo empieza por medir la posición de la estrella en el cielo en varios momentos diferentes a lo largo del año. Durante cada una de estas observaciones la Tierra estará en un punto diferente de su órbita alrededor del Sol, de modo que la estrella aparecerá en posiciones ligeramente diferentes. Este fenómeno, conocido como paralaje, nos permite utilizar simples fórmulas trigonométricas para descubrir la distancia a la estrella.

Para ver cómo funciona este método consideremos una técnica similar utilizada para medir distancias aquí en la Tierra. Imaginemos que estamos en una carretera que va de este a oeste. En un punto de la carretera encontramos que un pico montañoso lejano estaba al norte exacto de nosotros. Supongamos que después de caminar 100 metros hacia el oeste encontráramos que desde nuestra nueva posición el pico montañoso está a un grado al este del norte. El pico montañoso está localizado en la intersección de las dos visuales, lo que significa que la montaña y nuestros dos puntos de observación forman un triángulo (Figura 10.2). La distancia entre las dos observaciones nos da la longitud de un lado del triángulo (100 m), y los ángulos entre los lados pueden obtenerse de la posición aparente de la montaña. Esto nos proporciona información suficiente para determinar las longitudes de los tres lados del triángulo y calcular que la montaña está a unos 6 kilómetros de distancia. Por el mismo argumento los astrónomos saben cuánto se mueve la Tierra entre observaciones separadas por semanas o meses, de modo que pueden utilizar cálculos similares para determinar la distancia a una estrella (véase Figura 10.3).

Aunque la paralaje proporciona una medida muy directa de las distancias estelares, tiene limitaciones. Pensemos en cómo, cuando observamos el escenario desde un tren, los árboles cercanos pasan rá-

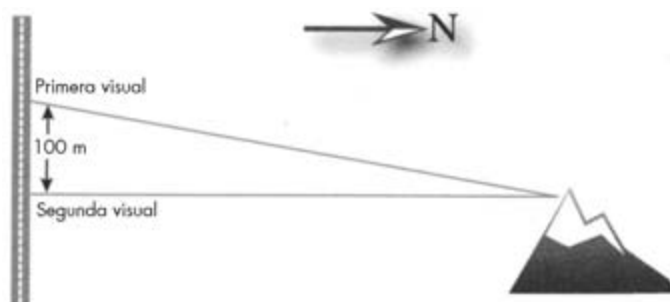


FIGURA 10.2. Utilización de la paralaje para medir las distancias a la Tierra. El ángulo entre las dos visuales y la distancia entre los puntos de observación nos proporcionan información suficiente para calcular la distancia a la montaña (la ilustración no está a escala).

pidamente mientras que las colinas en la distancia se mueven mucho más lentamente. Por la misma razón, el movimiento aparente de una estrella es menor cuanto más lejos está. Si las estrellas están más allá de una cierta distancia no parecen moverse en ninguna medida detectable y no puede utilizarse este método. Por consiguiente, la paralaje sólo nos proporciona distancias a estrellas relativamente próximas. Sin embargo, durante décadas los instrumentos astronómicos han mejorado, permitiendo medidas paralácticas de estrellas más lejanas. En la última década del siglo pasado, el satélite *Hipparcos* midió las distancias a decenas de miles de estrellas, algunas de las cuales están a unos 1.000 años luz.

Una vez que tenemos la distancia a una estrella podemos calcular cuánta luz total tiene que producir para dar cuenta de su brillo observado aquí en la Tierra. A menudo, esta cantidad —conocida como luminosidad de la estrella— se presenta con relación a la luminosidad de nuestro Sol. Sirio, por ejemplo, tiene unas veintitrés veces la luminosidad solar. Su compañera, por el contrario, sólo tiene 0,002 veces la luminosidad solar. Estrictamente hablando, la luminosidad de una estrella es la cantidad total de luz que produce en todas las longitudes de onda, pero con frecuencia no es factible medir esto directamente, de modo que en su lugar se estima la luminosidad a partir de la luz total transmitida a través de varios filtros. Estas señales se describen normal-

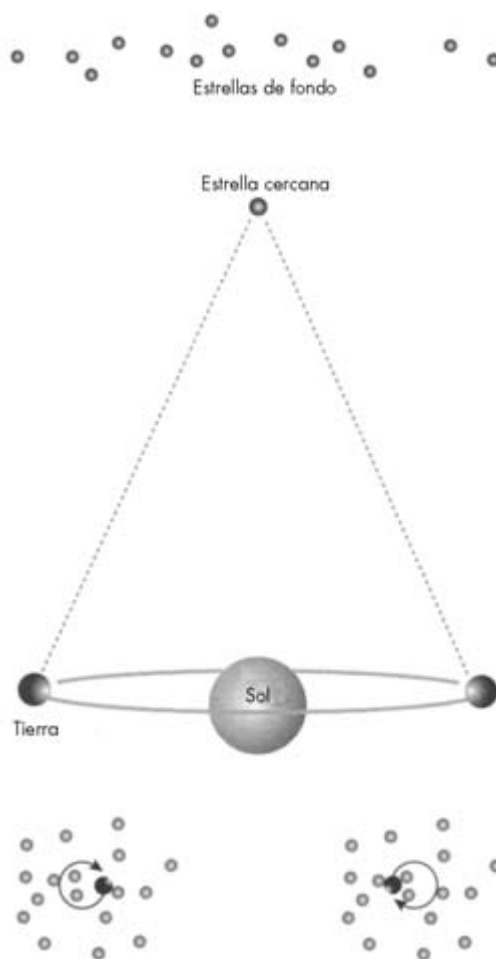
220 *Orígenes*

FIGURA 10.3. Utilización de la paralaje para medir la distancia a las estrellas. Conforme la Tierra se mueve alrededor del Sol en el curso del año, un observador en la Tierra verá una estrella vecina desde ángulos ligeramente diferentes y la estrella parecerá estar en posiciones ligeramente diferentes en el cielo. En la práctica, la posición cambiante de la estrella se determina a partir de su localización con respecto a estrellas más lejanas, que no se mueven tanto. El movimiento aparente de la estrella próxima a lo largo del año se ilustra en los paneles en la parte inferior de la figura. Los astrónomos pueden entonces utilizar este movimiento junto con un poco de trigonometría básica para calcular la distancia entre la Tierra y la estrella.

Colores, brillos y la edad de las estrellas 221

mente en términos de una escala de magnitudes. No obstante, en este caso las magnitudes *aparentes* de las estrellas que observamos en la Tierra se convierten en magnitudes *absolutas* utilizando la información de distancias relevante. Los astrónomos definen la magnitud absoluta de una estrella como la magnitud que tendría si estuviera situada a 32,6 años luz. Por ejemplo, la magnitud aparente en banda V de Sirio es de aproximadamente $-1,5$, y está situada a unos 9 años luz. Si estuviera a 32,6 años luz sería unas doce veces más débil, y su magnitud absoluta es $+1,5$. En comparación, la magnitud absoluta del Sol es de aproximadamente $+4,8$.

El estudio de la luz procedente de una estrella puede proporcionarnos algo más que su luminosidad y temperatura. Los espectros estelares de alta resolución muestran una serie de mínimos estrechos que indican la presencia de átomos y moléculas específicos en la atmósfera estelar. Estudios cuidadosos de estas líneas espectrales pueden decirnos algo acerca de la composición de la estrella, y los cambios en las posiciones de estas características se utilizan para revelar la presencia de planetas vecinos. No obstante, las magnitudes absolutas y los colores serán suficientes para lo que aquí nos proponemos. Estos parámetros están firmemente acoplados al funcionamiento interno de las estrellas, de modo que ofrecen claves importantes sobre las características internas y la historia de las estrellas.

Diferentes tipos de estrellas presentan pautas diferentes en luminosidad y temperatura superficial, que suelen ilustrarse utilizando un diagrama magnitud-color (también conocido como diagrama de Hertzsprung-Russell). Tales diagramas muestran la magnitud (absoluta) de una colección de estrellas frente a su color. La localización de un punto a lo largo del eje horizontal indica el color y la temperatura de una única estrella: las estrellas más calientes y más azules están a la izquierda, y las estrellas más frías y más rojas están a la derecha. La localización de un punto a lo largo del eje vertical corresponde a la magnitud absoluta de la estrella: las estrellas más luminosas están más arriba y las menos luminosas más abajo. La Figura 10.4 es un diagrama color-magnitud de unas 10.000 estrellas cercanas cuyas distancias han sido medidas por el satélite *Hipparcos*. Nótese que casi todos los puntos caen a lo largo de una banda diagonal borrosa que se extiende des-

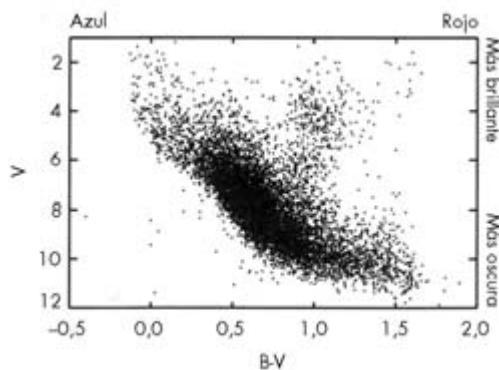
222 *Orígenes*

FIGURA 10.4. Un diagrama color-magnitud para estrellas cercanas, basado en datos del satélite Hipparcos, disponibles en <http://vizier.cfa.harvard.edu/vic-bin/VizieR?-source=I/239>. Éste es un diagrama de magnitud absoluta en banda V frente al color $B-V$, en donde cada punto representa una única estrella. Las estrellas que caen hacia la izquierda del diagrama son más azules que las estrellas que caen a la derecha, y las estrellas hacia la parte superior son más luminosas que las estrellas más cercanas al fondo. La mayoría de las estrellas caen a lo largo de la diagonal conocida como la secuencia principal.

de la parte superior izquierda hasta la parte inferior derecha del diagrama. Esta banda se conoce como la secuencia principal, y corresponde a una clase particular de estrellas cuya luminosidad guarda una relación específica con su temperatura de superficie: las estrellas más calientes (más azules) suelen ser más luminosas que las estrellas más frías (más rojas). Esta relación se debe a que todas estas estrellas comparten ciertas características fundamentales. En concreto, todas ellas generan energía básicamente mediante la fusión de hidrógeno en helio.

Sección 10.2: La vida de las estrellas de la secuencia principal

El hidrógeno es una fuente de energía natural para la mayoría de las estrellas porque el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo y forma el núcleo de la mayoría de las estrellas. Incluso si el hi-

drógeno ordinario es el elemento más simple —con un único protón en su núcleo— estos átomos son capaces de generar luz y calor suficiente para alimentar una estrella porque pueden ensamblarse o fusionarse para dar núcleos de helio.

La Figura 10.5 muestra uno de los procesos por los que cuatro protones se convierten en un núcleo de helio. En primer lugar, dos protones forman un núcleo de deuterio, una forma pesada de hidrógeno con un protón y un neutrón. Puesto que un protón se convierte en un neutrón durante este proceso, se emiten un positrón, o antielectrón, y un

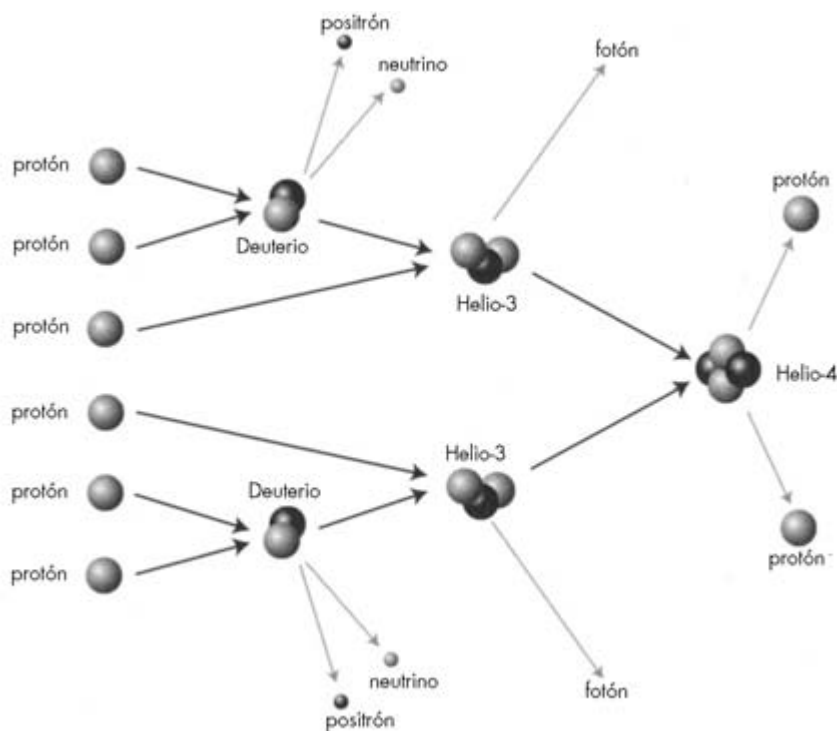


FIGURA 10.5. La fusión de hidrógeno en helio. Los núcleos de hidrógeno (los protones individuales de la izquierda) pueden ensamblarse de varias maneras para dar núcleos de helio. El proceso ilustrado aquí es el más directo (otros procesos utilizan núcleos más pesados como catalizadores). Cada una de las reacciones aquí ilustradas reduce la masa de los núcleos, lo que libera energía y provoca el movimiento de las diversas partículas.

224 Orígenes

neutrino. A continuación, otro protón se combina con este núcleo de deuterio para formar una variante del núcleo de helio con 2 protones y 1 neutrón. Finalmente, dos de estos núcleos de helio ligero se juntan, expulsan dos protones y dejan detrás un núcleo de helio ordinario, con 2 protones y 2 neutrones.

Este proceso es capaz de dar energía a una estrella porque la masa de un núcleo de helio es aproximadamente un 0,7 % menor que la masa total de cuatro núcleos de hidrógeno. Recordemos que la famosa ecuación de Einstein $E=mc^2$ dice que hay una energía asociada a los objetos con masa. Esto significa que cuando los núcleos de hidrógeno se fusionan, algo de la masa-energía de los núcleos se convierte en otras formas de energía, tales como radiación electromagnética y movimiento de partículas. Aunque pueda parecer que un 0,7 % no es una cifra muy impresionante, en realidad corresponde a una enorme cantidad de energía. Un solo gramo de hidrógeno convertido en helio libera tanta energía como quemar 20 toneladas métricas de carbón. El hidrógeno es obviamente una fuente de energía extremadamente potente, pero sólo si se dan las condiciones apropiadas puede extraerse la energía de forma eficiente de estos núcleos. Los núcleos de hidrógeno deben estar muy próximos para que puedan darse reacciones nucleares, pero puesto que todos los núcleos de hidrógeno están cargados positivamente, hay una repulsión entre ellos. Por lo tanto, la fusión sólo ocurre si se presiona a los núcleos para que se acerquen o si colisionan a velocidades muy altas. Estas condiciones todavía no se han conseguido en la Tierra sin utilizar más energía que la que producen las reacciones, y ésa es la razón de que todavía no tengamos centrales nucleares de fusión. Sin embargo, las estrellas contienen tanto hidrógeno y tienen una gravedad tan inmensa que estas reacciones nucleares ocurren de forma natural.

Imaginemos una nube difusa de hidrógeno y helio en el espacio que contenga aproximadamente tantos átomos como nuestro Sol. La gravedad hace que los átomos se atraigan y los arrastra hacia el centro de la nube. Cuando la nube empieza a colapsar sobre sí misma, se acumula más y más gas en el núcleo, lo que hace que la masa de esta región aumente. Por consiguiente, el flujo de material en el centro de la nube se acelera hasta que suficientes átomos de hidrógeno se amonto-

Colores, brillos y la edad de las estrellas 225

nan en un espacio bastante pequeño con una temperatura suficientemente alta para que se produzca fusión nuclear. La nube de gas empieza entonces a transformarse en una estrella joven. Las reacciones nucleares en el centro de este objeto producen radiación y partículas con movimiento rápido que salen disparadas del núcleo de la estrella para colisionar con el material que está siendo arrastrado hacia dentro por la fuerza de la gravedad. Conforme la densidad del núcleo sigue aumentando, las reacciones nucleares ocurren cada vez con mayor rapidez. Finalmente, la presión hacia fuera generada por la fusión en el núcleo estelar contrarresta el tirón hacia dentro de la gravedad y la estrella alcanza un estado de equilibrio.

Una vez que se asienta una estrella y alcanza el equilibrio, puede permanecer aproximadamente en este estado mientras sea capaz de fusionar hidrógeno en su núcleo central. Si esta fusión se hace insuficiente para mantener la estrella, la gravedad atraerá más material hacia el núcleo, lo que hace que aumente el ritmo de las reacciones nucleares hasta que la estrella deja de colapsar. Recíprocamente, si la energía liberada por la fusión fuera superior a la que es necesaria para mantener la estrella, el material se expandiría y se reduciría la presión en el núcleo, y el ritmo de las reacciones nucleares disminuiría hasta que la estrella se estabilizara. Por consiguiente cabría esperar que la mayoría de las estrellas —las que caen a lo largo de la secuencia principal— existan en tal estado de equilibrio.

Si las estrellas de la secuencia principal están realmente cerca del equilibrio, entonces las regiones que están fuera de sus núcleos deberían estar en un estado casi estacionario. Los diferentes átomos de la estrella pueden moverse hacia dentro o hacia fuera en instantes diferentes, pero en promedio no hay prácticamente un flujo neto de material hacia fuera o hacia dentro del núcleo estelar, y la velocidad media de las partículas en cualquier parte de la estrella permanece constante. Como resultado, las capas exteriores de estas estrellas no ganan ni pierden energía, incluso si las reacciones de fusión en el núcleo están liberando cantidades enormes de energía. Dado que la energía no puede ser creada ni destruida, la luz y otras formas de radiación emitida por una estrella tienen que llevarse energía de la superficie tan rápidamente como es producida en el núcleo. Las propiedades de la luz este-

226 *Orígenes*

lar —especialmente la luminosidad— deberían así estar firmemente acopladas al ritmo de las reacciones nucleares en el corazón de la estrella. Además, puesto que el ritmo de fusión en el núcleo de la estrella debe ser suficiente para contrarrestar la fuerza de la gravedad, tanto la temperatura de superficie como la luminosidad de las estrellas de la secuencia principal deberían estar fuertemente correlacionadas con su masa total.

Los astrónomos han confirmado que realmente existe tal conexión entre masa, luminosidad y temperatura de superficie en las estrellas de la secuencia principal. Aproximadamente la mitad de las estrellas vecinas están en sistemas binarios, en los que dos estrellas orbitan cada una alrededor de la otra. Los astrónomos pueden observar realmente cómo se mueven las estrellas en sus órbitas en el curso de los años. Así como el tiempo que tarda la Tierra en dar una vuelta alrededor del Sol depende de la masa del Sol, el tiempo que tardan estas estrellas en completar una órbita depende de sus masas. Utilizando esta información, los astrónomos han podido determinar las masas de centenares de estrellas de la secuencia principal. Estos datos, algunos de los cuales se muestran en la Figura 10.6, muestran claramente que hay una relación directa entre la masa de una estrella de la secuencia principal y su luminosidad: cuanto más masiva es una estrella, más luminosa es. Si preferimos hacer una gráfica de la masa frente a la temperatura de superficie, encontraríamos un resultado similar: las estrellas más masivas son también más azules y más calientes que las estrellas menos masivas. Estas relaciones son las que cabría esperar de estrellas en un estado de equilibrio. Cuanto más masiva es una estrella, más rápido tiene que ser el ritmo de fusión para impedir que la estrella colapse bajo su propia gravedad. Este ritmo mayor de producción de energía da una luminosidad más alta mientras que, simultáneamente, aumenta la temperatura de la superficie de la estrella.

La relación masa-luminosidad observada no sólo documenta una relación entre parámetros fundamentales en estrellas de la secuencia principal, sino que también indica que la masa de una estrella de la secuencia principal tiene un efecto desproporcionadamente grande en su luminosidad. Una estrella diez veces más masiva que nuestro Sol no es simplemente diez veces más luminosa que el Sol: ¡emite diez mil

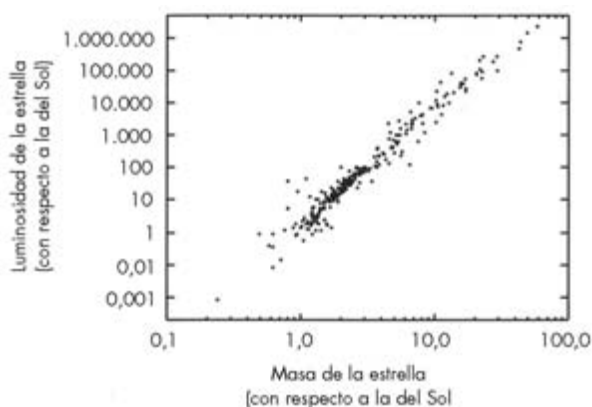


FIGURA 10.6. La relación masa-luminosidad, ilustrada por una gráfica de la luminosidad estelar frente a la masa. Nótese que cuando la masa aumenta en un factor diez, la luminosidad aumenta en un factor de varios miles. (Basado en datos de Svechnikov y Bessonova [1984] disponibles en <http://vizier.cfa.harvard.edu/vic-bin/VizieR?-source=V/426>.)

veces más luz! Esto ocurre porque las estrellas más masivas no sólo tienen más material que soportar, sino que también tienen fuerzas gravitatorias más intensas tirando de cada partícula. Además, las partículas en una estrella más pesada deben moverse más rápidamente para mantenerse en vuelo, y esto a su vez aumenta el ritmo al que se transporta la energía a través de la estrella y se pierde en el espacio. Por consiguiente, aumentar la masa de una estrella hace que sus requerimientos de potencia aumenten rápidamente, y esto tiene implicaciones importantes para los tiempos de vida y las edades de las estrellas.

Sección 10.3: La muerte de las estrellas de la secuencia principal

Por definición, una estrella que está en equilibrio no cambia apreciablemente con el tiempo. Esto significa que una estrella con un color o una luminosidad dados puede haber alcanzado el equilibrio recientemente o puede haber estado quemando hidrógeno durante miles de millones de años. Sin embargo, las estrellas de la secuencia principal

228 *Orígenes*

no pueden durar para siempre porque con el tiempo agotarán el combustible nuclear. Por consiguiente, los astrónomos pueden extraer alguna información cronológica de las estrellas si pueden determinar cuánto tiempo pueden vivir en la secuencia principal.

El tiempo de vida de una estrella de la secuencia principal queda fijado por el tiempo durante el cual las reacciones de fusión en el núcleo pueden liberar suficiente energía para soportarla. Recordemos que las reacciones nucleares sólo liberan energía si la masa total de las partículas después de la reacción es menor que la de las partículas que entran en la reacción. La mayoría de las reacciones que implican núcleos de helio-4 *aumentan* la masa de los núcleos implicados y no pueden mantener la estrella en equilibrio.

Una estrella puede utilizar núcleos de helio-4 como fuente de energía sólo si pueden ensamblarse para dar núcleos de carbono-12. Un núcleo de carbono-12 tiene tantos protones y neutrones como tres núcleos de helio, y en conjunto es menos masivo que dichos núcleos, de modo que esta reacción libera energía que puede utilizarse para soportar la estrella. Sin embargo, este proceso requiere que tres núcleos de helio estén casi en el mismo lugar y casi al mismo tiempo, de modo que la fusión del helio sólo ocurrirá a temperaturas y densidades mucho más altas que en la fusión del hidrógeno. En una estrella de la secuencia principal, la energía liberada de la fusión del hidrógeno impide que el material en el núcleo estelar colapse a tal estado denso y caliente. Esto significa que la fusión del hidrógeno en helio es la única fuente de energía viable para estrellas de la secuencia principal, y por ello estas estrellas serán incapaces de mantener su equilibrio una vez que hayan utilizado una buena parte de su hidrógeno.

Incluso si aproximadamente un 90 % de los átomos en una estrella joven de la secuencia principal es hidrógeno, sólo una fracción de este material puede utilizarse como combustible porque la fusión del hidrógeno sólo ocurre en las regiones centrales más densas de la estrella. Puesto que los núcleos de helio son más masivos que los núcleos de hidrógeno, el helio generado dentro del núcleo no es transportado eficientemente a las capas exteriores de la estrella. En su lugar, se acumula en las profundidades de la estrella, formando eventualmente un núcleo compuesto casi puramente de helio. Esto sofoca las reacciones

Colores, brillos y la edad de las estrellas 229

nucleares en esta región, y la fusión de hidrógeno sólo puede continuar en una capa esférica que rodea al núcleo rico en helio. El calor generado por esta capa puede soportar el núcleo estelar durante un tiempo, pero conforme pasa el tiempo y se produce más helio, la gravedad del núcleo aumenta. Finalmente, las partes centrales de la estrella o bien colapsan o bien sufren alguna otra transformación que puede culminar en la fusión de helio-4 para dar carbono-12. Estos cambios drásticos en el núcleo alteran el tamaño de la estrella y las propiedades de la luz que emite. Normalmente, la estrella se hace más brillante y más roja, transformándose en una gigante roja. Esta transición marca el comienzo de un proceso fascinante y muy complejo que finalmente acaba en la muerte de la estrella: o bien explota como una supernova o bien las reacciones nucleares en el corazón se apagan, dejando detrás un remanente como una enana blanca.

En lugar de detenernos en los detalles escabrosos de cómo se transforman las estrellas reales en gigantes rojas, consideraremos aquí un modelo sencillo de estrellas de la secuencia principal que ilustra cómo la acumulación constante de helio puede provocar finalmente un cambio importante en la estructura de la estrella. Imaginemos una estrella compuesta de dos partes, una envoltura de material rico en hidrógeno que rodea a un pequeño núcleo estelar rico en helio. La fusión ocurre en la zona más interior de la envoltura, lo que proporciona calor para mantener la estrella en conjunto y el núcleo estelar central. También proporciona un suministro constante de helio que hace que la masa del núcleo aumente con el tiempo. Mientras el núcleo contenga sólo una pequeña fracción de la masa total de la estrella, el peso que soporta la capa y el núcleo estelar no cambia mucho con el tiempo. Por lo tanto, el ritmo de las reacciones nucleares en la capa permanece constante, la temperatura de la región central de la estrella no cambia y su luminosidad y temperatura de superficie se mantienen constantes. En este estado de cuasi-equilibrio, la temperatura en el núcleo es suficientemente alta para soportar toda la masa de la estrella frente al colapso gravitacional. Dicho de otra forma, la energía de la capa de fusión mantiene a los núcleos de helio moviéndose con tanta rapidez que cuando colisionan con las capas exteriores de la estrella les dan una «patada» suficiente para impedir que las partículas vayan hacia dentro. Pero confor-

230 Orígenes

me el núcleo crece, también debe evitar el colapso bajo su propia gravedad. Puesto que un átomo de helio es cuatro veces más masivo que un átomo de hidrógeno, requiere una energía cinética significativamente mayor para resistir el tirón de la gravedad hacia el centro de la estrella. Esto significa que incluso si la energía cinética de las partículas en el núcleo puede soportar toda la masa de la estrella rica en hidrógeno, ellas sólo pueden soportar un núcleo rico en helio que tenga una pequeña fracción de esta masa. Suponiendo que el hidrógeno y el helio puedan tratarse como gases clásicos, la razón de la máxima masa posible del núcleo a la masa total de la estrella depende de la masa promedio de las partículas en el núcleo y en la envoltura. Para un núcleo rico en helio y una envoltura rica en hidrógeno, la masa máxima del núcleo es aproximadamente un 10 % de la masa total de la estrella. Esto se conoce como el límite de Schonberg-Chandrasekhar, por los científicos que primero lo calcularon en 1942. Cuando la masa del núcleo supere dicho límite, empezará a colapsar, y con ello desencadenará una reorganización importante del interior de la estrella.

Debo resaltar que ésta es una grosera simplificación de la compleja secuencia de sucesos que se cree que ocurren en las estrellas reales. De hecho, estrellas con masas diferentes parecen evolucionar de maneras muy diferentes. Por ejemplo, en estrellas varias veces más masivas que el Sol, la mezcla en las regiones más profundas de la estrella impide que crezca continuamente un núcleo de helio puro a partir del centro de la estrella, y en su lugar se forma abruptamente un núcleo cuando el hidrógeno se agota en las profundidades de la estrella. Por el contrario, en estrellas menos masivas la temperatura del núcleo puede ser suficientemente baja y la densidad suficientemente alta para que haya que tener en cuenta los efectos mecano-cuánticos. Estas complicaciones significan que el cálculo de Schonberg-Chandrasekhar no se aplica estrictamente a una estrella real. Por esta razón, los astrónomos tuvieron que desarrollar diversos métodos y herramientas que les permiten calcular con exactitud cómo cambiará la estructura interna de la estrella cuando el helio se acumula en el núcleo. Resulta curioso que estos cálculos más sofisticados también muestran que las estrellas de la secuencia principal empiezan a hacerse más brillantes y más rojas cuando han convertido aproximadamente un 10 % de su masa en helio.

Colores, brillos y la edad de las estrellas 231

Si las estrellas de la secuencia principal sólo pueden sobrevivir hasta que han fusionado aproximadamente un 10 % de su hidrógeno en helio, entonces podemos calcular sus tiempos de vida a partir de sus masas y luminosidades. Por ejemplo, la masa del Sol es 2×10^{30} kilogramos, y su luminosidad (o su energía total emitida) es 4×10^{26} vatios. Puesto que el Sol está próximo al equilibrio, su luminosidad es aproximadamente igual a la potencia generada por reacciones de fusión en su núcleo. La ecuación de Einstein $E=mc^2$ nos dice que esta potencia requeriría convertir 4.000 millones (4×10^9) de kilogramos de masa en otras formas de energía cada segundo. La masa de un núcleo de helio es aproximadamente un 0,7 % menor que la masa de cuatro núcleos de hidrógeno, de modo que esta reducción en masa requiere transformar 600.000 millones (o 6×10^{11}) de kilogramos de hidrógeno en helio cada segundo. En otras palabras, nuestro Sol convierte 18 trillones ($1,8 \times 10^{19}$) de kilogramos de hidrógeno en helio cada año. No hay que preocuparse, no obstante, porque incluso a este ritmo el Sol tardaría 11.000 millones de años en convertir el 10 % de su masa en helio y empezar su transformación en una gigante roja. Cálculos más detallados y cuidadosos indican que el Sol puede vivir en la secuencia principal durante unos 10.000 millones de años, de modo que este rápido cálculo en pocas líneas no está demasiado desviado, y seguimos sin tener que preocuparnos de que el Sol se convierta pronto en una gigante roja.

Cálculos similares nos permiten estimar los tiempos de vida de otras estrellas de la secuencia principal que tienen masas y luminosidades bien medidas. Y lo que es más, puesto que la masa y la luminosidad de las estrellas de la secuencia principal están tan fuertemente correlacionadas, podemos inferir a menudo el tiempo de vida de dichas estrellas a partir de su luminosidad solamente. Por ejemplo, pongamos que encontramos una estrella de la secuencia principal diez mil veces más luminosa que el Sol. A partir de la relación masa-luminosidad observada sabemos que una estrella tiene que ser diez veces más masiva que el Sol para producir esta cantidad de luz. Esto significa que mientras la estrella está convirtiendo hidrógeno en helio a un ritmo diez mil veces mayor que el del Sol, sólo tiene diez veces más de hidrógeno disponible. Por lo tanto la estrella quemará el 10 % de su hidrógeno a un ritmo diez mil veces mayor que una estrella de una masa

232 *Orígenes*

solar, y por ello sólo puede durar diez millones de años antes de convertirse en una gigante roja.

Este cálculo muestra que el tiempo de vida de una estrella de la secuencia principal —como su luminosidad— depende fuertemente de su masa. Cuanto más masiva y luminosa es una estrella, menos tiempo tarda en convertirse en una gigante roja. Aunque este resultado no nos permite saber la edad de una estrella en particular, sí permite a los astrónomos estimar las edades de ciertas colecciones de estrellas.

Imaginemos que una colección de estrellas de la secuencia principal se hubiera formado al mismo tiempo. Las masas de dichas estrellas cubren un cierto intervalo, de modo que si midiéramos las luminosidades y temperaturas de dichas estrellas inmediatamente después de que se formaran, observaríamos una secuencia principal completa como la mostrada en la Figura 10.4. Sin embargo, no pasaría mucho tiempo (hablando en términos astronómicos) antes de que las estrellas más brillantes y más azules agotaran el combustible y se convirtieran en gigantes rojas. En otras palabras, las estrellas que se encuentran cerca de la parte superior de la secuencia principal empezarían a salirse por el lado derecho (rojo) de este diagrama color-magnitud. Conforme pasa el tiempo, estrellas cada vez más tenues y más rojas saldrán también de la secuencia principal. Si volviéramos a observar este mismo grupo de estrellas en un momento posterior, podríamos determinar lo viejas que son estudiando cuánto quedaba de la secuencia principal.

De entrada podría parecer poco probable que tales colecciones de estrellas se den alguna vez en la naturaleza, pero de hecho hay varios tipos diferentes de cúmulos de estrellas que parecen contener muchas estrellas que se formaron en un mismo momento en el pasado. Aquí nos centraremos exclusivamente en un subconjunto particularmente interesante de tales objetos que se conocen como cúmulos globulares.

Sección 10.4: Las edades de los cúmulos globulares

Los cúmulos globulares se llaman así porque parecen bolas borrosas de luz cuando se ven a través de binoculares y telescopios pequeños. Instrumentos más poderosos revelan que estos objetos son en realidad

colecciones de hasta un millón de estrellas concentradas en una región de unos 100 años luz de diámetro: la densidad de estrellas aquí es cientos de veces más alta que en nuestra vecindad. La Figura 10.7 muestra el diagrama color-magnitud de las estrellas de un cúmulo globular particular. En la parte inferior de esta gráfica podemos trazar una recta que cruza el diagrama en diagonal. Esta franja está en el lugar correcto y tiene la orientación correcta para corresponder a la secuencia principal. Sin embargo, a diferencia de la secuencia principal que forman las estrellas más próximas, esta secuencia termina abruptamente hacia la mitad del diagrama, lo que indica que las estrellas más brillantes y más azules de la secuencia principal están ausentes de este cúmulo. En su lugar, vemos un arco de estrellas gigantes rojas brillantes en la parte superior derecha del diagrama, con una rama horizontal que se extiende hacia el lado azul de la gráfica.

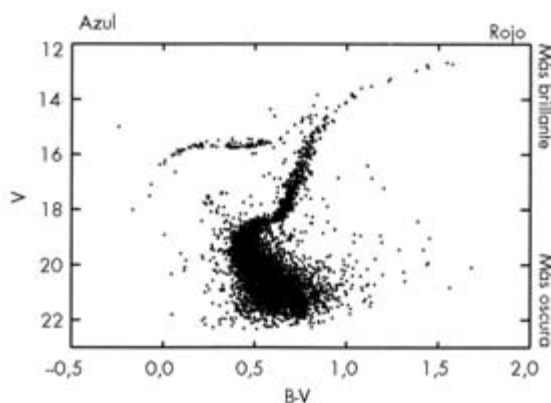


FIGURA 10.7. Diagrama color-magnitud de un cúmulo globular M_3 . Este diagrama puede compararse con el de la Figura 10.4. Nótese en particular que la diagonal correspondiente a la secuencia principal cerca del fondo de la gráfica parece estar cortada en el extremo azul. Esto indica que el cúmulo tiene una edad finita. Los valores de V en el eje y son mayores aquí que en la Figura 10.4 porque esta gráfica muestra magnitudes aparentes en lugar de magnitudes absolutas. (Puesto que todas estas estrellas están a la misma distancia, esto sólo resalta las magnitudes de todas las estrellas en la misma cantidad.) Datos de Ferraro *et al.*, (1997) disponibles en <http://vizier.cfa.harvard.edu/vic-bin/VizieR?-source=J/A%2bA/320/757>.

234 *Orígenes*

Esta distribución de características espectrales estelares es compatible con una colección de estrellas formada en un único momento en un pasado remoto. Por consiguiente, podemos intentar estimar la edad de estas estrellas a partir de la extensión de la secuencia principal. En este cúmulo globular, las estrellas más brillantes y más azules de la secuencia principal son sólo ligeramente más rojas que nuestro Sol. Por lo tanto, estas estrellas deberían tener luminosidades, masas y tiempos de vida similares a los de nuestro Sol. Puesto que hay pocas estrellas de la secuencia principal más azules y más brillantes que nuestro Sol, el cúmulo debe haberse formado hace lo suficiente para que todas estas estrellas hayan tenido tiempo de convertirse en gigantes rojas. Por otra parte, puesto que el cúmulo sigue conteniendo muchas estrellas más rojas y más tenues que nuestro Sol, no puede ser demasiado viejo, o de lo contrario estas estrellas también se habrían convertido en gigantes rojas. En otras palabras, la edad del cúmulo es mayor que la de todas las estrellas brillantes azules de la secuencia principal que ya han muerto y menor que el tiempo de vida de las estrella débiles rojas que están aún presentes. La edad del cúmulo es así igual al tiempo de vida de las estrellas en el extremo brillante y azul de la secuencia principal —el denominado punto de salida de la secuencia principal— que deberían estar a punto de transformarse en gigantes rojas. Para este cúmulo particular, dichas estrellas son sólo ligeramente más rojas que nuestro Sol, de modo que todo el sistema debería ser ligeramente más viejo que el tiempo de vida de nuestro Sol, lo que significa que sus estrellas se formaron hace algo más de 10.000 millones de años.

Este rápido análisis nos da sólo una estimación informal de la edad del cúmulo. Para obtener estimaciones más precisas, los astrónomos comparan los datos espectrales del cúmulo con las predicciones teóricas —como las que se muestran en la Figura 10.8— que incorporan con mucho más detalle la física nuclear y la hidrodinámica. Esta serie de curvas ilustra cómo las estrellas se separan poco a poco del extremo azul brillante de la secuencia principal para convertirse en gigantes rojas. También podemos calibrar la validez de nuestros cálculos anteriores señalando que la curva predicha de un cúmulo de estrellas de entre 8.000 y 15.000 millones de años guarda de hecho un estrecho parecido con los datos observados.

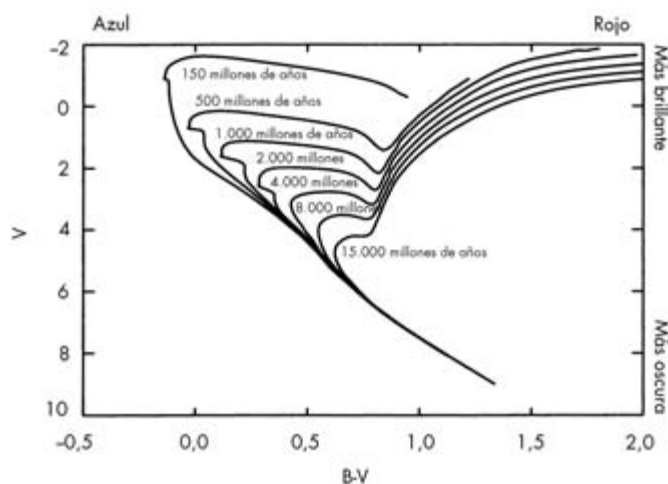


FIGURA 10.8. Diagrama color-magnitud esquemático de una colección de estrellas creadas al mismo tiempo, en diferentes instantes después de su formación. Esto ilustra cómo dichas estrellas se transforman progresivamente en gigantes rojas. Las estrellas más azules y más brillantes agotan el hidrógeno primero y se hacen brillantes y rojas, pero con el paso del tiempo las estrellas más rojas y más oscuras dejan la secuencia principal.

Examinando con más detalle los datos y las predicciones teóricas, mostrados juntos en la Figura 10.9, podemos empezar a apreciar los desafíos que implica este análisis. Los datos siguen más estrechamente la curva de 15.000 millones de años que las curvas de 10.000 o 20.000 millones de años. Sin embargo, la dispersión en los datos observados es suficientemente grande para que no podamos examinar sin más los datos y estimar la edad del cúmulo con un margen menor de mil millones de años. Por esta razón, los astrónomos tienen que utilizar análisis estadísticos cuidadosos para obtener una medida precisa de la edad a partir de este tipo de datos.

Por supuesto, incluso con una buena medida de la forma del punto de salida de la secuencia principal, la precisión de la edad obtenida sigue dependiendo de la fiabilidad y la aplicabilidad del modelo teórico. La forma de las curvas teóricas depende algo de la composición (razón helio/hidrógeno, etc.) de las estrellas del cúmulo, y ciertos cúmulos podrían contener incluso varias poblaciones de estrellas, cada una

236 Orígenes

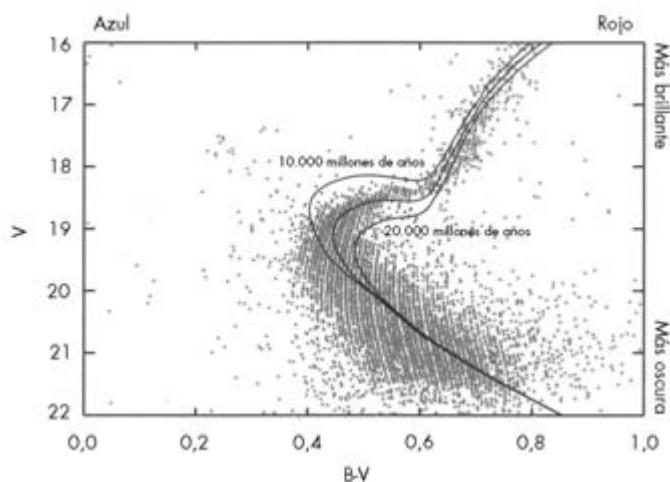


FIGURA 10.9. Un examen más detallado de la parte de la secuencia principal de M_3 (ilustrada en la Figura 10.7) con las curvas teóricas para cúmulos de 10.000, 15.000 y 20.000 millones de años. Los datos y las curvas están alineados a ojo con fines de ilustración. En la práctica, los cúmulos globulares están suficientemente alejados para que no funcione el método de la paralaje para la medida de distancias, de modo que los astrónomos utilizan la información del color y la posición de la rama horizontal para convertir magnitudes aparentes observadas en magnitudes absolutas y encajar datos y teoría. Comparando la forma y la localización de la salida de M_3 de la secuencia principal con las curvas, podemos ver que el cúmulo está más próximo a los 15.000 millones de años que a los 10.000 o 20.000 millones. Con un análisis más detallado que dé cuenta de la dispersión de los datos, etc., los astrónomos han estimado la edad del cúmulo en 13.000 millones de años, con un margen de más o menos mil millones de años.

con una salida diferente de la secuencia principal. Estos factores deben ser tenidos en cuenta al comparar los datos con la teoría para obtener una estimación de edad razonable para cualquier cúmulo dado. En ocasiones, estos cálculos modelo requieren revisiones que pueden alterar las estimaciones de edad generales para los cúmulos globulares. Por ejemplo, en 2004 los físicos nucleares anunciaron los resultados de nuevas investigaciones en una reacción en donde un núcleo de nitrógeno-14 y un protón se fusionan para formar oxígeno-15. Estos

Colores, brillos y la edad de las estrellas 237

nuevos datos indican que este proceso ocurre con menos facilidad de lo que se había pensado antes. Este descubrimiento afecta a las estimaciones de edad de los cúmulos globulares porque esta reacción es una parte importante de un ciclo que puede facilitar la fusión de hidrógeno en helio, con tal de que haya suficiente carbono, nitrógeno y oxígeno disponibles. Cuando se actualiza el modelo con estos nuevos datos se produce una alteración en el momento y la rapidez con la que salen las estrellas de la secuencia principal; si estos nuevos hallazgos son correctos, las estimaciones de edad de los cúmulos globulares deben ser aumentadas en unos mil millones de años.

Claramente queda aún trabajo por hacer antes de que se pueda medir la edad de estrellas distantes con la misma precisión y exactitud que la edad de nuestro Sistema Solar. Pero la idea básica que hay detrás de este método de medir las edades estelares es razonable, y los astrónomos han encontrado maneras de confirmar independientemente los resultados de estos análisis. Por ejemplo, se han utilizado las propiedades de estrellas débiles llamadas enanas blancas en cúmulos para poner límites a sus edades. A veces, los astrónomos pueden detectar incluso pequeñas cantidades de núcleos radiactivos en estas estrellas lejanas y aplicar a estos sistemas una forma de datación radiométrica. Todos estos métodos coinciden en que las estrellas más viejas en los cúmulos globulares más viejos tienen unos 12.000 o 13.000 millones de años, con un margen de error de mil millones. Incluso con diez millones de siglos de incertidumbre, estos datos son muy interesantes porque sugieren que los cúmulos globulares son objetos muy antiguos y que algunas estrellas han estado brillando miles de millones de años antes de que se formara nuestro Sistema Solar. De hecho, las estrellas en estos cúmulos globulares pueden ser casi tan viejas como el propio universo.

Sección 10.5: Lecturas adicionales

Para una buena introducción general a la astronomía, véase Roger A. Freedman y William J. Kaufmann, *Universe*, 6.^a ed. (Freeman and Co., 2001). Para obras más detalladas sobre astronomía estelar, véase

238 *Orígenes*

R. J. Taylor, *The Stars: Their Structure and Evolution* (Cambridge University Press, 1994) y R. Kippenhan y A. Weigart, *Stellar Structure and Evolution* (Springer-Verlag, 1994).

Una buena fuente para encontrar datos en bruto sobre diferentes tipos de estrellas puede encontrarse en <http://vizier.cfa.harvard.edu/vizier>, y muchos artículos técnicos pueden encontrarse en www.arxiv.org.

Una discusión detallada de los cúmulos globulares puede encontrarse en K. M. Ashman y S. E. Zepf, *Globular Clusters* (Cambridge University Press, 1998). Una buena revisión de cuestiones implicadas en la datación de cúmulos globulares es B. W. Carney y W. E. Harris, *Star Clusters* (Springer, 2000).

Artículos interesantes sobre fechas de salida de la secuencia principal son B. Chaboyer, «The Age of the Universe» en *Physics Reports* 307 (1998): 23-30; R. Gratton *et al.*, «Age of Globular Clusters in Light of Hiparcos: Resolving the Age Problem?» en *Astrophysical Journal* 494 (1998): 96-110; y R. Jiminez, «Towards an Accurate Determination of the Age of the Universe» en *Dark Matter in Astrophysics and Particle Physics*, ed. H. V. Klapdor-Kleingrothaus y L. Baudis (Institute of Physics Publishing, 1999). Para más detalles sobre recientes revisiones de las edades de salida de la secuencia principal, véase G. Imbriani *et al.*, «The Bottleneck of CON Burning and the Age of Globular Clusters» en *Astronomy and Astrophysics* 420 (2004): 625-629 y R. C. Runkle *et al.*, «Direct Measurement of the $^{14}\text{N}(\text{p},\text{g})^{15}\text{O}$ S-Factor» en *Physical Review Letters* 94 (2005): 082503, online en www.arxiv.org/abs/nucl-ex/0408018.

Para otros métodos de medida de la edad de cúmulos globulares, consultar Brad Hansen *et al.*, «White Dwarf Cooling Sequence of the Globular Clusters Messier 4» en *Astrophysical Journal* 574, n.º 2 (2002): L155-L158, on line en www.arxiv.org/bns/astro-ph/0205087, y J. Truran *et al.*, «Probing the Neutron-Capture Nucleosynthesis History of Galactic Matter» en *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 14 (2002): 1293-1308.

Distancias, desplazamientos hacia el rojo y la edad del universo

Durante mucho tiempo, los científicos y otros estudiosos se han sentido intrigados por cómo y cuándo nació el universo. Durante el siglo pasado, telescopios cada vez más potentes nos han mostrado que el universo es un inmenso lugar, con polvo, gas, galaxias y materiales más enigmáticos esparcidos a lo largo de miles de millones de años luz. Estas observaciones también han revelado que el universo que vemos hoy no es infinitamente viejo, sino que más bien surgió a partir de un suceso singular y formativo —llamado el *big bang*— en un tiempo definido y medible en el pasado lejano. Aunque la idea básica del *big bang* tiene casi cien años, sólo en la última década han aparecido restricciones robustas y precisas sobre la cronología de este importante suceso.

Algunos de los datos más valiosos que tenemos actualmente sobre la edad y la historia del universo proceden de los colores y las distribuciones de las galaxias. Estos agregados de estrellas y gas brillan con la luz combinada de miles de millones de estrellas y pueden verse a distancias que se extienden a miles de millones de años luz, de modo que pueden proporcionar información sobre las condiciones del universo en muchos lugares y en muchos instantes diferentes. Estos datos no sólo pueden ayudarnos a determinar cuándo sucedió el *big bang*, sino también a clarificar la naturaleza de este suceso, aunque es muy difícil de describir y conceptuar en términos cotidianos.

Sección 11.1: Obteniendo desplazamientos hacia el rojo

Para los cosmólogos, una de las características más clarificadoras de las galaxias es una propiedad conocida como desplazamiento hacia el rojo. Los desplazamientos hacia el rojo de las galaxias se obtienen de sus espectros, que suelen mostrar máximos estrechos como los que se ven en la Figura 11.1. Estas líneas son típicas de la radiación producida por átomos y moléculas. Cada tipo de átomo absorbe o emite fuertemente luz sólo a ciertas longitudes de onda discretas. Por ejemplo, los átomos de sodio pueden generar luz amarilla con una longitud de onda de 589 nanómetros, mientras que los átomos de mercurio pueden producir luz azulada a 436 nanómetros. Tales longitudes de onda ca-

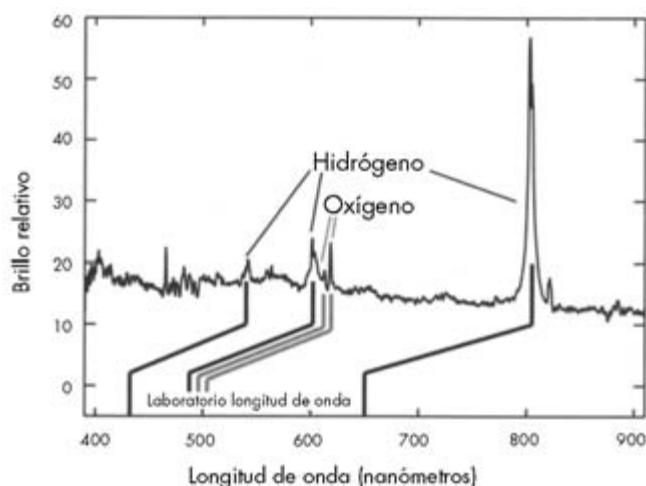


FIGURA 11.1. Espectro de una galaxia particular medido por el Sloan Digital Sky Survey (specID: 53140-1625-454, datos disponibles en www.sdss.org). Esta gráfica muestra la cantidad de luz emitida por la galaxia a diferentes longitudes de onda. Estos datos muestran varios máximos estrechos que corresponden a las transiciones discretas de diversos átomos. Los máximos debidos al hidrógeno y al oxígeno están identificados y marcados. Todas las longitudes de onda observadas para estas líneas están desplazadas hacia longitudes de onda más largas comparadas con las longitudes de onda de estas mismas líneas observadas en el laboratorio (indicadas por las líneas cercanas a la parte inferior de la gráfica).

Distancias, desplazamientos hacia el rojo y la edad del universo 241

racterísticas reflejan procesos subatómicos que se describen mejor mediante las ecuaciones de la mecánica cuántica. Puesto de forma sencilla, estas ecuaciones indican que los electrones que rodean a un núcleo dado sólo pueden existir en un número finito de configuraciones durante un intervalo de tiempo sustancial. Cuando los electrones cambian de una de estas configuraciones a otra, los átomos deben absorber o ceder radiación para conservar la energía, el momento lineal y el momento angular. Esta radiación de transición tiene una longitud de onda bien definida que está determinada por los estados inicial y final de los electrones de ese átomo particular. Diferentes transiciones producen luz de diferentes longitudes de onda, lo que genera una pauta de líneas en el espectro específico de cada tipo de átomo en la tabla periódica.

Las pautas de las líneas generadas por átomos diferentes han sido medidas en el laboratorio con gran precisión, lo que nos permite identificar los diversos elementos presentes en una galaxia particular. Por ejemplo, el espectro de la galaxia que se ilustra en la Figura 11.1 tiene tres máximos a 800 nm, 600 nm, y 530 nm. Estos tres números son parte de una secuencia característica del hidrógeno, el elemento más abundante en el universo: $(2/1) \times 400$ nm, $(3/2) \times 400$ nm, $(4/3) \times 400$ nm. Sin embargo, mientras que la *pauta* que siguen los máximos es compatible con el hidrógeno, sus posiciones no lo son. En el laboratorio estas líneas aparecen aproximadamente a $(2/1) \times 328$ nm, $(3/2) \times 328$ nm y $(4/3) \times 328$ nm, lo que significa que en la galaxia los máximos aparecen a longitudes de onda un 23 % mayores que aquí en la Tierra.

¿Significa esto que los máximos se deben a un material distinto del hidrógeno? No parece probable, porque hay otras características en el espectro que corresponden a los otros elementos. Los dos máximos en torno a 620 nm, por ejemplo, tienen una separación compatible con las líneas en el espectro del oxígeno, pero en el laboratorio aparecen aproximadamente a 500 nm. De nuevo, las líneas en la galaxia difieren de las líneas medidas en la Tierra en un factor del 23 %. Si esto sucede con pautas características de varios elementos diferentes, es difícil argumentar que hemos identificado incorrectamente los materiales de la galaxia. Más bien, parece que la longitud de onda de toda la luz procedente de la galaxia ha aumentado en un 23 % entre el mo-

242 Orígenes

mento en que fue producida en la galaxia y el momento en que nuestros aparatos la observaron.

Los espectros de casi todas las galaxias que han sido identificadas muestran desplazamientos similares hacia longitudes de onda más largas. Se conocen como desplazamientos hacia el rojo porque las longitudes de onda más largas corresponden al extremo rojo del espectro visible, y se cuantifican mediante el cambio fraccional en la longitud de onda de la luz. Para la galaxia anterior, el desplazamiento hacia el rojo es 0,23, y otras galaxias tienen desplazamientos hacia el rojo que van desde un pequeño porcentaje hasta un factor de siete.* La observación de desplazamientos hacia el rojo galácticos tiene importantes consecuencias para la dinámica y la historia del universo. Sin embargo, antes de apresurarnos a interpretar o explicar estas medidas, deberíamos explorar primero cómo depende el desplazamiento hacia el rojo de una galaxia de su posición en el espacio y de la distancia que le separa de nosotros.

Sección 11.2: Midiendo distancias

A diferencia del desplazamiento hacia el rojo, que puede obtenerse de una forma relativamente fácil a partir de un buen espectro, la distancia a una galaxia es algo muy difícil de medir. Como discutimos en el capítulo anterior, hay una forma de medir directamente distancias astronómicas basada en simple trigonometría. Por desgracia este método no puede aplicarse en regiones fuera de nuestra propia galaxia porque el movimiento aparente de los objetos es demasiado pequeño para que se pueda medir. Por consiguiente se requieren otras técnicas más indirectas para estimar las enormes distancias que separan las galaxias.

Muchos métodos para medir las distancias a las galaxias se basan en el brillo aparente de ciertos objetos astronómicos. Como vimos en el último capítulo, el brillo aparente de un objeto disminuye con la distancia, de modo que un objeto situado a 200 metros parece cuatro

* Sólo muy pocas galaxias, muy cercanas, tienen desplazamientos medibles hacia longitudes de onda más cortas.

veces más tenue que un objeto similar situado a 100 metros. Dándole la vuelta, si conocemos cuánta luz genera el objeto (su luminosidad), entonces podemos utilizar el brillo aparente del objeto para estimar su denominada distancia de luminosidad a nosotros. En la actualidad no hay manera de calcular exactamente la luminosidad de cualquier objeto astronómico galáctico solamente a partir de la teoría. Sin embargo, hay ciertos tipos de objetos cuya luminosidad puede estimarse sobre la base de otras características de la luz observada.

Un buen ejemplo de un objeto de este tipo es una cefeida, un tipo de estrella cuya luminosidad varía con el tiempo en un ciclo característico (mostrado en la Figura 11.2). El brillo de las cefeidas aumenta rápidamente al principio, luego disminuye más lentamente hasta que alcanza su nivel original y el ciclo empieza de nuevo. Este ciclo puede tardar días o semanas en completarse, dependiendo de la cefeida. Las cefeidas son miles de veces más luminosas que el Sol, de modo que pueden verse desde muy lejos, incluso si están en otras galaxias. Puesto que las cefeidas son estrellas de un tipo particular e identificable, serían buenos indicadores de distancia si pudiéramos determinar su luminosidad. Por fortuna hay un laboratorio natural para entender las características de las cefeidas: las Nubes de Magallanes.

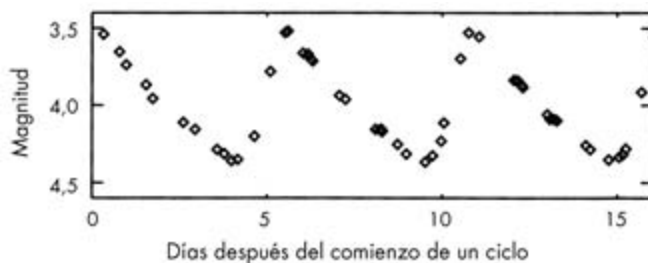


FIGURA 11.2. Las variaciones de brillo de Delta Cephei, una estrella cefeida típica. Una cefeida aumenta de brillo rápidamente y luego se oscurece más lentamente en un ciclo que se repite. En el caso de esta cefeida el ciclo tarda 5,3 días en completarse. Otras cefeidas pueden tardar hasta un mes en completar un ciclo. Sin embargo, todas las cefeidas comparten esta pauta tipo diente de sierra en sus variaciones. (Datos de T. J. Moffett y T. G. Barnes, «Observational Studies of Cepheids II: BVRI Photometry of 112 Cepheids» en *Astrophysical Journal Supplement Series* 55 [1984]: 389-432.)

244 *Orígenes*

La Grande y la Pequeña Nube de Magallanes son dos galaxias satélite que orbitan alrededor de la Vía Láctea. Las estrellas de cada nube están aproximadamente a la misma distancia de nosotros, de modo que si todas las cefeidas tuvieran la misma luminosidad, todas las cefeidas en la Gran (o la Pequeña) Nube de Magallanes tendrían el mismo brillo aparente. En realidad, como se muestra en la Figura 11.3, el brillo de las cefeidas en la Gran Nube de Magallanes abarca cinco magnitudes. Así, la luminosidad de estos objetos puede variar en aproximadamente un factor cien.

Incluso si las cefeidas tienen un amplio abanico de luminosidades, aún pueden utilizarse para estimar distancias porque el brillo de una cefeida está correlacionado con su período —el tiempo que tarda en recorrer un ciclo de brillo—. Esto significa que una cefeida que es más luminosa también tarda más tiempo en aumentar su brillo u oscurecerse, de modo que podemos estimar la luminosidad de una cefeida a partir de su período, y también inferir a qué distancia está. Suponga-

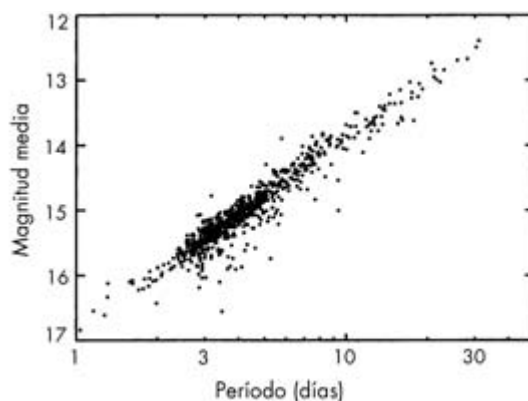


FIGURA 11. 3. La relación entre el brillo medio y el período de las variaciones de brillo para cefeidas de la Gran Nube de Magallanes (basada en datos de A. Udolski *et al.*, *Acta Astronomica* 49 [1999]: 223). Puesto que todas estas cefeidas están aproximadamente a la misma distancia de nosotros, las variaciones de brillo reflejan variaciones reales en la luminosidad de las cefeidas. El brillo de estos objetos está correlacionado con el período, de modo que midiendo con qué rapidez cambia el brillo de la cefeida, podemos obtener una estimación razonable de su luminosidad.

Distancias, desplazamientos hacia el rojo y la edad del universo 245

mos, por ejemplo, que encontramos una cefeida en otra galaxia con un período de unos diez días y una magnitud media de 25. Esta cefeida es diez magnitudes, o diez mil veces, más débil que una cefeida con un período comparable en la Gran Nube de Magallanes. Por consiguiente, dicha cefeida —y la galaxia que la contiene— debe estar cien veces más lejos que la Gran Nube de Magallanes.

Si queremos saber a qué distancia está esta galaxia en años luz, entonces tenemos que conocer la distancia a la Gran Nube de Magallanes. Por fortuna, hay cefeidas en nuestra propia galaxia, y algunas de ellas están suficientemente próximas para que los astrónomos puedan utilizar el método de paralaje para obtener medidas precisas de la distancia, y con ello determinar su luminosidad. La comparación de estas medidas con las de cefeidas en las Nubes de Magallanes nos dice que la Gran Nube de Magallanes está a unos 150.000 años luz (otros métodos de medir la distancia a este objeto han dado resultados muy similares). Por consiguiente, la galaxia en el ejemplo anterior debe estar a una distancia de unos 15 millones de años luz.

Aunque las cefeidas son muy brillantes comparadas con el Sol, sólo pueden ser identificadas en galaxias a menos de unos 100 millones de años luz de nosotros. Ésta puede parecer una distancia muy grande, pero la inmensa mayoría de las galaxias están más lejos que esto. Por lo tanto, se necesitan objetos mucho más brillantes para estimar las distancias a estos objetos más remotos. Recientemente las supernovas Tipo Ia han surgido como una poderosa herramienta para medir las grandes distancias a tales galaxias remotas.

Las supernovas son sucesos catastróficos que pueden producir tanta luz como mil millones de soles durante un par de semanas. Estos sucesos son muy probablemente explosiones que ocurren cuando las reacciones en el núcleo de una estrella ya no pueden impedir que colapse bajo su propia gravedad. Esto puede suceder mediante varios procesos diferentes, y de hecho hay varios tipos distintos de supernovas, cada uno de los cuales tiene rasgos particulares identificables en sus espectros. Las supernovas Tipo Ia carecen —entre otras cosas— de la secuencia de líneas características del hidrógeno, de modo que estas explosiones implican probablemente a estrellas pobres en hidrógeno. En concreto, ocurren probablemente en antiguas enanas blan-

246 Orígenes

cas, los núcleos consumidos de estrellas de la secuencia principal con poca masa. Las reacciones nucleares han cesado básicamente en dichos objetos, pero cuando otra estrella cercana transfiere alguna masa adicional a la enana, ésta puede ser sacada del equilibrio y explotar.

Aunque tales supernovas son relativamente raras —ocurren quizá una vez por siglo en cada galaxia— se han observado algunos de estos eventos en galaxias con cefeidas u otros indicadores de distancias, lo que ha permitido a los astrónomos estimar la cantidad total de luz que generaban. Estos datos muestran que la luminosidad máxima de estos sucesos puede variar en aproximadamente un factor tres. Sin embargo, las supernovas más luminosas tienden a desvanecerse más lentamente, de modo que, como sucede con las cefeidas, la forma en que varía con el tiempo la luz de este tipo particular de supernovas revela cuánta luz generó la explosión. Por consiguiente podemos comparar de nuevo la producción de energía total de este suceso con su brillo observado y calcular a qué distancia están la supernova y la galaxia que la alberga.

Con datos de los desplazamientos hacia el rojo y las distancias a muchas galaxias podemos hacer lo que se conoce como un diagrama de Hubble, una gráfica del desplazamiento hacia el rojo frente a distancia (Figura 11.4). Tales diagramas muestran con gran claridad que cuanto más lejos está la galaxia, mayor es el desplazamiento hacia el rojo. Esta correlación entre desplazamiento hacia el rojo y distancia debe reflejar alguna característica fundamental de la dinámica y la historia del universo. Sin embargo, hay más de una manera de interpretar un diagrama de Hubble, de modo que necesitamos observaciones astronómicas y cosmológicas adicionales para evaluar estas alternativas y encontrar la explicación más probable para estos datos.

Sección 11.3: Una manera errónea de mirar los diagramas de Hubble

Una interpretación del diagrama de Hubble —que es tan seductoramente intuitiva que con frecuencia llega a los libros de divulgación sobre cosmología— es que los desplazamientos hacia el rojo son des-

Distancias, desplazamientos hacia el rojo y la edad del universo 247



FIGURA 11.4. Un diagrama de Hubble que muestra los desplazamientos hacia el rojo de diferentes galaxias frente a la distancia de luminosidad deducida a partir del brillo de supernovas Tipo Ia (basado en datos de John L. Tonry *et al.*, «Cosmological Results from High-*z* Supernovae» en *Astrophysical Journal* 594 [2003]: 1-24). Cada punto representa una única galaxia, y las barras de error horizontales muestran la incertidumbre en la medida de las distancias (las incertidumbres en los desplazamientos hacia el rojo son mucho menores). Nótese que cuanto más lejos está la galaxia, mayor es el desplazamiento hacia el rojo.

plazamientos Doppler debidos a los movimientos relativos de las galaxias. Ésta es una explicación atractiva de los desplazamientos hacia el rojo galácticos porque los desplazamientos Doppler pueden estudiarse y mostrarse fácilmente en la Tierra. Por ejemplo, los desplazamientos Doppler en ondas sonoras son los que provocan que el tono de la sirena de una ambulancia cambie abruptamente cuando nos adelanta en una calle. Desplazamientos similares en la longitud de onda de la radiación electromagnética de objetos en movimiento son normalmente demasiado sutiles para que los percibamos con nuestros ojos, pero pueden ser detectados con sistemas de radar Doppler, receptores GPS y similares.

Si tratamos de interpretar los desplazamientos hacia el rojo galácticos como desplazamientos Doppler, entonces el hecho de que la luz se haya desplazado hacia longitudes de onda más largas significa que las galaxias deben estar alejándose de nosotros (igual que el descenso

248 *Orígenes*

en el tono de una sirena implica que el vehículo ha pasado y se aleja). Además, podemos calcular con qué rapidez se están moviendo las galaxias a partir de la magnitud del desplazamiento hacia el rojo. Si el desplazamiento hacia el rojo es mucho menor que 1, entonces el valor del desplazamiento hacia el rojo es casi exactamente la razón entre la velocidad de la galaxia y la velocidad de la luz, de modo que una galaxia con un desplazamiento hacia el rojo de 0,1 está alejándose de nosotros a aproximadamente una décima parte de la velocidad de la luz. Para velocidades más altas y mayores desplazamientos hacia el rojo, el cálculo es un poco más complicado —una galaxia con un desplazamiento hacia el rojo de 1,0 se está moviendo a aproximadamente seis décimas de la velocidad de la luz— pero en realidad sólo se necesita un poco de álgebra adicional para hacer esta estimación.

Si tomamos los desplazamientos hacia el rojo como una medida del movimiento galáctico, entonces el diagrama de Hubble indica que todas las galaxias se están alejando de nosotros, y que las galaxias más alejadas de nosotros se están moviendo con más rapidez. Esta situación singular se ilustra aquí:

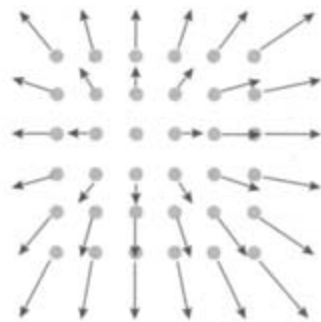


FIGURA 11.5.

Los puntos grises representan galaxias. La galaxia que no tiene ninguna flecha es la galaxia en la que vivimos, y las flechas en las otras galaxias indican con qué rapidez y en qué dirección parecen estar moviéndose.

Esta figura implica que somos tan impopulares en el cosmos que todas las galaxias del universo están tratando de apartarse de nosotros,

Distancias, desplazamientos hacia el rojo y la edad del universo 249

pero no tiene por qué ser así. Imaginemos en su lugar que todas las galaxias se alejan de un punto especial en el espacio, con una velocidad proporcional a su distancia a dicho punto, como se muestra aquí:

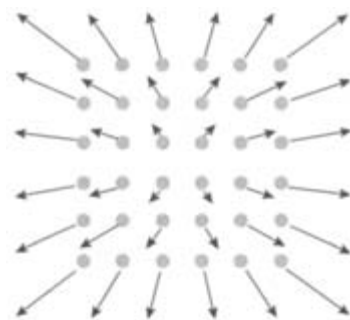


FIGURA 11.6.

En este caso, cualquier observador situado en una galaxia de este grupo vería la misma relación simple entre distancia y velocidad relativa que encontramos en el diagrama de Hubble.

Un universo lleno de galaxias que se alejan de un punto está, por desgracia, próximo a lo que muchos de nosotros imaginamos al oír las palabras *big bang*. Sin embargo, no es esto lo que los cosmólogos quieren decir cuando hablan de este suceso, y este escenario no encaja con otras observaciones de la estructura a gran escala del universo. Si todas las galaxias hubieran salido despedidas desde un punto especial en el espacio, entonces cabría esperar que las características y distribución de las galaxias dependieran de su distancia a este punto central. Por ejemplo, podríamos predecir que las galaxias más alejadas de este punto tendrían masas menores que las galaxias más cercanas (o que serían de un tipo diferente, o tendrían una composición química diferente). También podríamos conjeturar que habría más galaxias más cercanas a este punto que galaxias más alejadas, o viceversa. Hasta ahora, ninguna observación de la estructura a gran escala del universo muestra ninguna pauta que apoye tales ideas.

Consideremos la Figura 11.7, que muestra la distribución de galaxias en el espacio medida por el Sloan Digital Sky Survey. Estos datos no muestran ninguna estructura a gran escala que apunte claramente a

250 Orígenes

un lugar particular en el universo en el que todas las galaxias pudieran haberse originado. De hecho, esta y todas las demás observaciones hasta la fecha indican que el universo es básicamente homogéneo a gran escala, con los mismos tipos de galaxias distribuidas por el espacio aproximadamente de la misma forma. Hay cúmulos y grupos de galaxias en diversos lugares, pero estas estructuras no se extienden hasta llenar una gran fracción del universo observable. Esto contradice la idea de que pudiera haber un punto específico en el universo del que provenga toda la materia.

La homogeneidad a gran escala en la estructura del universo indica que las pautas en los movimientos aparentes de las galaxias se deben a un fenómeno más general, que afecta a todas las regiones del espacio por igual. Estrictamente hablando, esto no descarta un modelo del universo con galaxias en movimiento a través del espacio. Por

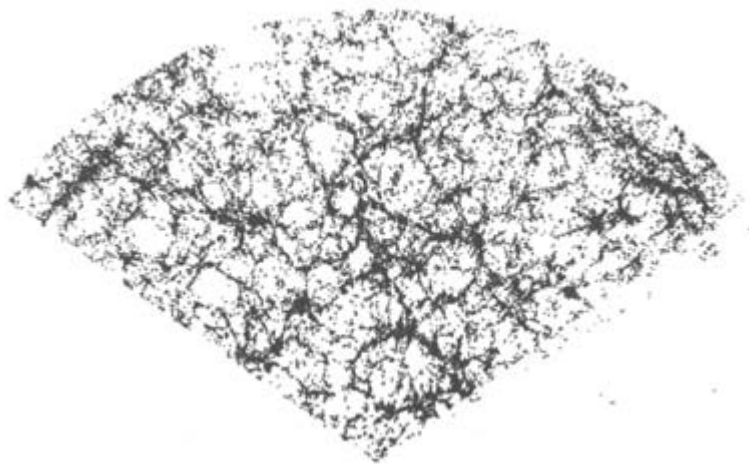


FIGURA 11.7. Una muestra del Sloan Digital Sky Survey, donde se presenta la distribución de decenas de miles de galaxias en una cuña de espacio. El vértice de la cuña marca la posición de la Tierra, y la mayoría de las galaxias distantes están aproximadamente a 2.000 millones de años luz. La distribución de galaxias es en promedio la misma en todas las partes de esta cuña, y no hay pautas destacadas que sugieran que las galaxias se están moviendo a partir de un punto especial en el espacio. (Datos obtenidos del espectro disponible en spectro.princeton.edu.)

Distancias, desplazamientos hacia el rojo y la edad del universo 251

ejemplo, podríamos imaginar un universo infinito en el que todas las galaxias se estuvieran alejando cada vez más, en cuyo caso no tendría por qué haber ningún lugar especial central en el universo. Tales cosmologías «newtonianas» suelen ser útiles con fines de instrucción y de computación. Sin embargo, incluso estos modelos dan una imagen bastante confusa de cuál es el pensamiento mayoritario de los cosmólogos acerca del universo. De hecho, la mejor explicación hoy disponible para los datos en el diagrama de Hubble es mucho más extraña que cualquier explosión cósmica, pero es algo que ocurre de forma natural en el contexto de la relatividad general.

Sección 11.4: Una breve introducción a la relatividad general

La relatividad general es la teoría que hoy por hoy proporciona el método más preciso para calcular cómo se mueven los objetos bajo la influencia de la gravedad. Aunque las manipulaciones matemáticas requeridas para extraer predicciones a partir de esta teoría son bastante intimidatorias, la premisa básica que hay tras estos cálculos es fácil de expresar, aunque quizá difícil de aceptar: más que una fuerza, la gravedad es una distorsión en la geometría del espacio y el tiempo.

Las fuerzas son una parte importante de la mecánica clásica de Newton y Galileo, que afirma que, en ausencia de fuerzas externas, un objeto se moverá a velocidad constante en línea recta. Por lo tanto, las fuerzas externas son responsables de cualquier cambio en velocidad y dirección de movimiento de un objeto. Sin embargo, antes de que podamos calcular cómo responderá un objeto a una fuerza dada, con frecuencia necesitamos alguna información adicional sobre las características del objeto. Por ejemplo, normalmente tenemos que conocer la masa de un objeto antes de que podamos determinar cómo se acelerará en respuesta a una fuerza particular. En muchos casos, diferentes objetos pueden experimentar fuerzas diferentes cuando se colocan en el mismo entorno. Imaginemos, por ejemplo, que tuviéramos un protón, un electrón y un neutrón cerca de una gran carga positiva. En esta situación, el protón sería repelido por la carga, el electrón sería atraído por ella, y el neutrón no sentiría ninguna fuerza en absoluto.

252 *Orígenes*

La gravedad es única en cuanto que todos los objetos sometidos a un campo gravitatorio fijo se mueven exactamente de la misma manera. Una famosa demostración de ello incluye una pluma y un martillo. Ambos objetos están inicialmente mantenidos por encima de la superficie de la Tierra en el vacío. Cuando se sueltan, ambos objetos caen a la misma velocidad y llegan al suelo exactamente al mismo tiempo. De hecho, podríamos haber utilizado cualquier objeto, desde un grano de arena hasta un camión de la basura, desde una pieza de oro hasta una bola de barro. Con tal de que eliminemos la resistencia del aire, todos estos objetos se moverán exactamente de la misma manera.

En mecánica clásica este sorprendente resultado es esencialmente una coincidencia. Supongamos que el martillo tuviera una masa mil veces mayor que la de la pluma. La fuerza gravitatoria sobre el martillo es entonces mil veces más intensa que la fuerza sobre la pluma. Sin embargo, el martillo también tarda mil veces más en alcanzar una velocidad dada en respuesta a una fuerza dada, de modo que los dos objetos se aceleran al mismo ritmo y se mueven de la misma manera.

Por el contrario, en relatividad general el hecho de que todos los objetos respondan de la misma forma a un campo gravitatorio revela un aspecto fundamental del modo en que realmente opera la gravedad. Sólo hay otra situación en donde el movimiento de los objetos no depende de sus propiedades intrínsecas, y es cuando no está actuando ninguna fuerza externa; en este caso, cualquier objeto se mueve a velocidad constante en línea recta. Una línea recta, por supuesto, es la distancia más corta entre dos puntos en geometría euclidiana, de modo que la trayectoria que siguen los objetos en ausencia de fuerzas externas tiene una definición geométrica específica. La relatividad general postula que los objetos en un campo gravitatorio siguen una trayectoria que tiene una definición geométrica similar. En esencia, se nos pide que imaginemos que los campos gravitatorios producidos por objetos masivos corresponden a distorsiones en la geometría del espacio, que hacen que la «distancia más corta» entre dos puntos ya no se parezca a una línea recta. Cualquier objeto seguirá entonces esta trayectoria curva a menos que sobre él estén actuando otras fuerzas no gravitatorias. Por consiguiente, la relatividad general sugiere que la gravedad no es una fuerza que hace que las partículas se desvíen de una

Distancias, desplazamientos hacia el rojo y la edad del universo 253

trayectoria en línea recta; es un cambio en la propia definición de una línea recta.

Como una nota al margen debo señalar que el desplazamiento relevante en relatividad general implica en realidad cambios tanto en el espacio como en el tiempo. Imaginemos que tuviéramos dos naves espaciales que se mueven entre dos puntos en el espacio. Una nave espacial sigue la típica órbita curva alrededor de la Tierra y la otra utiliza sus motores para viajar en una línea recta. Si utilizáramos una regla o los odómetros en la nave espacial para medir las distancias que recorren, *no* encontraríamos que la nave espacial que siguió la trayectoria curva recorría un menor número de kilómetros. Sin embargo, una vez completado el viaje las dos naves espaciales tendrían diferentes lecturas no sólo en sus odómetros sino también en sus relojes internos, y una combinación particular de estos desplazamientos temporales y longitudes de trayectorias espaciales toma un valor extremo para la nave espacial en órbita.

La relatividad general es evidentemente una manera intrigante de ver la gravedad. Sin embargo, la relatividad general no es sólo una especulación teórica motivada por elegantes formulaciones matemáticas. Explicaba fenómenos —como ciertas anomalías en la órbita de Mercurio— que no podían explicarse utilizando la gravedad clásica. También predecía efectos que fueron más tarde confirmados por las observaciones, tales como la curvatura de la luz estelar por el Sol. Por lo tanto, la relatividad general proporciona el mejor modelo disponible para entender cómo actúa la gravedad, tanto teórica como experimentalmente. También puede explicar la relación entre desplazamiento hacia el rojo y distancia observada en el diagrama de Hubble.

Sección 11.5: El universo en expansión

La relatividad general incluye un nuevo proceso que puede alterar la longitud de onda de la luz procedente de galaxias distantes: un universo en expansión con un factor de escala variable. Supongamos que tenemos un universo lleno de galaxias uniformemente espaciadas (imaginemos que la pauta continúa indefinidamente en todas direcciones y en tres dimensiones):

254 *Orígenes*

FIGURA 11.8.

Obviamente, las distancias entre galaxias están ligadas a la geometría del universo y, según la relatividad general, esta geometría está afectada por la cantidad de materia en el universo. Esto significa que las distancias entre galaxias pueden cambiar. Exploraremos estos cambios con más detalle en el capítulo siguiente pero, de momento, consideremos un caso sencillo en el que al cabo de cierto tiempo el espaciado entre las galaxias ha aumentado en un factor dos, como se muestra aquí:



FIGURA 11.9.

Este cambio en el espaciado entre las galaxias no sucede porque las propias galaxias se hayan movido a través del espacio, como lo hacían en el modelo «explosivo» antes discutido. Más bien, la cantidad de «espacio» entre las galaxias ha aumentado debido a un cambio en el parámetro geométrico fundamental, que es el llamado factor de escala del universo. En este ejemplo, el factor de escala se ha duplicado entre las dos imágenes.

Distancias, desplazamientos hacia el rojo y la edad del universo 255

La duplicación del factor de escala no sólo duplica la distancia entre cualquier par de galaxias sino que también duplica la distancia entre las crestas de cualquier onda electromagnética, y con ello duplica la longitud de onda de la luz que se propaga a través del espacio. Un factor de escala variable proporciona así un mecanismo para generar desplazamientos hacia el rojo en la luz procedente de galaxias distantes. De hecho, ésta es la mejor explicación que tenemos ahora para los desplazamientos hacia el rojo observados, porque no sólo es compatible con estos datos sino también con un montón de observaciones cosmológicas adicionales (algunas de las cuales se discuten en el capítulo siguiente). Ciertamente es un modelo mejor que el escenario explosivo muy simplista antes descrito. Aunque sólo sea por esto, puede acomodar las observaciones que sugieren que el universo es básicamente homogéneo a gran escala. Un factor de escala en aumento actúa a lo largo del universo entero, y por consiguiente no requiere un lugar central especial.

Puesto que la luz procedente de galaxias distantes se ha desplazado hacia longitudes de onda mayores, el factor de escala del universo debe haberse hecho más grande desde que se generó la luz. Un universo con un factor de escala en aumento suele describirse como un «universo en expansión»; sin embargo, no habría que leer demasiado en esta expresión. Por ejemplo, el hecho de que el universo se esté expandiendo no significa que se esté dispersando a partir de algún lugar en un espacio más grande exterior al universo. Por todo lo que sabemos, el universo podría ser infinitamente grande, y los cambios en el factor de escala no cambiarían el tamaño del universo (infinito por dos sigue siendo infinito). Aunque es posible que el universo sea finito y forme un objeto compacto en un espacio de dimensiones más altas, no tenemos datos observacionales que apoyen claramente esta idea o cuantifiquen las características de dicho espacio de dimensión más alta, de modo que probablemente es mejor dejar de lado por ahora tales especulaciones.

Nótese, además, que incluso si el universo se está expandiendo, no todo en el universo se está haciendo más grande. Ni usted, ni yo, ni este libro, ni siquiera la galaxia entera se está haciendo más grande por la expansión del universo. Recordemos que la relatividad general

256 Orígenes

postula que los objetos masivos distorsionan la geometría del espacio y el tiempo, y alteran la trayectoria que los objetos siguen de forma natural en ausencia de otras fuerzas. Cuando dos objetos se mantienen juntos por otra fuerza, como el electromagnetismo, la distancia entre estos objetos no se ve afectada por esta distorsión geométrica, excepto en situaciones extremas en las que la geometría cambia enormemente a lo largo de la separación de los dos objetos (lo que sólo es probable que suceda si caen en un agujero negro). Esto significa que la distancia típica entre electrones en un átomo o entre átomos en un objeto sólido no se ve afectada por la expansión del universo. Tampoco las galaxias, que se mantienen unidas por la gravedad, se expanden con el universo porque las distorsiones geométricas locales producidas dentro de la galaxia son suficientemente fuertes para impedir que se dispersen las estrellas y otros objetos en su interior. La expansión del universo puede afectar a la distancia entre galaxias aisladas sólo porque estos objetos no están ligados y por ello pueden seguir las trayectorias «rectas» definidas por la geometría del universo. Del mismo modo, la expansión universal influye en la longitud de onda de la luz que se propaga libremente porque ninguna fuerza restringe la distancia entre las crestas de una onda electromagnética particular.

Sección 11.6: Reinterpretando el diagrama de Hubble como un documento histórico

En el contexto de un universo en expansión, los desplazamientos hacia el rojo no reflejan las características específicas de las galaxias fuente; más bien, indican cuánto se ha expandido el universo durante el tiempo en que estuvieron en tránsito. Esto significa que los desplazamientos hacia el rojo proporcionan un registro de la historia de la expansión del universo. Para ver cómo podemos extraer dicho registro, echemos otra mirada al diagrama de Hubble (Figura 11.10).^{*} Esta gráfica indica que una galaxia a aproximadamente 150 años luz

^{*} Basado en datos en John L. Tonry *et al.*, «Cosmological Results from High-*z* Supernovae» en *Astrophysical Journal* 594 (2003): 1-24.

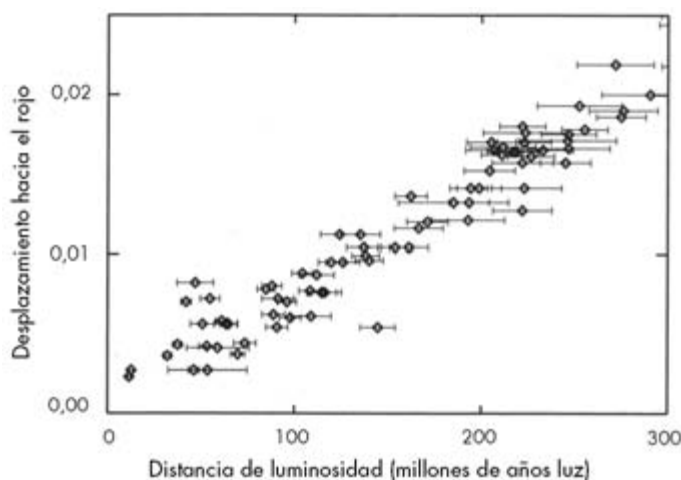
Distancias, desplazamientos hacia el rojo y la edad del universo 257

FIGURA 11.10. Un diagrama de Hubble que muestra los desplazamientos hacia el rojo de diferentes galaxias frente a su distancia de luminosidad deducida a partir del brillo de supernovas Tipo Ia.

de distancia tiene un desplazamiento hacia el rojo de 0,01, de modo que la longitud de onda de la luz procedente de la galaxia ha aumentado en un 1 % durante su viaje hasta nosotros, y el factor de escala del universo ha aumentado en un 1 % durante este tiempo. Por consiguiente, el factor de escala cuando la galaxia emitió la radiación era un 1 % más pequeño que hoy. Si arbitrariamente fijamos el factor de escala del universo igual a 1 hoy, entonces el factor de escala era 0,99 cuando la galaxia emitió la luz. Siguiendo un procedimiento similar, podemos calcular el factor de escala del universo en el instante en que la luz que vemos hoy fue emitida desde cada galaxia individual en el diagrama de Hubble, y construir la gráfica de la Figura 11.11.

Esta gráfica (que básicamente es la gráfica anterior puesta del revés) muestra que conforme crece la distancia a la galaxia, decrece el factor de escala que había cuando la galaxia produjo la luz. La luz procedente de galaxias más lejanas tarda más tiempo en llegarnos, de modo que esto implica que el factor de escala del universo ha estado aumentando con el tiempo. De hecho, podemos utilizar la distancia inferida para calcular el tiempo que la luz ha estado viajando y hacer

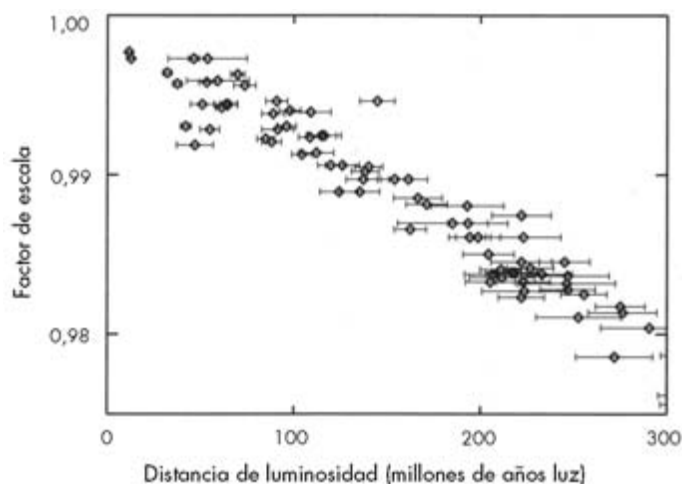
258 *Orígenes*

FIGURA 11.11. El factor de escala frente a distancia de luminosidad para galaxias/supernovas cercanas.

una gráfica que muestre cómo ha cambiado el factor de escala con el tiempo.

En principio, es una tarea bastante sencilla convertir la distancia a una galaxia en una estimación del tiempo que tardó la luz en llegar-nos. La luz viaja a una velocidad bien definida (unos 300.000 kilómetros por segundo), y un año luz se define como la distancia que viaja la luz en un año, de modo que una galaxia a 150 millones de años luz debería haber emitido la luz que hoy recibimos hace 150 millones de años. Por desgracia, la situación se complica en un universo en expansión, porque la distancia entre las galaxias estaba cambiando mientras la luz estaba en tránsito. Estas complicaciones no son muy importantes para el diagrama de Hubble que se muestra abajo, porque el factor de escala sólo cambia en un pequeño porcentaje durante el tiempo de viaje de la luz. Sin embargo, programas recientes de investigación de supernovas han conseguido encontrar un número importante de supernovas con desplazamientos hacia el rojo en torno y por encima de 1, lo que corresponde a un cambio en un factor dos en la longitud de onda de la luz y en el factor de escala del universo. Para estos objetos muy distantes ya no pueden ser ignorados los efectos del factor de escala variable.

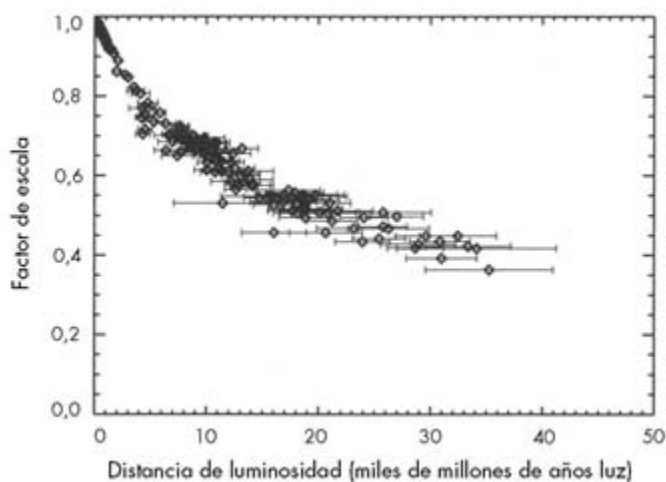


FIGURA 11.12. El factor de escala frente a distancia de luminosidad para supernovas más lejanas.

Algunas de estas nuevas observaciones se representan gráficamente en la Figura 11.12.* La distancia aparente de la galaxia más lejana es de más de 30.000 millones de años luz. Sin embargo, la luz procedente de estos objetos no ha estado viajando a través del espacio durante más de 30.000 millones de años. Ocurre que estas estimaciones de distancia están muy hinchadas debido a los grandes cambios en el factor de escala. Por fortuna, con algunas hipótesis y aproximaciones podemos dar cuenta de esto y deducir el tiempo que realmente tardó la luz en viajar entre la galaxia y nosotros.

En primer lugar, recordemos que la distancia de luminosidad se obtiene a partir del brillo aparente de las supernovas. Clásicamente, hay una relación simple entre brillo y distancia: un objeto a una distancia doble aparece cuatro veces más oscuro. Sin embargo, en un universo en expansión las cosas se hacen más complicadas. La expansión del universo obliga a la luz a dispersarse sobre un volumen cada

* Compilados en A. Riess *et al.*, «Type Ia Supernova Discoveries at $z > 1$ from the Hubble Space Telescope: Evidence for Past Deceleration and Constraints on Dark Energy Evolution» en *Astrophysical Journal* 607 (2004): 665-687, y A. Riess *et al.*, «New Hubble Space Telescope Discoveries of Type Ia Supernovae at $z > 1$ » (2006), online en www.arxiv.org/abs/astro-ph/0611572.

260 *Orígenes*

vez mayor y esto hace que los objetos parezcan más oscuros de lo que esperaríamos. Además, conforme se estiran las longitudes de onda de los fotones individuales, la energía por fotón decrece, lo que reduce aún más el brillo aparente de la fuente. Si suponemos que la geometría euclidiana es aplicable en estas grandes escalas (una hipótesis a la que volveremos en el próximo capítulo), podemos corregir el oscurecimiento de la luz galáctica inducido por la expansión y hacer una gráfica del factor de escala como función de la distancia actual entre nosotros y la galaxia, que se conoce como la distancia de coordenadas (Figura 11.13).

Las mayores distancias de coordenadas son de unos 15.000 millones de años luz, mucho menores que las mayores distancias de luminosidad. Sin embargo, esto aún no significa que la luz procedente de dichas galaxias haya estado en tránsito durante 15.000 millones de años. La distancia de coordenadas es la distancia entre galaxias *hoy*; puesto que el universo se ha expandido con el tiempo, las galaxias estaban más juntas cuando la luz empezó su viaje, y la distancia total que ha recorrido la luz es algo menor que la distancia de coordenadas. Corregir este efecto requiere algo más de matemáticas, pero una vez

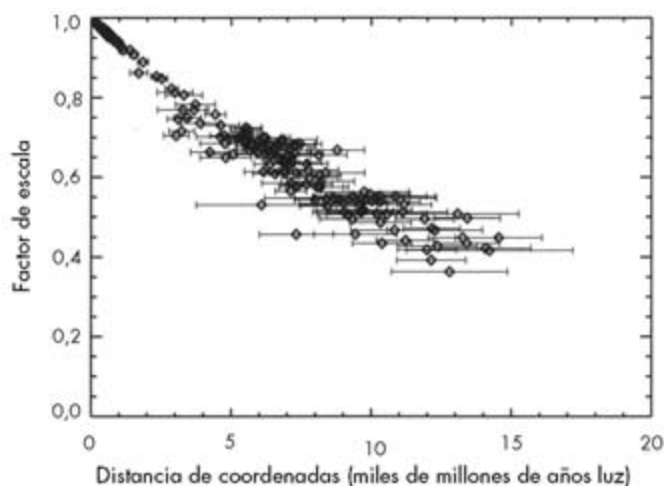


FIGURA 11.13. El factor de escala frente a distancia de coordenadas (suponiendo que el universo tiene una geometría espacial euclidiana).

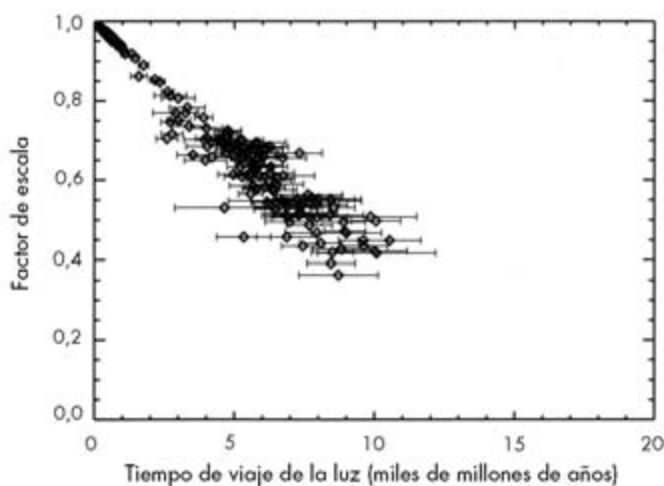


FIGURA 11.14. El factor de escala frente al tiempo de viaje de la luz (suponiendo que el universo tiene una geometría espacial euclidiana).

hecho tenemos finalmente la gráfica deseada del factor de escala frente al tiempo (Figura 11.14). Esta gráfica muestra claramente que cuanto más lejos retrocedemos al pasado, el factor de escala se hace cada vez mayor. De hecho, los datos siguen más o menos una línea recta, lo que demuestra que el factor de escala ha aumentado con el tiempo a un ritmo prácticamente constante durante los últimos 10.000 millones de años. Un factor de escala cero corresponde a una distancia cero entre galaxias adyacentes, de modo que el universo era infinitamente denso en esa época. Esta singularidad en la densidad del universo es el *big bang* real, un instante en el que todos nuestros modelos del universo dejan de ser válidos, lo que nos deja sin ninguna forma de conjeturar qué estaba sucediendo en o antes de dicho momento. El momento de dicho suceso formativo singular es ciertamente una buena estimación de la edad del universo.

Una sencilla extrapolación lineal de los datos puede ofrecer una medida bastante aproximada de la edad del universo, pero observaciones cosmológicas de los últimos años nos permiten ahora refinar mucho esta estimación. El próximo y último capítulo describe algunos de estos nuevos y maravillosos conjuntos de datos y cómo pueden uti-

262 *Orígenes*

lizarse para estimar con precisión cuándo sucedió realmente el *big bang*.

Sección 11.7: Lecturas adicionales

Para una introducción general a la cosmología y a la expansión del universo, véase Roger A. Freedman y William K. Kaufmann, *Universe*, 6.^a ed. (Freeman and Co., 2001). Sin embargo, se están haciendo nuevas observaciones cosmológicas con mucha rapidez, de modo que ningún libro está completamente actualizado. Artículos de revisión en diversas revistas son la mejor manera de mantenerse al día. Algunos artículos recientes razonablemente accesibles (con referencias) son W. L. Freedman y M. S. Turner, «Cosmology in the New Millennium» en *Sky and Telescope*, octubre 2003, y «Four Keys to Cosmology» por varios autores en *Scientific American*, febrero 2004. Para artículos más técnicos, www.arxiv.org es un buen lugar para encontrar los resultados experimentales y las especulaciones teóricas más recientes. Además, hay algunos libros de texto razonablemente recientes sobre temas cosmológicos, incluidos A. Liddle, *An Introduction to Modern Cosmology* (John Wiley, 2003) y S. Dodelson, *Modern Cosmology* (Academia Press, 2003).

El lector intrépido interesado en aprender a resolver problemas en relatividad general podría probar con S. Carroll, *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity* (Addison-Wesley, 2003); J. Hartle, *Gravity: An Introduction to General Relativity* (Addison-Wesley, 2003), o B. Schutz, *A First Course in General Relativity* (Cambridge University Press, 1994).

Para la medida de distancias con cefeidas, véase W. Freedman *et al.*, «Find Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant» en *Astrophysical Journal* 553 (2001): 47-72.

Para las últimas medidas en supernovas Tipo Ia, véase lo siguiente (todo lo cual puede encontrarse también en arxiv): R. Knop *et al.*, «New Constraints on Ω_M , Ω_Λ , and w from an Independent Set of 11 High-Redshift Supernovae Observed with the Hubble Space Telescope» en *Astrophysical Journal* 598 (2003): 102-137; A. Riess *et al.*,

Distancias, desplazamientos hacia el rojo y la edad del universo 263

«Type Ia Supernova Discoveries at $z > 1$ from the Hubble Space Telescope: Evidence for Past Deceleration and Constraints on Dark Energy Evolution» en *Astrophysical Journal* 607 (2004): 665-687; John L. Tonry *et al.*, «Cosmological Results from High- z Supernovae» en *Astrophysical Journal* 594 (2003): 1-24; P. Astier *et al.*, «The Supernova Legacy Survey: Measurement Ω_M , Ω_Λ , and w from the First Year Data Set» en *Astronomy and Astrophysics* 447 (2006): 31-48, y A. Riess *et al.*, «New Hubble Space Telescope Discoveries of Type Ia Supernova at $z > 1$ » (2006), online en www.arxiv.org/abs/astro-ph/0611572.

También son útiles las páginas web de equipos de investigación de supernovas, incluido el Supernova Cosmology Project en <http://panis-se.lbl.gov> y el High-Z Supernova Search en <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/oir/Research/supernova/HighZ.html>.

Parametrizando la edad del universo

Como es el caso de los esfuerzos de los egiptólogos para determinar con precisión la edad de las pirámides, la búsqueda de los cosmólogos para medir la edad del universo va mucho más allá del puro deseo de tener otro número para poner en los libros de texto. Es más bien parte de un esfuerzo mucho mayor por entender la estructura a gran escala y la composición del universo. Si tomamos en serio la relatividad general —lo que debemos hacer, dados los datos disponibles—, entonces hay una relación directa entre el contenido material del universo y la geometría del tiempo y del espacio. Por consiguiente, la historia de la expansión del universo depende y, a la vez, proporciona información sobre las propiedades del material que existe dentro de él. Hay todavía mucho misterio y debate en torno al material que llena nuestro universo. Las observaciones astronómicas indican que la mayor parte del material en el universo no está compuesto de los átomos, núcleos o electrones familiares, pero los estudios de laboratorio no han ofrecido todavía mucha información sobre cualquiera de las sustancias más exóticas que podrían ocupar el cosmos. Estudiando en detalle la historia del universo con una variedad de datos, los cosmólogos pueden sacar ideas valiosas sobre la constitución y quizá incluso los orígenes del universo.

Sección 12.1: Una mirada más próxima al universo en expansión

Las observaciones de supernovas descritas en el capítulo anterior son una de las fuentes de información más importantes sobre la historia del universo (véase Figura 12.1). Estos datos indican claramente que el factor de escala del universo (una medida de la distancia media entre galaxias) ha estado creciendo a un ritmo más o menos constante durante miles de millones de años. Aunque los datos disponibles sólo se remontan hasta un tiempo en que el factor de escala era aproximadamente la mitad de su valor actual —en otras palabras, cuando la distancia media entre galaxias era la mitad de lo que es hoy—, estas medidas ya ponen restricciones a la composición y la edad del universo.

Suponiendo que el universo está lleno con una distribución de materia aproximadamente uniforme,* las ecuaciones de la relatividad general dan una relación bastante directa entre la cantidad media de energía contenida en cada unidad de volumen (la densidad de energía del universo) y la rapidez con que cambia el factor de escala con el tiempo (el ritmo de expansión). Básicamente, cuanto mayor es la densidad de energía del universo, más rápido es el ritmo de expansión, y viceversa.** Por consiguiente, la historia de la expansión ilustrada en la Figura 12.1 contiene claves sobre la historia de la densidad de energía media del universo. Estos datos han revelado que el contenido de energía del universo ha estado cambiando de formas muy extrañas, formas que son, de hecho, incompatibles con las propiedades conocidas de la materia ordinaria.

Según la ecuación de Einstein $E=mc^2$, la mayor parte de la energía en la materia ordinaria es proporcional al número de átomos por unidad de volumen. A medida que el universo se expande y aumenta el

* Por supuesto, el material no está distribuido de una manera perfectamente uniforme a lo largo del universo. Hay objetos, como galaxias, que están presentes en unos lugares pero no en otros. Sin embargo, a escalas apropiadamente grandes, la distribución media de material está razonablemente próxima a la uniformidad.

** Más exactamente, si el universo tiene geometría euclidiana, entonces el cuadrado del ritmo de cambio del factor de escala dividido por el cuadrado del factor de escala es proporcional a la densidad de energía media del universo.

266 Orígenes

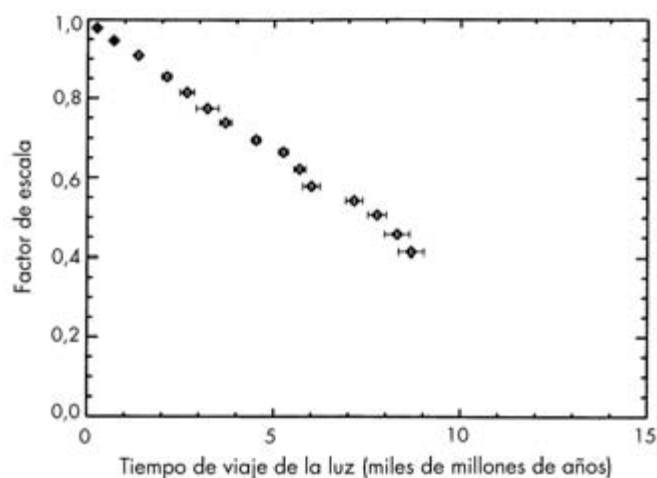


Figura 12.1. El factor de escala del universo frente al tiempo. Esta gráfica muestra estimaciones del factor de escala en diferentes momentos en el pasado deducidas a partir de datos de supernovas de Adam G. Riess *et al.*, «Type Ia Supernova discoveries at $z > 1$ » en *Astrophysical Journal* 607 (2004) 665-687 (disponibles en <http://www.arxiv.org/abs/astro-ph/0402512>), y Adam G. Riess *et al.*, «New Hubble Space Telescope Discoveries of Type Ia Supernovae at $z > 1$ » online en www.arxiv.org/abs/astro-ph/0611572. Esta gráfica contiene esencialmente los mismos datos que los del capítulo anterior, pero aquí se han promediado, por claridad, datos procedentes de múltiples galaxias. Nótese que en esta gráfica se supone que el universo tiene una geometría espacial euclidiana.

factor de escala, la distancia media entre galaxias crece, de modo que la densidad de energía debe disminuir continuamente con el tiempo. De hecho, cuando el factor de escala se duplica, la distancia media entre galaxias se multiplica por dos en todas las direcciones, y la densidad de energía de la materia se divide por ocho. Por consiguiente, la densidad de energía de la materia decrece muy rápidamente cuando crece el factor de escala. Si el universo sólo contuviera materia, esta rápida reducción en la densidad de energía atenuaría fuertemente el ritmo de expansión. La expansión del universo se frenaría entonces a medida que aumenta el factor de escala.

Los cosmólogos pueden utilizar las ecuaciones que ofrece la relatividad general para calcular exactamente cómo debería haber cam-

biado el factor de escala con el tiempo si el universo contuviera sólo materia ordinaria tal como átomos. La Figura 12.2 muestra esta predicción teórica como una línea junto a las observaciones de la Figura 12.1. Nótese que esta curva teórica tiene una pendiente más pronunciada cuando el factor de escala es menor, lo que indica que el ritmo de expansión era más rápido en esa época. Esto ilustra cómo se frenaría el ritmo de expansión a medida que se expande el universo si el universo contuviera sólo materia. Los datos observados difieren de la tendencia predicha, lo que implica que en nuestro universo hay algo más que materia ordinaria.

Para los astrónomos esto supuso una pequeña conmoción, aunque no una sorpresa total. Después de todo, ya habían encontrado pruebas de que había alguna sustancia en las galaxias y los cúmulos de galaxias además de átomos ordinarios. Durante décadas los científicos han observado estos sistemas distantes, donde estrellas y grupos de estrellas orbitan alrededor de un punto central igual que los planetas en nuestro sistema solar orbitan alrededor del Sol. Midiendo con qué rapidez se mueven las estrellas, los astrónomos podían estimar cuánta masa hay en el sistema galáctico. Estos cálculos mostraban rutinaria-

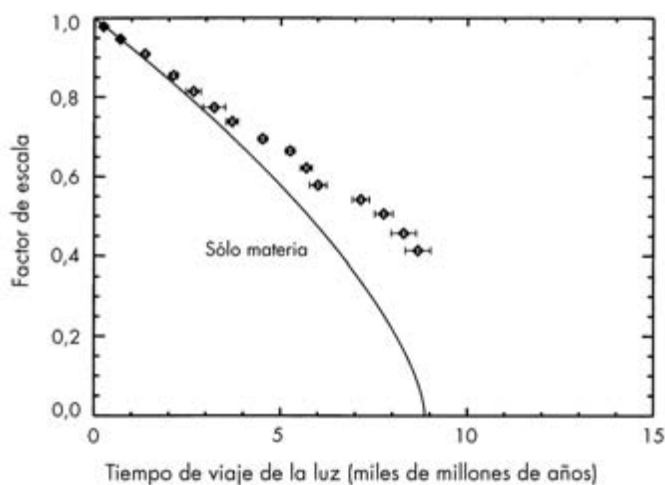


FIGURA 12.2. Historia de la expansión observada del universo comparada con predicciones que suponen que el universo sólo contenía materia (suponiendo geometría espacial euclidiana).

268 *Orígenes*

mente que la masa de una galaxia típica es entre una y diez veces mayor que la masa total de todas las estrellas, polvo y gas visibles. Algunos astrónomos creen que esto se debe a alguna característica de las interacciones gravitatorias a grandes escalas que no es parte de las teorías estándar de la gravedad. La mayoría, no obstante, piensan que estos sistemas galácticos deben contener también otras cosas además del material ordinario que podemos ver. Ese otro material no emite luz, por lo que se le ha llamado «materia oscura», pero nadie ha determinado todavía qué es exactamente. Una posibilidad es que la materia oscura esté compuesta de partículas subatómicas exóticas que no interactúan con la luz o los átomos de la misma manera que lo hacen protones, neutrones y electrones, lo que las hace casi invisibles. Actualmente varios laboratorios están tratando de detectar directamente tales partículas. Mientras, las observaciones astronómicas siguen encontrando pruebas experimentales en apoyo de la existencia de materia oscura por todo el universo.

Sin embargo, por misteriosa que sea la materia oscura, los datos de supernovas revelan algo aún más extraño. Esto se debe a que la materia oscura —cualquier cosa que sea— debe haberse diluido a medida que el universo se expande, igual que sucede con los átomos ordinarios. Si está compuesta de partículas masivas, entonces la densidad de energía es proporcional al número de partículas, y a medida que el universo se expanda, la densidad de energía en la materia oscura decrecerá tan rápidamente como la densidad de energía en la materia formada por átomos convencionales. Incluso si la materia oscura es algo más exótica, debe estar concentrada en las galaxias; de lo contrario no se podría explicar la dinámica del gas y las estrellas que se observa en ellas. A medida que estas galaxias son separadas por la expansión universal, la densidad de energía de la materia oscura debe diluirse igual que la densidad de energía en estrellas y gas. Por consiguiente, la predicción teórica para un universo lleno de materia oscura es esencialmente la misma que la predicción anterior para un universo lleno de átomos ordinarios, y eso no encaja con los datos observados.*

* De hecho, a veces los cosmólogos juntan materia oscura y átomos bajo el nombre general de «materia».

Los datos de supernovas sugieren que debe haber alguna otra forma de energía, una que no se diluya tan rápidamente cuando el universo se expande. En la jerga cosmológica, esta energía debe tener una «ecuación de estado» diferente de la de la materia ordinaria o la materia oscura. Se ha especulado acerca de tales formas extrañas de energía desde los primeros días de la relatividad general. De hecho, el propio Einstein utilizó un término en sus ecuaciones denotado con la letra griega Λ (lambda) que podría interpretarse como uno de estos tipos exóticos de energía. Él utilizó este parámetro en sus cálculos porque todavía no se había establecido la relación entre los desplazamientos hacia el rojo y las distancias a las galaxias, y por lo tanto no sabía que el universo se estaba expandiendo. Incorporando Λ en sus ecuaciones, Einstein podía describir un universo estático —sin expansión ni contracción— que le parecía más plausible en esa época. Cuando conoció la prueba de que el universo se estaba expandiendo, Einstein se dio cuenta de que eran sus propias ideas preconcebidas las que le habían llevado a incorporar el término Λ en sus ecuaciones, y por eso lo llamó su «mayor patinazo».

Pero incluso los patinazos de Einstein tienen sus usos, porque aunque una forma de Λ podía congelar la expansión del universo, otros valores y formas de este parámetro tienen efectos más complicados e interesantes sobre el ritmo de expansión. Tales términos suelen interpretarse ahora como campos de energía que tienen diversas ecuaciones de estado. Con los años, sin embargo, los científicos han tenido sentimientos encontrados sobre estos campos hipotéticos. En algunos momentos parecían ofrecer ideas sobre observaciones confusas y aparentemente contradictorias; y en otros aparecían sólo para ser los factores de ajuste que maquillan un problema más profundo en la teoría o las observaciones. Los recientes datos de supernovas proporcionan la evidencia más fuerte a favor de estas singulares formas de energía, y por ello la gente ha estado proponiendo nombres para ellas, tales como «quintaesencia». Por desgracia, el nombre más popular actualmente para este material —y, en consecuencia, el que me siento obligado a utilizar aquí— es «energía oscura». Este nombre puede confundir mucho las cosas porque se parece demasiado a «materia oscura», incluso si materia oscura y energía oscura son sustancias muy diferen-

270 *Orígenes*

tes. La *materia* oscura, como ya se ha mencionado, está concentrada en galaxias y se diluye por la expansión universal como lo hace la materia ordinaria. La *energía* oscura, por el contrario, no se comporta de esta manera.

Una forma elemental de energía oscura es la energía de vacío —también conocida como una constante cosmológica—, una energía asociada con el propio espacio. Si hay energía de vacío, entonces hay una energía por unidad de volumen de espacio incluso si no hay nada en él. Puesto que la cantidad de energía almacenada en un volumen no está relacionada con el número de partículas en dicho volumen, la densidad de esta energía es independiente del factor de escala. Por consiguiente, si la mayor parte de la energía en el universo está en la forma de energía de vacío, el ritmo de expansión no disminuirá cuando aumenta el factor de escala. De hecho, puesto que la densidad de energía en la energía de vacío es constante en el tiempo, la razón entre el ritmo de expansión y el factor de escala sería constante y el ritmo de expansión se haría más rápido cuando aumentara el factor de escala.* Los cosmólogos han postulado otras formas de energía oscura además de la energía de vacío, y para éstas la densidad de energía no permanece exactamente constante cuando cambia el factor de escala. Sin embargo, por simplicidad supondremos aquí que la energía oscura se comporta como la energía de vacío, que sigue siendo una opción viable. Si toda la energía del universo estuviera en forma de energía oscura, podríamos calcular cómo debería evolucionar el factor de escala con el tiempo y añadir esta curva a la gráfica (Figura 12.3). En este

* En este momento quizá se esté usted preguntando: si la energía es una cantidad conservada, ¿de dónde procede la energía oscura adicional cuando el universo se expande? Ésta es una pregunta razonable, pero la respuesta no es nada sencilla. En relatividad general, tiempo y espacio son magnitudes dinámicas, lo que complica cualquier esfuerzo por establecer si una magnitud dada se conserva realmente o no. De hecho, se requiere una buena mezcla de matemáticas —que debo admitir que no he estudiado por completo— para describir cómo puede moverse la energía a través del universo. Aún no he dado con una manera intuitiva y convincente de presentar los resultados de estos cálculos, de modo que a aquellos lectores entusiasmados con este tema, todo lo que puedo hacer es remitirles a los libros de texto de relatividad general listados al final de este capítulo; a los demás, debo pedir disculpas.

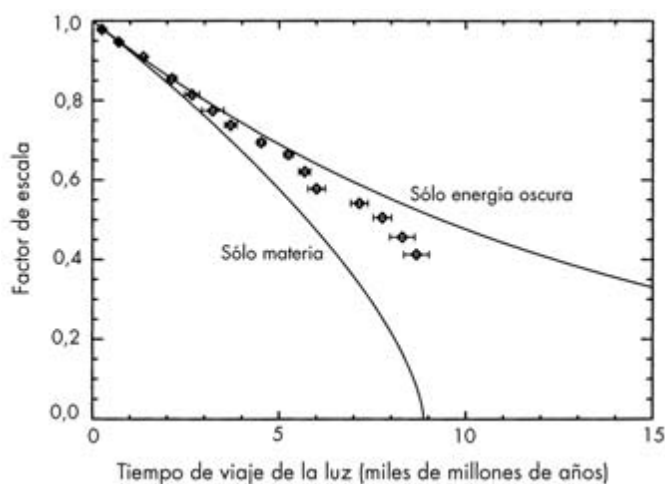


FIGURA 12.3. Historia de la expansión observada del universo comparada con predicciones que suponen que el universo contenía sólo materia o sólo energía oscura (suponiendo geometría espacial euclidiana).

caso, la pendiente de la curva se hace cada vez más pronunciada conforme aumenta el factor de escala, lo que significa que la expansión se acelera con el tiempo conforme el universo se expande. Aunque los puntos caen más cerca de esta curva que de la formulación «todo materia», el ajuste sigue sin ser bueno. Nótese que los puntos caen entre las dos curvas, lo que sugiere que el universo contiene una mezcla de energía oscura y materia. Puesto que podemos observar galaxias y otros cuerpos celestes ahí fuera, es obvio que hay cuando menos alguna materia mezclada con la energía oscura. Por supuesto, los cosmólogos también pueden obtener predicciones para un universo lleno con varias combinaciones de materiales, aunque las matemáticas son algo más complicadas porque la densidad de energía de la materia disminuye cuando el universo se expande, mientras que la densidad de energía oscura permanece constante. Por consiguiente, las proporciones de la densidad de energía total en estas dos formas cambiarán con el tiempo. Aunque esto complica un poco los cálculos, sigue siendo posible crear curvas teóricas bien definidas para estas mezclas diferentes de materia y energía oscura, como se muestra en la Figura 12.4. Puesto que los datos siguen muy de cerca la curva con un 75 % de la densidad de energía

272 Orígenes

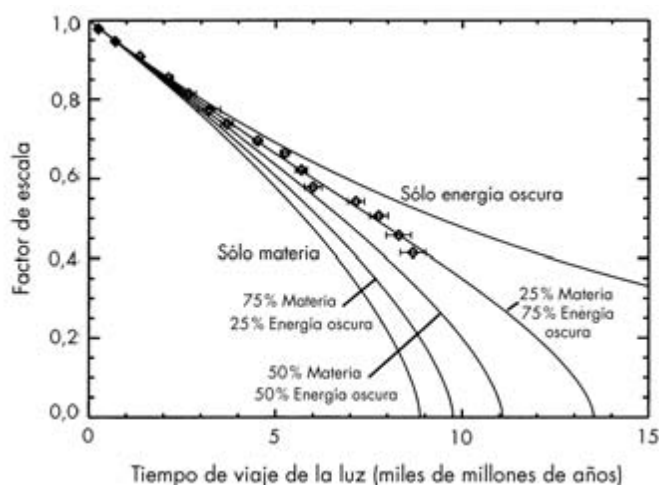


FIGURA 12.4. Historia de la expansión observada del universo comparada con predicciones que suponen que el universo contenía diversas mezclas de materia y energía oscura (suponiendo geometría espacial euclidiana). Las leyendas se refieren a las proporciones actuales de materia y energía oscura.

hoy en forma de energía oscura, podemos decir que el universo parece contener unas tres partes de energía oscura por cada parte de materia. Como vimos antes, estos datos por sí solos no pueden decirnos cuánto de la materia es materia oscura y cuánto son átomos ordinarios, pero otras observaciones sugieren que la razón de materia oscura a materia ordinaria es casi de cinco a uno. Los astrónomos aún no saben con seguridad por qué el universo contiene esta mezcla particular de materiales, y podríamos preguntarnos razonablemente si los datos de supernovas están contaminados de alguna manera, lo que proporcionaría una imagen equívoca de la historia de expansión del universo. Los cosmólogos son perfectamente conscientes de esta posibilidad, y por ello siempre tratan de utilizar observaciones independientes para poner a prueba y refinar esta receta para el universo.

Además de confirmar simplemente los hallazgos anteriores, diferentes observaciones cosmológicas también pueden dar información adicional sobre la historia y el contenido del universo, información que no puede obtenerse fácilmente sólo a partir de los datos de supernovas. Por ejemplo, las observaciones de supernovas por sí solas no

suponen fuertes restricciones a la cantidad total de energía contenida en una unidad de volumen del universo. En todas las gráficas anteriores se supone que la densidad de energía total hoy tiene cierto valor llamado densidad crítica (véase más abajo). Si en su lugar decidimos que la densidad de energía total del universo hoy es en realidad un 50 % mayor que ésta, la gráfica se parecería a la Figura 12.5. Las curvas teóricas son diferentes de las de la gráfica previa porque al cambiar la densidad de energía cambia el ritmo de expansión. Pero notemos que los puntos también se han desplazado un poco hacia la derecha en esta gráfica. Esto sucede porque la densidad de energía total en el universo afecta a la geometría del espacio, y un cambio en este parámetro puede alterar las distancias aparentes a dichas galaxias. Por ello, los cálculos que hicimos al final del último capítulo para convertir las distancias aparentes a las galaxias en tiempo de viaje de la luz son sensibles al contenido de energía total del universo.

En este caso los datos siguen favoreciendo el modelo con una razón 75:25 de energía oscura a materia. Por lo tanto, esta medida de las pro-

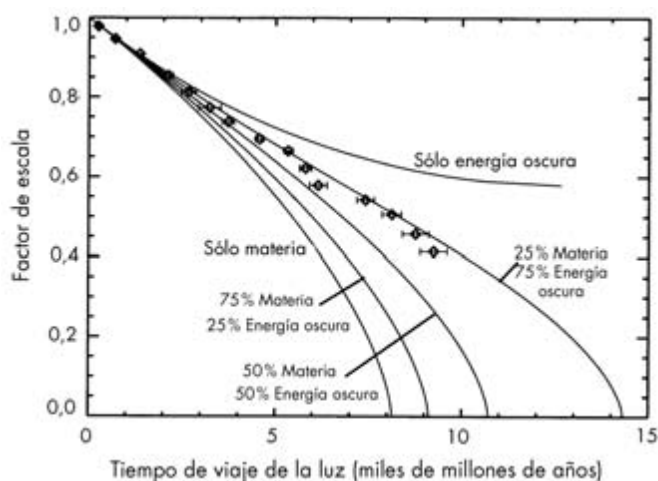


FIGURA 12.5. Historia de la expansión observada del universo comparada con predicciones que suponen que el universo contenía diversas mezclas de materia y energía oscura (suponiendo geometría espacial no-euclidiana compatible con una densidad de energía un 50 % mayor que la densidad crítica).

274 Orígenes

porciones de energía oscura y materia en el universo es (casi) independiente de la cantidad total de material en el universo. Sin embargo, puesto que hay una curva que ajusta bien los datos en ambas gráficas, estas observaciones no nos dicen mucho sobre la densidad de energía total del universo. Tampoco pueden decirnos cuánto tiempo hace exactamente que sucedió el *big bang*. Recordemos que el *big bang* corresponde a un momento en que el factor de escala era cero. En la gráfica anterior —que supone que la densidad de energía del universo es igual a la densidad crítica— esto habría sucedido hace menos de 14.000 millones de años. En la gráfica posterior —que representa un universo con una densidad de energía más alta— este suceso habría sucedido hace más de 14.000 millones de años.

Una explicación fiable de la composición, la historia y la edad del universo requiere claramente más información que la que pueden proporcionar las medidas de supernovas por sí solas. Por fortuna, nuevas observaciones del fondo cósmico de microondas (o CMB, por Cosmic Microwave Background) han dado recientemente medidas precisas tanto de la densidad de energía total del cosmos como del tiempo del *big bang*.

Sección 12.2: El fondo cósmico de microondas

Las características más importantes del fondo cósmico de microondas están recogidas en su nombre. En primer lugar, la palabra *microondas* especifica que el CMB es una forma de radiación electromagnética. En otras palabras, está en la misma categoría que los rayos X, las radioondas y la luz visible, ultravioleta e infrarroja. Todos estos fenómenos pueden tratarse como ondas electromagnéticas con diferentes longitudes de onda (véase Figura 12.6). Los rayos X tienen las longitudes de onda más cortas (alrededor de una milmillonésima de metro), y las radioondas tienen las más largas (de metros a kilómetros). Las microondas caen hacia el extremo largo de este intervalo, con longitudes de onda que van desde aproximadamente 1 milímetro hasta 10 centímetros. Ésta es una longitud mayor que la de la luz infrarroja, pero más corta que la de las radioondas que transmiten las emisiones típicas de radio y televisión.

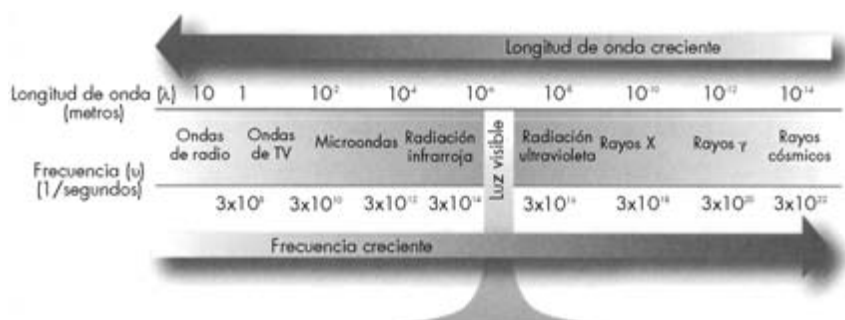


FIGURA 12.6. El espectro de la radiación electromagnética.

Los telescopios que pueden detectar radiación de microondas observan una señal procedente de cualquier punto del cielo en el espacio exterior.* Este *fondo* de radiación de microondas es (casi) constante en todo el cielo, y parece llenar todo el espacio. Su espectro característico (Figura 12.7) tiene un máximo ancho que recuerda al de la emisión térmica de las estrellas. De hecho, la forma de este espectro corresponde casi perfectamente al espectro teórico de la radiación térmica de un cuerpo negro, un objeto que absorbe toda la luz que incide sobre él. El espectro de la luz emitida por tal objeto puede calcularse exactamente sin conocer nada específico sobre su composición. Todo lo que necesitamos conocer es la temperatura del cuerpo negro: cuanto más baja es la temperatura, más larga es la longitud de onda del máximo en el espectro. Para este espectro del fondo de microondas, el máximo aparece a longitudes de onda en torno a 1 milímetro, que es miles de veces más larga que las longitudes de onda típicas de los máximos en los espectros estelares (véase el capítulo 10). Por consiguiente, la temperatura aparente del CMB es muchísimo más baja que las temperaturas de superficie de las estrellas, y de hecho es de sólo unos pocos grados por encima del cero absoluto. Es muy poco habitual que un espectro perfecto de cuerpo negro como éste tenga una temperatura efectiva tan baja. Por definición, para que un objeto pro-

* Esta señal también se manifiesta en los televisores domésticos conectados a una antena, como una pequeña fracción de la nieve que usted ve en los canales no sintonizados con emisoras activas.

276 Orígenes

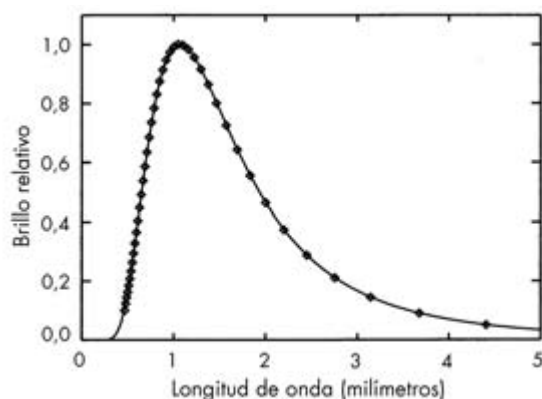


FIGURA 12.7. El espectro del fondo cósmico de microondas. Los puntos muestran el brillo observado del CMB a diferentes longitudes de onda. La curva es el espectro teórico de la radiación térmica de un cuerpo negro a 2,7 Kelvin. Las diferencias entre los datos observados y la curva teórica son casi imposibles de ver en esta escala. (Datos de D. Fixsen *et al.*, «The Cosmic Microwave Background Spectrum for the Full COBE FIRAS Data Set» en *Astrophysical Journal* 473 [1996]: 573-586.)

duzca radiación de cuerpo negro, ésta debe haber sido producida por material que interaccione *fuertemente* con un amplio abanico de radiación electromagnética. Tales materiales sí existen en la Naturaleza. Por ejemplo, los plasmas, que están hechos de partículas subatómicas libres como electrones y protones con cargas eléctricas netas, se acoplan fuertemente con las ondas electromagnéticas y generan radiación térmica cuyo espectro se aproxima mucho al de un cuerpo negro. Sin embargo, los plasmas existen sólo a temperaturas muy altas. A bajas temperaturas las partículas cargadas libres se encuentran normalmente ligadas a átomos, que no tienen carga eléctrica neta y sólo absorben o emiten luz a ciertas longitudes de ondas especiales, lo que da lugar a líneas como las que se suelen ver en los espectros galácticos (véase el capítulo anterior). Esto significa que la radiación de cuerpo negro sólo puede generarse habitualmente en material que está muy caliente. Los metales y otros sólidos pueden producir radiación de tipo cuerpo negro a temperaturas más bajas, pero es prácticamente seguro que el polvo y el gas hidrógeno en el universo no generarían un espectro de

cuerpo negro tan perfecto a una temperatura de unos grados por encima del cero absoluto.

La clave para resolver esta paradoja está en recordar que vivimos en un universo en expansión. A medida que el universo se expande, la distancia entre los fotones aumenta, de modo que la radiación se dispersa sobre un volumen cada vez mayor. Al mismo tiempo, la longitud de onda de cada fotón individual se hace más larga (de nuevo, véase el capítulo anterior). Ambos efectos hacen que el espectro del CMB cambie a medida que el universo se expande. Aplicando las matemáticas encontramos que la radiación con un espectro de cuerpo negro en un instante conserva su forma característica durante la expansión, pero su temperatura aparente decrece continuamente. Si el factor de escala del universo se duplica, la temperatura aparente del CMB se divide por dos. Como resultado, la temperatura del CMB debería haber sido más alta en el pasado, cuando el factor de escala era menor.* En el pasado muy lejano, la temperatura efectiva del CMB habría sido incluso comparable a la temperatura de un plasma.

Por consiguiente, el fondo *cósmico* de microondas parece ser una reliquia de la fase caliente y densa del universo primitivo. Inmediatamente después del *big bang*, el universo era extremadamente caliente y estaba lleno con un plasma consistente en electrones libres y núcleos, además de radiación de alta energía como rayos X y luz ultravioleta. Si un electrón y un núcleo se combinaran para formar un átomo de hidrógeno neutro, rápidamente llegaría un fotón de alta energía y rompería de nuevo el átomo en sus partes componentes. A medida que el universo se expandía, se enfrió: estos fotones perturbadores estaban cada vez más dispersos y sus longitudes de onda se hicieron cada vez mayores. Unos 400.000 años después del *big bang* no quedaba suficiente radiación ultravioleta para mantener el universo en un estado ionizado. En este momento, electrones y núcleos eran capaces de combinarse en átomos neutros y el universo llegó a llenarse de gas hidrógeno transparente. Los cosmólogos se refieren a este momento en la historia del universo como el desacoplamiento,

* Tales cambios en la temperatura del CMB pueden observarse realmente al estudiar la radiación de microondas en la vecindad de cúmulos de galaxias distantes.

278 *Orígenes*

puesto que en este momento los fotones dejaron de interaccionar fuertemente con la materia en el universo. En su lugar, estos trozos de luz empezaron a viajar en líneas aproximadamente «rectas» (donde la definición de «recta» depende, por supuesto, de la geometría del universo a gran escala). Hasta hoy, esta radiación ha estado viajando de esta manera durante miles de millones de años. Mientras, los fotones se han desplazado hacia el rojo en un factor de mil, pasando por las longitudes de onda visibles e infrarrojas hasta llegar al rango de las microondas.

Puesto que estos fotones del CMB han viajado en líneas prácticamente rectas desde la era del desacoplamiento hasta hoy, la radiación que nos llega de direcciones diferentes en el cielo procede de regiones diferentes del universo primitivo. Cualquier variación de las características del CMB de un punto a otro del cielo corresponde así a variaciones en la estructura del universo primitivo. Esto significa que el CMB nos proporciona una imagen de cómo era el universo cuando tenía una edad menor del 1 % de la actual.

Un pequeño pero dedicado grupo de astrónomos ha estado buscando estas variaciones elusivas (o anisotropías) desde que el CMB fue descubierto inicialmente hace más de cuarenta años. Sin embargo, sólo después del lanzamiento del satélite Cosmic Background Explorer en 1992 se detectaron claramente pequeñas variaciones en el brillo. Desde entonces, varios experimentos en tierra y en globos han mejorado estas medidas. Más recientemente, en 2003 y 2006, los datos de la nave espacial Willkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) proporcionaron medidas extraordinariamente precisas de las variaciones de brillo del CMB. Se ha tardado tiempo en obtener estas medidas porque las variaciones son extremadamente pequeñas —sólo una parte por 10.000— y sólo pueden ser detectadas por instrumentos criogénicos especializados.

La paciencia y dedicación requeridas para hacer estas medidas ha sido ampliamente recompensada con la riqueza de información que ha proporcionado sobre la estructura del universo primitivo. Las regiones donde el CMB parece ligeramente más brillante que la media corresponden a regiones del universo que estaban un poco más calientes que la media, mientras que las áreas donde el CMB es un poco más

oscuro corresponden a regiones que eran más frías que la media. Estas variaciones sutiles en temperatura reflejan fluctuaciones en la densidad del universo primitivo. Los gases y los plasmas se calientan cuando son comprimidos y se enfrían cuando se expanden, de modo que las regiones más brillantes del CMB corresponden también a regiones más densas del universo primitivo. Con el tiempo, parte del material en estas regiones colapsó para formar galaxias, cúmulos y otros objetos como los que vemos hoy en el universo. Estas fluctuaciones de brillo proporcionan así un atisbo de la estructura a gran escala del universo cuando éste estaba en su infancia.

Además de proporcionar información sobre los orígenes de la estructura en nuestro universo, las fluctuaciones en el CMB pueden proporcionar también ideas interesantes sobre la composición global, la geometría y la edad del universo. El CMB es una vena muy rica en información cosmológica porque la dinámica del universo primitivo es mucho más simple que la de las galaxias o cúmulos de galaxias. Estos objetos más recientes presentan un amplio abanico de densidades, desde espacio prácticamente vacío a aglomeraciones de estrellas y gas y materia oscura. Cuando éste es el caso, las regiones más densas tienen un efecto desproporcionado en sus entornos y dan lugar a estructuras astrofísicas complejas como nudos, filamentos y láminas. La física involucrada en la formación de tales sistemas es tan compleja que con frecuencia se necesitan grandes simulaciones por computador para desentrañar lo que está sucediendo. Por el contrario, las variaciones en la temperatura y la densidad del universo primitivo eran extremadamente pequeñas. Esto significa que una vez que los científicos han conseguido la difícil tarea de detectarlas, las ecuaciones relevantes necesarias para describir las variaciones pueden aproximarse bien por expresiones muy simples. Por ello, los cosmólogos pueden comparar las observaciones con las predicciones teóricas de un modo relativamente directo sin basarse demasiado en complejas simulaciones por computador. Además, puesto que las variaciones son tan pequeñas, las condiciones en cualquier región no ejercerán un efecto desproporcionado sobre las regiones próximas, de modo que no aparecen estructuras complejas. Esto está confirmado por la imagen WMAP del cielo de microondas que se muestra en la Figura 12.8,

280 *Orígenes*

donde no hay ningún rastro apreciable de arcos, regueros, ni ninguna otra de tales pautas coordinadas. Más bien, no vemos otra cosa que una distribución aleatoria de manchas brillantes y oscuras de tamaños diversos.

Si echamos una mirada más detenida a esta imagen podemos ver que parece haber una escala característica para estas manchas brillantes y oscuras. En particular, las manchas más prominentes y abundantes parecen cubrir alrededor de medio grado. Si las fluctuaciones del CMB fueran visibles a simple vista, tales manchas parecerían tener aproximadamente el mismo tamaño que el Sol o la Luna llena. Por supuesto, el simple hecho de que el Sol, la Luna y las manchas en el CMB parezcan tener el mismo tamaño para nosotros aquí en la Tierra no implica necesariamente que todas estén realmente a la misma distancia. El Sol es cuatrocientas veces mayor que la Luna, y si parece tener el mismo tamaño para nosotros es sólo porque está cuatrocientas veces más lejos. Por la misma razón, puesto que la luz procedente del Sol tarda apenas un poco más de ocho minutos en llegarnos, mientras que los fotones que constituyen el CMB han estado viajando por el espacio durante miles de millones de años, las fluctuaciones en el CMB deben corresponder a estructuras muy distantes y muy grandes en el universo primitivo. Si conociéramos con precisión la edad y la composición del universo, podríamos calcular el tamaño real de estos accidentes basándonos en cuánto han viajado los fotones del CMB y cuánto se ha expandido el universo mientras los fotones estaban en tránsito. Recíprocamente, si conociéramos el tamaño real de las estructuras en el CMB, podríamos inferir algo sobre la edad y composición del universo.

Por sorprendente que pueda parecer, los cosmólogos son capaces de estimar el tamaño de estas regiones calientes y frías. Pueden hacerlo porque las pautas en las anisotropías del CMB contienen claves sobre los procesos responsables de las variaciones de densidad en el universo primitivo. Estas pautas no son siempre tan obvias en las imágenes del CMB, pero se hacen evidentes cuando los datos se procesan para obtener el denominado espectro de potencias (Figura 12.9). A diferencia de un espectro normal, que muestra la cantidad de luz que emite un objeto a diferentes longitudes de onda, este espectro de po-

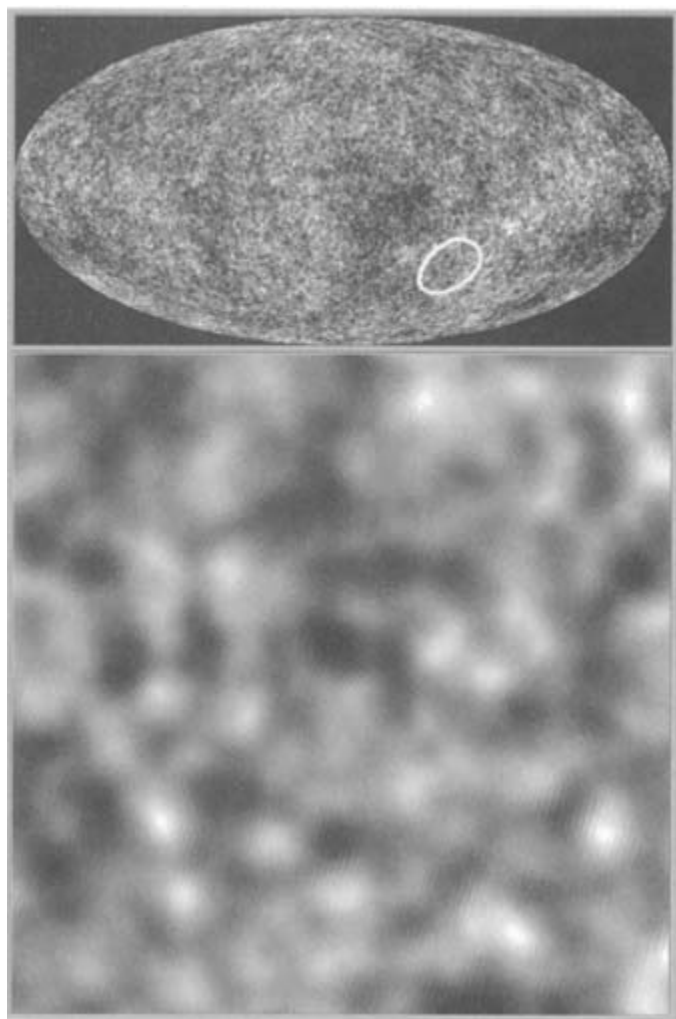


FIGURA 12.8. Variaciones en el brillo de CMB medidas por el satélite WMAP (éstos son los datos procesados por Max Tegmark, disponibles en <http://space.mit.edu/home/tegmark/wmap.html>, mostrados utilizando el software de visión de mapas disponible en http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/m_sw.cfm). Los diversos tonos de gris indican variaciones en el brillo, siendo las regiones con más brillo 400 microkelvins (aproximadamente una parte por 10.000) más brillantes que las regiones más oscuras. La imagen superior muestra el cielo entero (la Vía Láctea aparecería como una banda horizontal que cruza el centro de la imagen), mientras que la imagen inferior muestra una ampliación de la región rodeada con un círculo (10° de tamaño). Nótese que las manchas brillantes y oscuras tienen un tamaño característico, que es de aproximadamente medio grado en el cielo.

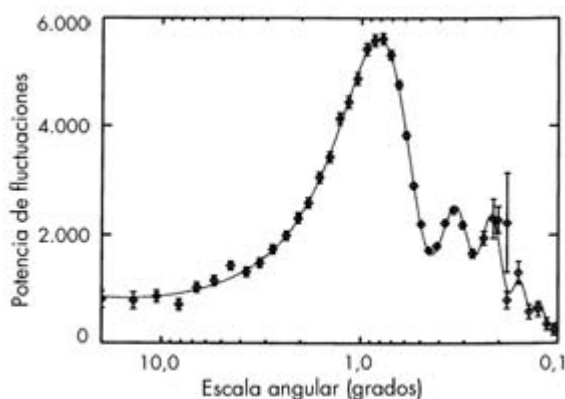
282 *Orígenes*

FIGURA 12.9. Espectro de potencias de las variaciones de brillo en el CMB. La magnitud de las variaciones de brillo en las diferentes escalas angulares medidas por WMAP (puntos negros) y un experimento en tierra (ACBAR, puntos grises). Nótese que las escalas angulares más pequeñas están a la derecha. Cuando pasamos a escalas angulares cada vez menores, la magnitud de las variaciones de brillo crece y decrece regularmente; esto es una firma del flujo y reflujo del plasma en el universo primitivo. Imagen derivada de datos proporcionados por el WMAP Science Team, disponibles en <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current>; la escala vertical está en unidades de microkelvins al cuadrado.

tencias indica cuánto varía el brillo en diferentes escalas angulares en el cielo. El máximo más alto de esta curva aparece a escalas angulares de aproximadamente un grado, lo que simplemente refleja el hecho de que las manchas brillantes y oscuras más prominentes y comunes tienen aproximadamente medio grado de diámetro.* Sin embargo, la curva también contiene otros varios máximos a escalas angulares cada vez menores. Esto refleja un exceso de manchas brillantes y oscuras en el CMB con diámetros de un cuarto de grado, un sexto de grado, y así sucesivamente.

Actualmente sólo hay una posible explicación para la pauta regular de los máximos observados en el espectro de potencias del CMB: oscilaciones acústicas en el plasma que llenaba el universo primitivo.

* La diferencia en un factor dos entre la posición del máximo en el extremo de potencias y el tamaño típico de las manchas aparece porque un ciclo completo en brillo cubre una zona brillante y una zona oscura.

Imaginemos que tuviéramos una región ligeramente sobredensa (caliente) y una región ligeramente infradensa (fría) en el plasma primordial. El material tendería de forma natural a difundirse desde la región más densa a la menos densa. Al principio, esto reduce la diferencia en las densidades. Sin embargo, una vez que el material empieza a fluir, la inercia entra en juego y la región previamente infradensa acaba con más plasma que la región inicialmente sobredensa. El material empieza entonces a fluir de vuelta a la región de procedencia, lo que inaugura un ciclo en el que el plasma oscila de un lado a otro. Esta oscilación hace que las variaciones de temperatura del plasma aumenten y disminuyan repetidamente con el tiempo.

El tiempo que tarda el material en fluir de un lado a otro depende de la distancia entre las regiones superdensa e infradensa. Cuanto mayor es la distancia, más tiempo tarda en completar una oscilación. Esto significa que las variaciones en escalas diferentes corresponderán a puntos diferentes del mencionado ciclo durante la era del desacoplamiento. Supongamos hipotéticamente que el plasma apenas tiene tiempo suficiente antes del desacoplamiento para fluir desde una región superdensa y acumularse en una región previamente infradensa a 400.000 años luz de la primera. Esto significa que habrá una gran variación de densidad entre estos puntos, y una gran diferencia de temperaturas quedará impresa en el CMB. Del mismo modo, si los dos puntos estuvieran sólo a 200.000 años luz, entonces el material habría tenido tiempo de fluir desde la región superdensa y luego volver. De nuevo habría una variación de densidad significativa entre las regiones en el momento de desacoplamiento. Por el contrario, si las dos regiones estuvieran separadas por 300.000 años luz, el plasma aún estaría fluyendo entre las dos regiones, y las variaciones de densidad en el desacoplamiento estarían más amortiguadas.

Imaginemos ahora que hubiera un conjunto de regiones sobredensas e infradensas en el universo primitivo con una amplia variedad de separaciones. En el instante de desacoplamiento, sólo las regiones separadas por un conjunto específico de distancias regularmente espaciadas (tales como 400.000 años luz, 200.000 años luz, 133.333 años luz, etc.) mostrarían grandes variaciones de densidad. Entonces las variaciones en el CMB estarían ampliadas en un conjunto similarmen-

284 Orígenes

te regular de escalas angulares. Ésta es exactamente la pauta que vemos en la Figura 12.9, de modo que tenemos muy buenas razones para creer que este flujo y reflujo de plasma ocurrió realmente en el universo primitivo.

En este escenario, los distintos picos en el espectro de potencias del CMB corresponden a distancias en el universo primitivo para las que el plasma podría completar 0,5, 1, 1,5 y 2 ciclos de su viaje de ida y vuelta entre regiones sobredensas e infradensas. Estas distancias están determinadas por dos factores: la rapidez con que pueden propagarse las variaciones de densidad en el plasma y el tiempo de que dispone el plasma para oscilar antes del desacoplamiento. Para plasmas a alta temperatura, que son ricos en fotones, variaciones en la densidad del plasma tales como éstas deberían propagarse a velocidades comparables a la velocidad de la luz.* Puesto que la velocidad de la luz es una constante de la naturaleza bien medida, somos capaces de calcular con un alto grado de precisión con qué rapidez podían cambiar estas perturbaciones de densidad. Esto significa que si podemos determinar cuánto tiempo transcurrió entre el *big bang* y el desacoplamiento, podemos determinar las distancias que corresponden a los máximos en el espectro de potencias del CMB.

Resulta bastante extraño que sea más fácil estimar la edad del universo en el desacoplamiento que estimar la edad del universo hoy. Esta última es un asunto complicado porque necesitamos tener un conocimiento bastante completo de cuánta materia y cuánta energía oscura hay en el universo. Sin embargo, durante el tiempo anterior al desacoplamiento las concentraciones exactas de materia oscura y de energía oscura debieron ser mucho menos relevantes. Recordemos que la densidad de energía en la energía oscura no cambia cuando el universo se expande, mientras que la densidad de energía en la materia decrece. En el pasado lejano, cuando el factor de escala era mucho menor y las partículas estaban mucho más concentradas, la densidad de energía en la materia habría sido mucho mayor que hoy, y entonces la energía oscura sería una fracción mucho más pequeña de la energía

* Más exactamente, se mueven a aproximadamente un 60 % de la velocidad de la luz.

total en el universo. Por lo tanto, la energía oscura tuvo probablemente un efecto despreciable en el ritmo de expansión en esa época. Del mismo modo, la densidad de energía en la luz se diluía aún más rápidamente que la densidad de energía en la materia —la longitud de onda de los fotones aumenta al mismo tiempo que disminuye la densidad de fotones— de modo que en tiempos suficientemente primitivos la densidad de energía en la radiación era mucho más alta que en cualquier otra cosa. El caso es que durante la mayor parte del tiempo anterior al desacoplamiento la densidad de energía en la radiación era dominante, y puesto que la intensidad del CMB nos dice con precisión cuántos fotones hay hoy en el universo, no hay mucha incertidumbre en la edad del universo en el desacoplamiento.* Haciendo los cálculos, los cosmólogos encuentran que el desacoplamiento ocurrió unos 400.000 años después del *big bang*. Combinando esta información con el hecho de que las variaciones de densidad se mueven a velocidades comparables a la velocidad de la luz, encontramos que las manchas de medio grado de anchura que vemos hoy en el CMB eran de 400.000 años luz en el momento del desacoplamiento.

En muchas situaciones, una vez que sabemos qué tamaño tiene algo y qué tamaño parece tener visto desde un punto de observación particular, podemos determinar a qué distancia está. Imaginemos las dos visuales dirigidas a los extremos opuestos de un objeto que forman dos lados de un triángulo, como en la Figura 12.10, donde el rombo a la derecha representa al observador. La longitud de la base de este triángulo es el tamaño físico del objeto, y el ángulo entre los dos lados largos está determinado por el tamaño aparente del objeto. Con estos dos números y unas pocas reglas básicas de la geometría podemos calcular normalmente la altura del triángulo y la distancia entre el objeto y nosotros. Del mismo modo, podemos utilizar el tamaño aparente de las manchas de 400.000 años luz de diámetro en el universo primitivo para determinar cuánto tiempo han estado viajando los fotones a tra-

* Por supuesto, el cálculo real no puede despreciar por completo la cantidad de materia oscura y ordinaria en el universo, ni la no despreciable contribución de los neutrinos, pero estas complicaciones no aumentan demasiado la incertidumbre en los cálculos.

286 *Orígenes*

FIGURA 12.10.

vés del universo. Sin embargo, el cálculo no es tan sencillo como cabría esperar al principio. No sólo el universo se ha expandido en un factor grande desde el desacoplamiento, sino que la geometría a gran escala del universo quizá no siga las familiares reglas euclidianas.

En el capítulo anterior vimos que la relatividad general interpreta la gravedad como una distorsión en la geometría del espacio y el tiempo que depende de la cantidad de materia y energía en la región. También vimos cómo este compromiso entre materia y energía puede explicar los datos que se muestran en un diagrama de Hubble. Sin embargo, la densidad de energía total en el universo no sólo altera las distancias entre galaxias sino que también determina un aspecto fundamental de la geometría del universo conocido como curvatura. Si la curvatura del universo es cero, se aplican los preceptos de la geometría euclidiana: las líneas paralelas nunca se cortan, los ángulos internos de un triángulo suman siempre 180 grados, etc. Por el contrario, si la curvatura no es nula se aplica un conjunto de reglas diferentes, reglas que tienen más en común con la geometría de superficies curvas. Si el universo tiene una curvatura positiva, entonces su geometría será como la de la superficie de una esfera o un globo. Aquí podemos formar fácilmente un triángulo utilizando dos meridianos y una línea en el ecuador de modo que los tres ángulos internos serían de 90 grados y su suma excedería de los 180 grados requeridos en la geometría euclidiana. A la inversa, si el universo tiene una curvatura negativa, tendrá propiedades similares a las superficies hiperbólicas, donde los ángulos internos de los triángulos suman menos de 180 grados.

La curvatura del universo depende de su densidad de energía total. Si la densidad de energía toma un valor especial llamado densidad crítica, la curvatura del universo será cero. Si el universo tuviera exactamente curvatura cero en un instante, nunca debería desarrollar curva-

tura positiva o negativa. El universo tendría entonces geometría espacial euclidiana ahora y en cualquier momento del pasado.* Sin embargo, si la densidad de energía es mayor que la densidad crítica, la curvatura del universo es positiva; a la inversa, si la densidad de energía cae por debajo de la densidad crítica, la curvatura es negativa.

Puesto que la geometría espacial del universo determina la forma de las trayectorias que sigue la luz cuando viaja a través del universo, la curvatura afecta a los tamaños aparentes de los objetos vistos a distancia. Por ejemplo, abajo tenemos una ilustración de tres observadores que ven el mismo tamaño para un objeto en universos con geometrías diferentes:



FIGURA 12.11.

En la imagen central, la geometría tiene curvatura cero, y la luz viaja a lo largo de líneas realmente rectas para formar un triángulo euclidiano familiar. En los otros dos casos, la curvatura del universo significa que la luz debe seguir trayectorias algo curvadas. Supongamos que el ángulo entre los dos rayos en la posición del observador en el caso de curvatura cero es de 10 grados; entonces el objeto parecería tener 10 grados de diámetro. En el caso de curvatura negativa este ángulo es más pequeño, lo que hace que los objetos parezcan tener menos de 10 grados de diámetro. Finalmente, en el caso de curvatura positiva el ángulo es mayor, de modo que el objeto parecerá tener más de 10 grados de diámetro. Así, el mismo objeto parece más grande cuando la curvatura es positiva, y más pequeño cuando la curvatura es negativa.

Si movemos estos objetos de modo que parezcan tener 10 grados para los tres observadores, el efecto de la curvatura sobre las distan-

* Nótese que si la curvatura sigue siendo nula mientras el universo se expande, el valor de la densidad crítica cambia normalmente con el tiempo.

288 *Orígenes*

cias aparentes se hace obvio. Puesto que el objeto aparecía más grande que esto en el caso de curvatura positiva, ahora debe alejarse. Del mismo modo, puesto que el objeto parecía más pequeño que 10 grados en el caso de curvatura negativa, ahora debe acercarse al observador:

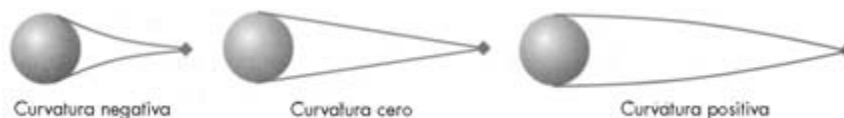


FIGURA 12.12.

Esto nos muestra que si los observadores suponen que la geometría sigue las reglas euclidianas, pueden confundir la distancia al objeto. Los objetos parecen estar más próximos de lo que realmente están si la curvatura es positiva, y más lejanos si la curvatura es negativa.

De modo análogo, si regiones brillantes que tenían 400.000 años luz de diámetro en el desacoplamiento parecen tener hoy medio grado de anchura angular en el CMB, la distancia recorrida por la luz entre el desacoplamiento y hoy depende de la curvatura del universo. Si la curvatura es positiva, entonces la luz tiene que recorrer una distancia más larga; si la curvatura es negativa, entonces la distancia es más corta. Por lo tanto, si conociéramos la distancia real que recorrió la luz, podríamos averiguar la curvatura del universo y a su vez inferir la densidad de energía total. Recíprocamente, si conociéramos la densidad de energía total y la curvatura del universo, podríamos calcular cuánto ha viajado la luz y entonces utilizar esta información para determinar la edad del universo. Aunque podría parecer que tendríamos que hacer algunas medidas adicionales antes de poder deducir algo sobre la edad o la geometría del universo, el CMB por sí solo proporciona datos suficientes para que los cosmólogos averigüen tanto la curvatura como la distancia que han recorrido los fotones. Esto se debe a que la densidad de energía total determina la geometría global del universo y cómo éste se expande entre el desacoplamiento y hoy.

A primera vista podría parecer que la expansión del universo añadiría otro nivel de complejidad a este problema, puesto que ahora tenemos que relacionar los ángulos medidos hoy con una distancia físi-

ca en el pasado lejano, cuando el factor de escala del universo era mucho menor. Sin embargo, estas cuestiones no son obstáculos importantes para este análisis particular porque el espectro del CMB nos dice exactamente cuánto se ha expandido el universo desde la era del desacoplamiento. Una vez más, la clave está en la relativa simplicidad del universo primitivo, pues permite a los cosmólogos calcular con fiabilidad el espectro de la luz liberada en el desacoplamiento del plasma. Recordemos que en este momento el universo estaba experimentando una transición de fase: el plasma primordial de partículas cargadas libres se estaba transformando en gas hidrógeno neutro. Esta transición ocurrió a temperaturas de algunos miles de grados Celsius y cuando la distancia media entre átomos de hidrógeno era de aproximadamente 1 milímetro. Condiciones similares pueden conseguirse en el laboratorio, de modo que la física de esta transición es bien conocida y el espectro de la radiación térmica liberada en el desacoplamiento puede calcularse con precisión. El caso es que esta luz tenía una longitud de onda típica de aproximadamente 1 micra, o milésima de milímetro, que es similar a la longitud de onda típica de la mayor parte de la luz de las estrellas (lo que no es demasiado sorprendente puesto que en ambos casos se trata de luz emitida desde las superficies de plasmas ricos en hidrógeno). Hoy, el máximo del espectro del CBM está en longitudes de onda de alrededor de 1 milímetro, o aproximadamente 1.000 micras, de modo que el universo debe haberse expandido en un factor de mil aproximadamente entre el desacoplamiento y hoy. Por consiguiente, podemos estar razonablemente seguros de que las regiones de 400.000 años luz de diámetro en el desacoplamiento estarán hoy un poco por encima de 400 millones de años luz, y en consecuencia hay poca incertidumbre en cómo deberían relacionarse las medidas angulares actuales con estas antiguas escalas de distancia.

De hecho, lejos de ser una molestia, la expansión del universo es una componente esencial del cálculo de la geometría y la edad del universo porque la forma en que el universo se expande determina cuánta distancia puede recorrer la luz después de producirse el desacoplamiento del plasma. Recordemos que la luz viaja a una velocidad finita bien definida de 300.000 kilómetros por segundo. Por consiguiente, la

290 Orígenes

luz sólo puede recorrer una distancia finita durante el tiempo transcurrido entre el desacoplamiento y hoy. Las ecuaciones de la relatividad general nos dicen que densidades de energía más altas corresponden a ritmos de expansión más rápidos, de modo que la densidad de energía total del universo afecta al tiempo que tarda el universo en expandirse en un factor mil, que a su vez limita la distancia que puede recorrer la luz durante este tiempo. Por supuesto, la relación exacta entre esta distancia y la densidad de energía total depende algo de la composición del universo; pero, con tal de que la razón de energía oscura a materia no sea demasiado grande, un universo con densidad de energía total más alta se expandirá más rápidamente en los instantes iniciales, y esta expansión más rápida reducirá a su vez la distancia que la luz puede recorrer durante el tiempo transcurrido entre el desacoplamiento y hoy. Ahora bien, una densidad de energía más alta también hace la curvatura del universo más positiva, lo que significa que en el desacoplamiento el plasma tendría que estar más alejado para que las manchas de 400.000 años luz de anchura en el CMB parezcan ser de medio grado. Por lo tanto, aumentar la densidad de energía tiende a *aumentar* la distancia que *deben* recorrer los fotones para ser compatibles con las observaciones, mientras que *disminuye* la distancia que la luz *puede* recorrer en el tiempo disponible. Del mismo modo, un valor más bajo de la densidad de energía aumentaría el alcance de los fotones del CMB mientras decrece la distancia que deben recorrer. Así pues, hay sólo un valor de la densidad de energía que dé como resultado que los fotones viajen la distancia requerida en la cantidad de tiempo permitida. Después de hacer todos los cálculos relevantes, los cosmólogos encuentran que (casi independientemente de lo que supongan sobre la composición del universo) la densidad de energía del universo debe estar próxima a la densidad crítica, lo que significa que la curvatura del universo tiene que ser prácticamente cero. Todavía no se entienden por completo todas las implicaciones de este descubrimiento, pero muchos cosmólogos piensan que esta falta de curvatura puede ser una clave importante acerca del estado del universo durante los instantes inmediatamente posteriores al *big bang*.

Dejando aparte estas especulaciones, el conocimiento de la curvatura del universo también nos lleva a una medida precisa de la edad

del universo. Puesto que la curvatura es cero, podemos utilizar las reglas estándar de la geometría euclidiana y —después de tener en cuenta la historia de la expansión real del universo— calcular cuánto ha viajado la luz desde el momento del desacoplamiento. Entonces, dada la velocidad de la luz, podemos estimar también cuánto tiempo ha estado viajando la luz, lo que nos dice cuánto tiempo ha transcurrido desde el desacoplamiento. Finalmente, podemos sumar la edad del universo en el desacoplamiento (una corrección trivial de 400.000 años) y obtenemos la edad del universo: 13.700 millones de años, con un margen por exceso o por defecto de unos pocos cientos de millones de años.*

Obviamente, esta cifra se basa en varias hipótesis sobre la naturaleza y la historia primitiva del universo. Los cosmólogos trabajan actualmente para poner a prueba estas hipótesis y refinar nuestra comprensión de la composición y la historia del universo. Hay en curso nuevas medidas de supernovas Tipo Ia y del CMB para confirmar la exactitud de los datos disponibles y reducir las incertidumbres en parámetros tales como la curvatura del universo y la mezcla de materia y energía. Mientras, otros conjuntos de datos cosmológicos están proporcionando maneras de verificar y complementar estos hallazgos. Por ejemplo, los datos de cúmulos globulares descritos en el capítulo 10 indican que las estrellas más viejas en el universo tienen unos 13.000 millones de años. Dadas las incertidumbres relativamente grandes en las medidas, estas estrellas antiguas no son demasiado viejas para un universo que se formó hace 13.700 millones de años, de modo que estos datos son consistentes con los resultados derivados del CMB. De hecho, el CMB y los datos de supernovas son actualmente compatibles con un amplio abanico de observaciones cosmológicas, incluidas las medidas de la masa total en cúmulos de galaxias y la mezcla de elementos e isótopos en el universo primitivo. Todos estos datos parecen apoyar la idea de que el universo contiene materia oscura y energía oscura, tiene curvatura cero y una edad de unos 13.700 millones de años.

* La pequeña incertidumbre en este número es en parte un efecto secundario de la falta de curvatura del universo, que hace la estimación de la edad poco sensible a incertidumbres residuales en la composición del universo, etc.

292 *Orígenes*

Conforme se vayan mejorando y revisando en los próximos años, estas medidas cosmológicas podrán corroborar y refinar nuestra comprensión actual de cómo opera el universo. Por ejemplo, podrían revelar si la energía oscura es realmente una energía asociada con el espacio vacío o algún otro tipo de campo de energía. Alternativamente, estos datos podrían revelar algún fenómeno imprevisto que altere profundamente nuestras ideas sobre el universo. Como sucede con todos los temas cubiertos en este libro —y muchas otras áreas de trabajo científico y erudito— lo que es más excitante en este campo es la promesa de avances mayores y descubrimientos inesperados en un futuro no demasiado lejano.

Sección 12.3: Lecturas adicionales

Como en los dos capítulos anteriores, un buen libro para obtener una visión general de la astronomía y la cosmología es R. A. Freedman y W. J. Kaufmann, *Universe*, 6.^a ed. (Freeman and Company, 2001). Algunos bonitos artículos (con referencias) sobre nuevos desarrollos en cosmología son W. L. Freedman y M. S. Turner, «Cosmology in the New Millenium» en *Sky and Telescope*, octubre 2003, y «Four Keys to Cosmology», en el número de febrero de 2004 de *Scientific American*.

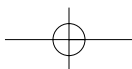
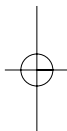
Para más detalles sobre el satélite WMAP, véase su página web, <http://map.gsfc.nasa.gov/>; véase también el archivo donde los datos están disponibles: <http://lambda.gsfc.nasa.gov/>. Para discusiones más técnicas de la naturaleza de la energía oscura y la materia oscura, recomiendo vivamente el archivo online de artículos de astrofísica en www.arxiv.org.

Los lectores interesados en aprender las complejidades de la relatividad general podrían examinar los libros de texto S. Carroll, *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity* (Addison-Wesley, 2003); J. Hartle, *Gravity: An Introduction to General Relativity* (Addison-Wesley, 2003); B. Schutz, *A First Course in General Relativity* (Cambridge University Press, 1994), y S. Dodelson, *Modern Cosmology* (Academic Press, 2003).

Parametrizando la edad del universo 293

Los lectores suficientemente masoquistas para querer entender cómo se utiliza la relatividad general para predecir el espectro de potencias del CMB deberían leer H. Kodamay y M. Sasaki, «Cosmological Perturbation Theory» en *Progress of Theoretical Physics Supplement* 78 (1981).

Los lectores que quieran una introducción más accesible a las anisotropías del CMB deberían ver las páginas web <http://background.uchicago.edu/~whu/beginners/introduction.html> y www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm y los enlaces que allí figuran.



GLOSARIO

Ácido Desoxirribonucleico (ADN): Una molécula que se encuentra en la mayoría de las células vivas, compuesta de dos cadenas espirales conectadas por un conjunto de pares de bases nucleótidas. La información codificada en la secuencia de pares de bases determina cómo actúa la célula.

Acondrita: Un meteorito que está compuesto básicamente de silicatos y carece de cóndrulas.

Afrotheria: Un grupo de mamíferos placentarios, que se encuentran principalmente en África, que incluye elefantes, hyraxes, manatíes, osos hormigueros, tenreos y topos dorados. Los análisis moleculares indican que todos estos animales pertenecen a una rama común del árbol de familia de los mamíferos.

Aluminio-26: Un isótopo inestable del aluminio con una semivida de 730.000 años. Se utiliza para estimar la secuencia de sucesos que ocurrieron en el primitivo Sistema Solar.

Aminoácido: Un tipo de molécula que es el ladrillo básico de las proteínas. Cada uno de los veinte tipos diferentes de aminoácidos tiene propiedades químicas diferentes que afectan a la forma y funcionalidad de la proteína.

Año luz: La distancia que puede viajar la luz en un año, equivalente a 9,5 billones de kilómetros.

Árbol filogenético (Dendrograma): Una gráfica que ilustra las relaciones entre diferentes organismos.

296 *Orígenes*

Ardipithecus ramidus: Un homínido fósil procedente de Etiopía que puede haber vivido hace más de cinco millones de años. Restos más completos de este animal podrían proporcionar información sobre cómo y cuándo nuestros ancestros se hicieron bípedos.

Australopithecus afarensis: Un homínido fósil que vivió hace unos 4,5 millones de años. Es el homínido más antiguo del que se tiene un esqueleto razonablemente completo (la famosa «Lucy»). Tenía un cerebro de un tamaño no mucho mayor que el de un chimpancé, pero ya era capaz de caminar erguido sobre dos patas.

B'alah Chan K'awiil: Un gobernante de la ciudad maya clásica de Dos Pilas, que estuvo fuertemente involucrado en las batallas entre Yuknoom Ch'een y Nuun Ujol Chaak.

Berilio-10: Un isótopo inestable, pero de larga vida, del berilio; producido, como el carbono-14, por rayos cósmicos. Los niveles de berilio-10 en testigos de hielo proporcionan información sobre la historia del flujo de rayos cósmicos y los campos magnéticos del Sol y la Tierra durante los últimos 20.000 años.

Big bang: Un suceso singular en la historia del universo, cuando la densidad media del material se aproxima a infinito. Las descripciones teóricas del universo dejan de ser válidas en este punto, de modo que no está claro lo que puede haber ocurrido en ese instante. Se considera que el *big bang* marca el comienzo del universo tal como lo conocemos.

Calakmul: Nombre moderno de un importante centro maya durante el período clásico. Fue originalmente conocida como Chan, o «serpiente». Yuknoom Ch'een fue uno de sus gobernantes más destacados.

Carbono-12: La forma más abundante y estable del elemento carbono, que contiene 6 protones y 6 neutrones.

Carbono-13: Un isótopo estable del carbono con 7 neutrones.

Carbono-14: Un isótopo inestable del elemento carbono, con 6 protones y 8 neutrones, y una semivida de 5.730 años. Se produce por interacciones entre rayos cósmicos y átomos de nitrógeno en la parte superior de la atmósfera.

Caverna da Pedra Pintada: Un emplazamiento arqueológico localizado en las tierras bajas tropicales del Brasil. Apparentemente la

gente que vivía aquí cazaba pequeños animales y comía nueces en la misma época en que la gente en América del Norte estaba cazando mamuts con puntas Clovis.

Cefeida: Una estrella luminosa cuyo brillo varía con una pauta característica en diente de sierra, con un período que va desde un día hasta semanas. El período está correlacionado con su luminosidad, lo que hace de las cefeidas unos útiles indicadores de distancia.

Cero absoluto: La temperatura más baja posible, cuando el movimiento térmico aleatorio de los átomos sería efectivamente cero.

Ciclo del carbono: El flujo de átomos de carbono entre la atmósfera, los organismos vivos, los océanos, etc.

Ciclo shotico: El ciclo de 1.460 años que resultaba del hecho de que los egipcios tenían un año estricto de 365 días sin días bisiestos, lo que significaba que cada cuatro años los sucesos astronómicos ocurrían un día antes. Por lo tanto, pasaban 1.460 años antes de que un suceso como el orto heliaco de Sirio volviera a ocurrir en día «adecuado». («Shotis» es la versión griega del nombre egipcio de Sirio.)

Ciclo solar: Un período de once años aproximadamente que se observa en la distribución y número de manchas solares. Todavía no se entiende por completo el origen de este fenómeno, pero parece estar correlacionado con cambios globales en el campo magnético del Sol.

«**Clovis-primero**»: Un modelo para el asentamiento de los primeros pobladores de las Américas, que postula que los fabricantes de puntas Clovis estaban entre las primeras gentes en llegar al Nuevo Mundo. Según esta hipótesis, estos primeros pobladores llegaron a la América sudcanadiense a través de un corredor libre de hielo que se abrió durante el final de la última Edad de Hielo. Los pobladores siguieron por este corredor a grandes animales, como mastodontes, y se difundieron rápidamente por América del Norte y del Sur. Conforme se reducían los suministros de animales grandes, los pobladores empezaron a asentarse y a utilizar con más intensidad los recursos locales. Esta idea ha sido desafiada por recientes descubrimientos arqueológicos.

CMB: Véase Fondo cósmico de microondas.

298 *Orígenes*

Color: En astronomía, la diferencia en la magnitud de una fuente medida a través de dos filtros diferentes.

Condrita: Un meteorito que está compuesto básicamente de silicatos y contiene cóndrulos. Probablemente las condritas son reliquias de una etapa muy primitiva en la formación del Sistema Solar.

Cóndrulos: Pequeñas esferas de roca, de aproximadamente 1 milímetro de diámetro, que se encuentran en la mayoría de los meteoritos rocosos.

Constante cosmológica: Véase Energía oscura.

Convergencia: En biología, un proceso por el que dos organismos que no están estrechamente relacionados llegan a adquirir rasgos similares. Normalmente esto sucede porque los ancestros de ambos animales estaban sometidos a similares presiones ambientales.

Cuenta Larga: La parte del calendario maya que registra el número de días que han transcurrido desde cierto suceso (probablemente mitológico) que ocurrió en agosto del 3114 a.C.

Cuerpo negro: Un objeto que absorbe toda la radiación que incide sobre él.

Cúmulo globular: Una colección aproximadamente esférica de hasta un millón de estrellas concentradas en una región con una densidad cientos de veces mayor que la que hay en la vecindad de nuestra galaxia. Las estrellas más viejas en estos objetos están entre las más viejas conocidas.

Curvatura: Un parámetro que mide cuánto se desvía la geometría del universo de las reglas euclidianas. Una curvatura positiva implica que los ángulos internos de los triángulos suman más de 180 grados, mientras que una curvatura negativa implica que suman menos de 180 grados.

Datación por carbono-14 (datación por radiocarbono): Un método de medir la edad de material orgánico. Primero, se mide la cantidad actual de carbono-14 en una muestra de material. Luego se infiere la cantidad original de carbono-14 en la muestra sobre la base de datos procedentes de anillos arbóreos y de otras fuentes. Finalmente, se calcula la edad del material a partir de la fracción del carbono-14 que se ha desintegrado y la semivida del carbono-14.

Datación isócrona: Un método de datación radiométrica que utiliza

la composición isotópica de varios componentes en un objeto para inferir la cantidad original de un isótopo radiactivo en el material y su edad. Se suele utilizar para datar rocas y meteoritos antiguos.

Datación potasio-argón: Un método de datar depósitos volcánicos midiendo sus contenidos de potasio y argón. Suponiendo que todo el argón-40 se debe a la desintegración de potasio-40, podemos determinar cuánto potasio-40 se ha desintegrado desde que la roca se solidificó. Entonces, utilizando la semivida del potasio-40 (1.280 millones de años) podemos estimar cuánto tiempo hace que se enfrió la lava.

Dendrocronología: El estudio de las pautas en los anillos de los árboles para determinar cuándo se produjeron los anillos. La anchura del anillo refleja las condiciones de crecimiento en un año concreto en la vida del árbol. Comparando las distintas pautas de grosores en los anillos de árboles que vivieron y murieron hace tiempo, es posible deducir en qué año exactamente se formó cada anillo, incluso milenios atrás. Estos datos proporcionan un registro detallado de las condiciones climáticas locales y el contenido de carbono-14 en la atmósfera.

Dendrograma: Véase Árbol filogenético.

Densidad crítica: En cosmología, la densidad que debe tener el universo para que tenga curvatura cero.

Deriva continental: El cambio en la posición de los continentes con el tiempo.

Desacoplamiento: El momento en la historia del universo en que la densidad de fotones de alta energía había disminuido lo suficiente para que electrones y núcleos pudieran combinarse y formar átomos de hidrógeno. En este momento la materia en el universo sufre una transición de fase desde un plasma a un gas de hidrógeno.

Desintegración alfa: Una forma de desintegración nuclear en la que el núcleo se divide en dos partes, una de las cuales consiste en 2 protones y 2 neutrones (un núcleo de helio).

Desintegración beta: Una forma de desintegración nuclear en la que un neutrón se transforma en un protón, emitiendo un electrón y un neutrino.

300 Orígenes

Desintegración gamma: Una forma de desintegración nuclear en la que el núcleo pierde energía emitiendo un fotón.

Desintegración nuclear: La transformación de un núcleo de un elemento o isótopo en otro. Las formas típicas se conocen como desintegración alfa, beta y gamma.

Desplazamientos Doppler: Cambios en la longitud de onda del sonido o de la luz debidos al movimiento relativo de la fuente respecto al observador.

Desplazamientos hacia el rojo: El desplazamiento hacia longitudes de onda más largas de la luz procedente de galaxias distantes. Entre los posibles mecanismos para producir desplazamientos hacia el rojo se incluyen la expansión del universo y los desplazamientos Doppler.

Diagrama color-magnitud (Diagrama de Hertzsprung-Russell): Una representación gráfica de la magnitud absoluta de las estrellas frente a su color.

Diagrama de Hubble: Una gráfica que muestra los desplazamientos hacia el rojo de las galaxias en función de la distancia.

Dinastías (egipcias): Las treinta y una fases en las que se divide convencionalmente la historia del Egipto Antiguo. Cada dinastía corresponde a los reinados de un cierto grupo de faraones, basados en última instancia en el listado del sacerdote egipcio Manetón. Sin embargo, no está todavía claro por qué ciertos grupos de gobernantes eran considerados miembros de una misma dinastía.

Distancia de coordenadas: En un universo en expansión, la distancia entre dos objetos en un momento concreto en el tiempo, normalmente el presente.

Distancia de luminosidad: Una distancia a un objeto astronómico que se calcula sobre la base de la luminosidad del objeto y su brillo observado.

$E = mc^2$: Famosa ecuación de Einstein que dice que hay una energía asociada con cualquier masa.

Ecuación de estado: En cosmología, el parámetro que describe cómo cambia la densidad de energía de un material conforme el universo se expande.

Edad de Hielo: Un período en el que el clima era mucho más frío que ahora. La última Edad de Hielo terminó hace unos 15.000 años.

Electrón: Una partícula subatómica con carga negativa. Los electrones son mucho menos masivos que los protones o los neutrones y no están confinados en el núcleo. En su lugar forman una nube difusa que interacciona con nubes electrónicas similares que rodean a otros átomos. Por consiguiente, los electrones desempeñan un papel dominante en la mayoría de las reacciones químicas entre átomos. El número y la configuración de los electrones en un átomo están determinados por el número de protones en el núcleo.

Elemento: Un tipo de átomo con un número dado de protones en su núcleo. Todos los átomos de un elemento dado tienen básicamente las mismas propiedades químicas.

Enana blanca: Un remanente estelar producido cuando se agota el combustible nuclear en una estrella de poca masa de la secuencia principal.

Energía: Una magnitud que nunca puede ser creada ni destruida, pero puede transformarse en diversas formas. Una forma de energía es llevada por objetos en movimiento, donde la velocidad (y la masa) del objeto determina cuánta energía de este tipo tiene. Por lo tanto, cambiar la velocidad de una partícula requiere convertir algo de esta energía en otra forma, o viceversa, de modo que cualquier forma de energía puede considerarse como el potencial para producir movimiento.

Energía oscura (Quintaesencia, Lambda, constante cosmológica): Una forma de energía que no se diluye, como lo hace la materia, a medida que el universo se expande. Se requiere para explicar los datos de las supernovas Tipo Ia.

Energía de vacío: Una energía asociada con el espacio vacío, posible candidata para la energía oscura.

Eomaia scansoria: El más primitivo mamífero eutheriano conocido, encontrado en China en depósitos de ciento veinte millones de años de antigüedad.

Espectro: El brillo de un objeto en función de la longitud de onda.

Espectro de potencias: Una gráfica que muestra cuánto varía una señal en el cielo en función del tamaño aparente o de la escala angular de la variación.

Espectrometría de masas: Un método de clasificar e identificar los

302 Orígenes

componentes de una muestra por su masa. Utiliza aceleración electrostática y deflexión magnética para separar iones de masas diferentes, que luego pueden contarse.

Espectrometría de masas con acelerador (AMS): Un tipo de espectrometría de masas que utiliza grandes aceleradores de partículas y múltiples etapas de deflexión para aislar limpiamente isótopos poco abundantes.

Estadística bayesiana: Un tipo de análisis estadístico que toma la probabilidad de obtener un resultado dada una predicción teórica, y la convierte en la probabilidad de que la predicción teórica sea correcta dados los datos disponibles.

Euarchontoglires: Un grupo de mamíferos descubierto por análisis molecular que incluye roedores, conejos, primates, lémures voladores y musarañas arborícolas.

Eutheria: El grupo de todos los mamíferos, vivos y extintos, que están más estrechamente relacionados con los modernos mamíferos placentarios que con cualquier otro animal moderno.

Expansión universal: El aparente aumento con el tiempo de la distancia entre galaxias, debido a un cambio continuo en la geometría del universo.

Factor de escala: La distancia entre cualesquiera dos objetos (no ligados gravitatoria ni electromagnéticamente) en un instante en el pasado dividido por la distancia entre esos mismos objetos hoy. Se utiliza como una medida conveniente del «tamaño» del universo en trabajos para seguir la expansión del universo.

Fecha por carbono-14 calibrada: Una fecha por carbono-14 que tiene en cuenta las fluctuaciones en los niveles de carbono-14 en la atmósfera con el tiempo. La conversión entre fechas de carbono-14 convencionales y calibradas se realiza utilizando una curva de calibración estándar obtenida a partir de anillos de árboles y otras fuentes.

Fechas por carbono-14 convencionales: Fechas por carbono-14 calculadas suponiendo que el contenido de carbono-14 de la atmósfera ha sido constante en el tiempo y que la semivida del carbono-14 es 5.570 años. Se utiliza como una medida estandarizada del contenido de carbono-14 de una muestra.

Fondo cósmico de microondas (CMB): Un fondo casi constante de radiación de microondas que parece llenar todo el espacio y ser una reliquia de la fase densa y caliente del universo primitivo. Proporciona información importante sobre la composición, geometría y edad del universo.

Fotón: Una partícula de luz.

Fraccionamiento de masa: Un fenómeno en el que se separan isótopos con masas diferentes, porque algún proceso puede transportar más eficientemente a los átomos menos masivos que a los más masivos, o viceversa.

Fusión: La unión de varios núcleos atómicos en un único núcleo más grande. La fusión de núcleos de hidrógeno en helio proporciona la energía necesaria para soportar las estrellas de la secuencia principal.

Gases nobles: Elementos que sólo raramente forman enlaces químicos con otros elementos. Entre los gases nobles se incluyen el helio, el neón y el argón.

Gen: Una región en una molécula de ADN que contiene las instrucciones para hacer una proteína.

Geometría euclidiana: Un conjunto de preceptos que incluyen conceptos tan familiares como que «líneas paralelas nunca se cortan» y «los ángulos internos de un triángulo siempre suman 180 grados».

Gigante roja: Una estrella que ha agotado el combustible de hidrógeno en su núcleo y como resultado se hace más grande, más brillante y más roja que una típica estrella de la secuencia principal.

Grandes simios: Un grupo de animales que consiste en humanos, chimpancés, gorilas y orangutanes.

Haab: Un ciclo de 365 días que es parte de la Rueda Calendárica maya. Consta de dieciocho «meses» de veinte días, más un período extra de cinco días.

Homínidos (Homíninos): Los animales que están más íntimamente relacionados con los humanos vivientes que con cualquier otro animal viviente. Todos los homínidos fósiles encontrados hasta la fecha comparten algunos de los rasgos que hoy son privativos de los humanos, tales como grandes cerebros y postura erguida. Estos

304 Orígenes

fósiles pueden decirnos cómo y cuándo nuestros ancestros adquirieron estos rasgos por primera vez.

Imperio Antiguo: Período de la historia del Antiguo Egipto durante el que se construyeron las Grandes Pirámides. Este período cubre unos quinientos años en torno al 2500 a.C., pero las fechas exactas siguen siendo inciertas.

Imperio Medio: Período de la historia del Antiguo Egipto durante el que se escribieron algunas obras clásicas de la literatura egipcia antigua. Este período de tiempo se ha datado hacia el 2000-1800 a.C. utilizando en parte un registro del orto heliaco de Sirio.

Imperio Nuevo: Período de la historia del Antiguo Egipto que incluye los reinados de los famosos reyes Tutankamon y Ramsés el Grande. Este período se data en aproximadamente el 1600-1100 a.C. utilizando, en parte, un registro del orto heliaco de Sirio.

Inclusiones ricas en calcio y aluminio (CAI): Regiones de forma irregular en las condritas que tienen altas cantidades de elementos refractarios tales como aluminio y calcio. La mayoría se formaron probablemente muy pronto en la historia del Sistema Solar.

Intrones: Tramos de ADN en un gen que están interpuestos entre las secuencias que proporcionan información para hacer una proteína pero que por sí mismos no proporcionan ninguna información para fabricar una proteína.

Isótopos: Los átomos de un elemento dado con un número dado de neutrones; los átomos con el mismo número de protones pero distinto número de neutrones se consideran isótopos diferentes de un mismo elemento. Los diferentes isótopos de un elemento dado tienen propiedades químicas prácticamente idénticas, pero masas diferentes. Algunos isótopos pueden ser también estables mientras que otros son inestables.

Kelvin: Una unidad de temperatura. Una diferencia de temperatura de 1 Kelvin es igual que una diferencia de temperatura de 1 grado Celsius, o 1,8 grados Fahrenheit. Una temperatura de 0 Kelvin (-273,15 °C) es el cero absoluto.

Lambda: Véase Energía oscura.

Laurasiatheria: Un grupo de mamíferos revelado por análisis molecular que incluye a las ballenas, los dos tipos de animales con pe-

zuñas, carnívoros, pangolines, murciélagos, topos, musarañas y erizos.

Límite de Schonberg-Chandrasekhar: Un límite teórico a la cantidad de hidrógeno que puede quemar una estrella antes de convertirse en gigante roja. Este límite depende de la razón entre las masas de hidrógeno y helio, y se estima en aproximadamente un 10%. Estrictamente hablando, este límite no se aplica a las estrellas reales.

Longitud de onda: La distancia entre crestas adyacentes en una onda. La longitud de onda de una onda electromagnética de luz determina su color.

Luminosidad: La cantidad total de energía emitida por una estrella en forma de radiación electromagnética.

Magnitud absoluta: La magnitud que tendría una estrella si estuviera situada a 32,6 años luz de distancia.

Magnitud aparente: La magnitud de una estrella observada desde la Tierra.

Magnitud (de brillo): Una medida del brillo de un cuerpo astronómico. Cada unidad de magnitud corresponde a un factor de aproximadamente 2,5 en brillo, y un decrecimiento en magnitud representa un aumento en brillo. Una estrella de magnitud 1 es, por consiguiente, 2,5 veces más brillante que una estrella de magnitud 2, que a su vez es 2,5 veces más brillante que una estrella de magnitud 3.

Mamífero placentario: Un mamífero en el que el feto es alimentado por una placenta dentro de la madre.

Mamíferos: Un grupo de animales que tienen pelo, alimentan a sus crías con leche y pueden regular su temperatura corporal. Se dividen en unos veinte órdenes.

Manchas solares: Marcas oscuras en la superficie del Sol. Parecen estar asociadas con regiones de intensos y complicados campos magnéticos. El número de manchas solares aumenta y disminuye cada once años, aproximadamente, en un período conocido como ciclo solar.

Marsupial: Un mamífero que mantiene a su cría en una bolsa.

Masa: Una cantidad asociada con objetos que determina cómo se

306 *Orígenes*

mueven en respuesta a fuerzas exteriores. La ecuación de Einstein $E=mc^2$ dice que hay una energía asociada con esta magnitud.

Materia: En cosmología, un término genérico para cualquier material en el que la mayor parte de la energía está almacenada en la masa de las partículas.

Materia ordinaria: Materia que está formada de átomos, núcleos y electrones (en oposición a la materia oscura).

Materia oscura: Una forma de materia que no produce luz y posiblemente está compuesta de partículas subatómicas exóticas.

Meadowcroft: Un emplazamiento arqueológico al sudeste de Pensilvania. Contiene evidencia de una ocupación significativamente más antigua que las asociadas con puntas Clovis y se ha utilizado como argumento en contra del modelo «Clovis-primero». Sin embargo, la datación de este emplazamiento y sus conexiones con otros emplazamientos sigue siendo controvertida.

Meteorito: Un objeto que ha caído del espacio exterior y está ahora en tierra.

Meteoritos metálicos: Meteoritos que están compuestos principalmente de aleaciones metálicas de hierro y níquel.

Meteoritos rocosos: Meteoritos que están compuestos básicamente de silicatos. Se dividen en dos amplios grupos: condritas y acondritas.

Meteoritos rocoso-metálicos: Meteoritos que contienen una mezcla de aleaciones metálicas y silicatos.

Microondas: Una forma de radiación electromagnética con longitudes de onda mayores de 1 milímetro y menores de 10 centímetros.

Mínimo de Dalton: Un período en torno a 1820 en el que el Sol poseía un número de manchas solares anormalmente bajo.

Mínimo de Maunder: Un período comprendido entre 1650 y 1700 con un número anormalmente bajo de manchas solares.

Monotrema: Un mamífero que pone huevos.

Monte Verde: Un emplazamiento arqueológico en el sur de Chile considerado uno de los mejores candidatos para una ocupación pre-Clovis, aunque la edad de este emplazamiento ha sido discutida. Este emplazamiento contiene también material vegetal, incluyendo plantas medicinales, y posiblemente estructuras de ocupa-

ción que proporcionan información importante acerca de cómo vivían los pobladores del Nuevo Mundo a finales de la Edad de Hielo.

Mutación: Un cambio en la secuencia de nucleótidos en una molécula de ADN; incluye inserciones, eliminaciones, duplicaciones y sustituciones.

Mutación por sustitución puntual: Un tipo de mutación en donde un único par de bases es sustituido por otro par de bases, tal como si la secuencia ATGTG se convierte en ATCTG.

Mutaciones silentes: Mutaciones que no afectan a la estructura o la producción de proteínas.

Neutrino: Una partícula subatómica neutra y de masa muy pequeña que participa en ciertas reacciones nucleares como la desintegración beta.

Neutrón: Una partícula subatómica neutra y masiva que se encuentra en los núcleos de los átomos. Átomos con el mismo número de protones pero distinto número de neutrones tienen las mismas propiedades químicas pero diferentes masas. (Véase Isótopos.)

Núcleos: El corazón interior denso de un átomo, donde están localizados los protones y los neutrones.

Nucleótido: Un conjunto de moléculas pequeñas, incluidas adenina, timina, citosina y guanina, que forman pares de bases en moléculas de ADN.

Nuun Ujol Chaak: El gobernante de Tikal que luchó contra Yuknoom Ch'een y fue finalmente derrotado por éste y sus aliados.

Orden: Un término de la nomenclatura biológica que se utiliza para identificar un grupo de animales que comparten una herencia común. Los mamíferos vivientes se clasifican en unos veinte órdenes distintos.

Orrorin tugenensis: Un homínido fósil encontrado en Kenia. Se remonta a hace unos seis millones de años, por lo que este animal puede tener claves importantes acerca de cuándo empezaron nuestros ancestros a andar sobre dos piernas.

Orto heliaco: Un suceso que ocurre cuando una estrella dada sale inmediatamente antes que el Sol. El orto heliaco de Sirio era utilizado por los antiguos egipcios para marcar el comienzo del año,

308 *Orígenes*

cuando el valle del Nilo estaba inundado. Puesto que el calendario egipcio no incluía días bisiestos, este suceso ocurría en fechas diferentes en años diferentes.

Oscilaciones acústicas: El flujo y reflujo de plasma entre regiones superdensas y menos densas en el universo primitivo. Estos movimientos son probablemente responsables de las variaciones de brillo observadas en el CMB.

Par de bases: Un par de nucleótidos complementarios (A-T o G-C), cada uno de ellos unido a una hebra de una molécula de ADN.

Paralaje: Método de medir la distancia a estrellas vecinas que utiliza el movimiento aparente de las estrellas en el curso de un año.

Período clásico: Un período de la historia maya comprendido entre aproximadamente el 250 y el 900 d.C., cuando los mayas que vivían en las tierras bajas tropicales de Guatemala, Belice, el oeste de México y el extremo este de Honduras construían grandes ciudades y erigían muchos monumentos de piedra grabados.

Períodos Intermedios: Tres períodos en la historia egipcia en los que la autoridad central de Egipto era débil. Es difícil establecer las cronologías exactas de estos períodos. En particular, las incertidumbres relativas a la longitud del Primer Período Intermedio hacen difícil estimar la edad del Imperio Antiguo sobre la sola base de registros históricos.

Placentaria: Un grupo de mamíferos que consta de los últimos ancestros comunes de todos los mamíferos placentarios, y todos los descendientes de dichos animales.

Plasma: Un estado de la materia en el que los átomos están ionizados, de modo que electrones y núcleos pueden moverse independientemente unos de otros.

Polos celestes: Los puntos en el cielo alrededor de los cuales parecen moverse todas las estrellas cuando la Tierra gira. Actualmente el polo norte celeste se encuentra muy próximo a Polaris, la «Estrella Polar». Sin embargo, la precesión de la Tierra hace que la posición del polo celeste se mueva lentamente en un círculo a través de las estrellas.

Potasio-40: Un isótopo inestable del potasio con 19 protones y 21 neutrones, que puede desintegrarse en calcio-40 o argón-40. Su semivida es de 1.280 millones de años.

Precesión: El movimiento circular de la orientación del eje de un objeto giratorio cuando el objeto es sometido a fuerzas asimétricas. La Tierra experimenta precesión debido a las interacciones con el Sol y la Luna, lo que hace que la orientación del polo terrestre se mueva en círculo una vez cada 26.000 años.

Prior: Una hipótesis utilizada en estadística bayesiana que especifica la probabilidad de que una predicción teórica dada pudiera haber ocurrido antes de que hagamos una medida.

Procónsul: Una criatura fósil similar a un simio que vivió hace veinte millones de años. Comparte rasgos con todos los grandes simios vivos, pero no tiene rasgos privativos de ninguno de ellos. Por consiguiente, representa una rama de la familia de los simios que divergió antes que cualquiera de las ramas que llevan a los grandes simios modernos.

Proteína: Una molécula compuesta por una cadena de aminoácidos. La secuencia de aminoácidos determina las propiedades químicas de la molécula. Las proteínas participan en casi todo lo que hace una célula, y el ADN de la célula contiene instrucciones para hacer muchas proteínas.

Protón: Una partícula subatómica masiva y cargada positivamente que se encuentra en los núcleos de los átomos. El número de protones en el núcleo determina cuántos electrones le rodean, y con ello determina las propiedades químicas del átomo.

Puntas clovis: Elaboradas herramientas de piedra que se encuentran a lo largo de América del Norte. Son grandes puntas de proyectil labradas, con una «acanaladura» característica en su base cuya confección requiere cierta habilidad. Estas herramientas se remontan a hace unos 13.000 años, de modo que están entre las pruebas más antiguas de ocupación humana en el Nuevo Mundo.

Quintaesencia: Véase Energía oscura.

Rayos cósmicos: Núcleos atómicos y otras partículas subatómicas que están chocando constantemente con nuestra atmósfera a velocidades muy altas. Estas partículas pueden ser producidas por una variedad de objetos astrofísicos, pero determinar su origen es difícil porque han sido desviadas por campos magnéticos interestelares. Las colisiones entre estas partículas y los átomos de nitrógeno en nuestra atmósfera producen carbono-14.

310 Orígenes

Refractario: Que sólo se funde o vaporiza a altas temperaturas. Lo contrario de «volátil».

Regiones flanqueantes: Regiones al principio y al final de un gen que no llevan información acerca de cómo fabricar una proteína específica, pero indican dónde está localizada dicha información en el gen y cuándo se debería acceder a ella. Estas regiones suelen tener secuencias características que permiten a los biólogos identificar genes incluso si no saben qué hace realmente la proteína codificada en el gen.

Relación masa-luminosidad: La fuerte correlación entre las luminosidades de las estrellas de la secuencia principal y sus masas.

Relatividad general: La teoría desarrollada originalmente por Albert Einstein que postula que la gravedad no es una fuerza clásica sino más bien una distorsión en la geometría del espacio y el tiempo. Esta teoría tiene un fuerte apoyo procedente de diversas observaciones, incluido el efecto de lente producido por objetos masivos.

Representación isócrona: Una representación de las razones isotópicas para un conjunto de minerales procedentes de un mismo objeto. Se utiliza en la datación isócrona.

Rubidio-87: Un isótopo inestable del elemento rubidio con una semivida de unos 50.000 millones de años, utilizado para datar rocas antiguas como meteoritos.

Rueda Calendárica: La parte del calendario maya que está compuesta del Tzolk'in y el Haab. Especifica cuándo ocurre un suceso dentro de un ciclo de 52 años.

Sahelanthropus tchadensis: Un homínido fósil encontrado en Chad. Puesto que se remonta a hace seis millones de años, esta criatura puede proporcionar claves importantes sobre el origen del bipedalismo en los homínidos.

Salida de la secuencia principal: La localización del extremo azul brillante de una secuencia principal incompleta observada para un cúmulo de estrellas. Las estrellas en esta situación están a punto de convertirse en gigantes rojas, de modo que su posición depende de la edad del cúmulo.

Secuencia principal: La línea diagonal en un diagrama color-magnitud que va desde las estrellas azules brillantes hasta las estrellas te-

nues rojas; la mayoría de las estrellas cercanas caen a lo largo de esta línea. Las estrellas que caen a lo largo de la secuencia principal están alimentadas principalmente por la fusión de hidrógeno en helio.

Semivida: El tiempo que se necesita para que se desintegren la mitad de los átomos de una muestra dada.

Sivapithecus: Un animal fósil que vivió hace unos doce millones de años. Tiene rasgos en su cara, tales como cuencas oculares próximas, que indican una estrecha relación con los orangutanes actuales.

Supernova: Una explosión espectacular que marca la muerte de ciertas estrellas. Una supernova puede haber iniciado la formación del Sistema Solar. Un tipo de supernova también proporciona evidencia de cómo se ha expandido el universo durante los últimos 10.000 millones de años.

Supernova Tipo Ia: Un tipo de supernova en cuyo espectro faltan las líneas del hidrógeno. Se cree que se produce cuando se reinician reacciones nucleares en una enana blanca debido a la acreción de material adicional. Estos sucesos proporcionan una poderosa herramienta para medir las distancias a galaxias muy lejanas.

Tikal: El nombre moderno de una ciudad importante del período maya clásico, originalmente conocida como Mutul. La mayor rival de Calakmul.

Transición de fase: Un fenómeno que ocurre cuando un material cambia entre fases diferentes tales como sólido, líquido, gas y plasma.

Tzolk'in: Un ciclo de 260 días que es parte de la Rueda Calendárica maya. Una fecha Tzolk'in consiste en un número entre 1 y 13 y uno de los veinte signos del día. Cada día que pasa aumenta el número en uno y cambia el signo del día.

Valle del Rift del África Oriental: Una serie de accidentes geológicos que se extiende a lo largo del este de África desde Eritrea a Mozambique. Esta región muestra evidencia de que la corteza de la Tierra se está separando o se estuvo separando recientemente. Las tensiones resultantes crearon una serie de valles y dieron lugar a una amplia actividad volcánica. Esta región ha dado también muchos homínidos fósiles primitivos.

312 *Orígenes*

Volátil: Que se vaporiza a temperaturas relativamente bajas. Lo contrario de refractario.

Xenarthra: Un orden de mamíferos, principalmente de Sudamérica, que incluye a osos hormigueros, armadillos y perezosos.

Younger Dryas: Un período de tiempo en el que el clima, después de empezar a calentarse tras el final de la última Edad de Hielo, se enfrió de nuevo repentinamente, al menos en el hemisferio norte. Empezó hace alrededor de 12.700 años y duró aproximadamente mil años. Después de este período frío las temperaturas crecieron de nuevo y se estabilizaron en los valores actuales.

Yuknoom Ch'een: Un gobernante importante de la ciudad maya de Calakmul durante el período clásico.

Zalambalestidos: Un grupo de mamíferos eutherianos que vivieron hace entre setenta y cinco y noventa millones de años. Ciertos rasgos en los dientes de estas criaturas han llevado a algunos paleontólogos a argumentar que están relacionados con los roedores y los conejos modernos, pero esta idea es muy controvertida.

Zhelestidos: Un grupo de mamíferos eutherianos que vivieron hace entre ochenta y cinco y noventa millones de años. Algunos rasgos de estas criaturas se han utilizado para sugerir un vínculo estrecho entre ellos y los modernos animales con pezuña. Esta idea es todavía controvertida.

Índice alfabético

- absoluta, magnitud, véase magnitud
- Abu Roash, 50, 50
- Abusir, 50, 50
- ácido desoxirribonucleico, véase ADN
- acondrita, 187, 196-200, 204, 210
- ADN (ácido desoxirribonucleico), 140-141
 - mutaciones, 141
 - replicación, 140-141
 - y cuantificación de las relaciones, 142
 - y edad de los linajes, 149-153, 177-178
 - y relaciones con grandes simios, 128-129, 146-153
 - y relaciones con mamíferos, 166-174, véase también mutación
- Afrosoricida, 172
- Afrotheria, 172, 173, 178, 179, 182
- Alaska, 117-118
- alineación astronómica de las pirámides, 50, 57, véase también pirámides
- cambios en el tiempo, 52-54, 60-63, 66-68
 - utilizando dos estrellas, 58-63, 66-67
 - y edad estimada, 60-63
 - y precesión de la Tierra, 56
- Allende, meteorito, 201-204
- aluminio-26
 - datación, 200-205, 209-210
 - origen, 205-206, 209
- aluminio-27, 201-203
- América, primeros habitantes de, 14, 113
 - Clovis, 115, 117-119
 - pautas regionales, 123-126
 - posibles emplazamientos pre-Clovis, 119-124
 - posibles rutas de migración, 115-118, 123-125
- aminoácidos, 144-145
- AMS (espectrometría de masas con acelerador), 83
- anillos de los árboles, 96-97
 - y dendrocronología, 98-99
 - y fechas calibradas por carbono-14, 99-100
- animales con pezuña, véase Artiodactyla; Perissodactyla

314 *Orígenes*

- aparente, magnitud, véase magnitud
 Apolo, misiones, 14, 15, 187
 árbol filogenético, 147-153, 164, 165, 171, 172
 Arcaico, Período (de Egipto), 45, 45
 Archonta, 165, 166, 173
 Ardipithecus ramidus, 132, 138-139, 153
 argón-39, 135
 argón-40, 132-136
 armadillo, véase Xenarthra
 Artiodactyla, 160, 161, 164, 165, 166, 169, 172, 173
 astrágalo, 164
 átomos, 70, 240-241, 267
 Australopithecus afarensis, 130-132, 139, 153
- B'alah Chan K'awiil (regla de Dos pilas), 19-20, 33, 34-36, 39-40
 ballena, 125, 160, 164, 166, 173, véase también Cetácea
 berilio-10, 107-109
 beta, desintegración, 73-74, 132, 133, 190, 200
 big bang, 15, 16, 239, 249, 261-262, 274, 284, 290-292
 bipedalismo, origen del, 15, 16, 129, 130-131, 138, 153
 BP (Antes de física), 93
- CAI, véase inclusiones ricas-en-calicio-y-aluminio
 Calakmul, 20, 30-36, 38-39
 calcio-40, 132, 133
 calendario Maya, 20-28, 21, véase también rueda calendárica; Haab; Cuenta Larga; Tzolk'in
 y reconstrucción de la historia Maya, 20, 30-31
 y traducción de textos Maya, 28-30
 calibración para fechas por carbono-14, 99-101
 campos magnéticos
 solar, 103-107
 terrestre, 102-103
 y espectrometría de masas, 82-83
 y rayos cósmicos, 85-86, 101-107
 Canadá, 117
 Cancun, 31, 33, 34, 38-40
 Caracol, 31, 32, 33, 38
 carbono-12, 71, 74, 95, 228
 carbono-13, 95
 carbono-14, 74, 80, véase también niveles de carbono-14 atmosférico; carbono-14, datación por estimación de concentraciones iniciales del, 84-87, 92, 96, 98-101
 medición de concentraciones presentes, 81-83, 87-89, 93-94
 carbono-14, datación por (datación por radiocarbono), 15, 70, 81-89, 91-93, 133, 189, véase también calibración para fechas por carbono-14; curva de calibración; fechas convencionales por carbono-14
 calibración con anillos de los árboles, 96-101
 convenciones en fechas brutas, 93-94
 y artefactos históricos, 87-89
 y primeros emplazamientos de América, 15, 114, 115, 119, 120, 121, 124
 Carnivora, 160, 161, 165, 166, 169, 172, 173

Índice alfabético 315

- Caverna da Pedra Pintada, 125
 cefeida, 243-246
 cerdos hormigueros, véase Tubulidentata
 Cetácea, 159, 160, 165, 166, 171, 172, 173, véase también ballenas
 Cetartiodactyla, 171, 172
 Chad, 129, 132, 138
 Chan, véase Calakmul
 Chen, Feng-Chi, 146-147
 Chile, 121
 chimpancé, 128, 147-153
 Chiroptera, 159, 165, 172, véase también murciélagos
 Chrysochloridae, 162, 163, 172, 182
 ciclo del carbono, 84, 102, 106-107, 110
 ciclo solar, 104,
 civilización Maya, 14, 19, 30-31
 Clásico, Período (Mayas), 19
 Clima, véase también Edad de Hielo; corrientes oceánicas; Younger Dryas
 e isótopos de oxígeno, 107-109
 y niveles de carbono-14 atmosférico, 106, 109-111
 y rutas en el Nuevo Mundo, 113-115, 117-119, 124
 Clovis (emplazamiento), 114, 115
 Clovis, puntas, 115, 116, 117, 123-125
 Clovis-primero, modelo, 118, 123-126
 CMB, véase fondo cósmico de microondas
 color (de las estrellas), 214, 217, 222, 233, véase también espectro
 color-magnitud, diagrama, 222, 232-235
 condrita, 187, 196-200
 cóndrulo, 187, 197-205, 208-210
 conejo, véase Lagomorpha
 constante cosmológica, véase energía oscura; energía de vacío
 contador Geiger, 81
 convergencia, 158, 182
 corredor libre de hielo, 118, 119, 121
 corrientes oceánicas (y clima de la Tierra), 93, 106-110
 Cosmic Background Explorer, 278
 Cuenta Larga, 22-24, 28
 cuerpo negro, 275-277
 cúmulo globular, 232-234
 edad estimada de, 232-237, 291
 curva de calibración (para fechas por carbono-14), 99-102
 «curva de objetos conocidos», 89
 curvatura (del universo), 273, 286-291
 Dahshur, 49
 Dalton, mínimo de, 104, 105-106
 dendrocronología, 97-99, véase también anillos de los árboles
 dendrograma, véase árbol filogenético
 densidad crítica, 286-290
 deriva continental, 136, 178, 179
 Dermoptera, 160, 163, 165, 172, 173
 desacoplamiento, 278, 283-286, 290-291
 desintegración, véase desintegración nuclear
 desintegración alfa, 73-74
 desintegración gamma, 73-74
 desintegración nuclear, 70-81, 92, 189, 197, véase también desinte-

316 *Orígenes*

- gración alfa; desintegración beta; desintegración gamma
- desplazamiento hacia el rojo, 239, 240, 242
 - y desplazamiento Doppler, 247
 - y factor de escala, 253
 - y la expansión del universo, 255
- deuterio, 223
- diagramas isócronos, 192-196, 202, 207
- diferenciación (de los objetos del sistema solar), 188-189, 199, 210
- dinastías (egipcias), 44-46, 45
 - Tercera, 49
 - Cuarta, 46, 50-51
 - Quinta, 50-51
 - Sexta, 51
- distancia de coordenadas, 260, 260
- distancia de luminosidad, 243-245, 259
- Doppler, desplazamiento, 247
- Dos Pilas, 19-20, 31, 33, 34-36, 39-40
- Dugones, véase Sirenia
- Dyedefra (faraón de Egipto), 50, 53, 63-64
- $E=mc^2$, 70, 72
 - y desintegración nuclear, 71-75
 - y estrellas, 224, 230-231
 - y materia, 265-266
- ecuación de estado, 269
- Edad de Hielo, 15, 93, 109-110, 113, 114, 117-119, 125
- edad de los dinosaurios, véase Mesozoico
- Egipto, 14, véase también dinastías; pirámides
 - calendario, 42, 48
 - cronología, 44
 - lista de faraones, 44, 46
 - y datación por carbono-14, 87-88, 96
- Einstein, Albert, 72, 269
- electrones, 70, 241
- elefante, véase Proboscidea
- elemento, 70
- enana blanca, 237, 246
- energía, 72
 - densidad en la materia, 266, 284
 - y expansión del universo, 265-266, 286, 288-291
 - y geometría del universo, 273, 286-289
- energía oscura, 269-274, 284, 291, véase también energía de vacío
- Eomaia scansoria, 180
- Erinaceidae, 162, 173
- Erizo, véase Erinaceidae; Insectivora
- escritura Maya, 18, 19
 - contenido histórico, 28-29
 - numerales, 23
 - orden de lectura, 20-21
- espectro, 214, véase también color;
 - espectro de potencias de CMB, 275-276
 - de estrellas, 214, 216, 221
 - de galaxias, 239-242
- espectro de potencias (del CMB), 280, 282, 284
- espectrometría de masa, 82-83, véase también espectrometría de masas con acelerador
- espectrometría de masas con acelerador (AMS), 83
- estadística bayesiana, 174-176
 - y evolución de los mamíferos, 176-177

Índice alfabético 317

- estrellas, 213, véase también cúmulo globular; Kochab; secuencia principal; Mizar; Polaris; gigante roja; Sirio; sol; enana blanca
- brillantez, 217-218
- distancias, 213-214, 218-221
- en la religión del antiguo Egipto, 59-61
- espectro, 214-217, 221
- luminocidad, 221
- y alineamiento de pirámides, 57-63, 66-68
- y fusión nuclear, 222-226.
- estroncio-86, 191-196
- estroncio-87, 190-195
- Etiopía, 129, 132
- Euarchontoglires, 172, 173, 178, 179, 182
- Eulipotyphla, 172
- Eutheria, 179-181
- expansión (universal), 253-256, véase también factor de escala
- y datos sobre las supernovas, 258
- y el big bang, 261-262, 290
- y el CMB, 277-278, 289-290
- y la composición del universo, 265-274
- y la densidad de energía del universo, 265-266, 273-274, 284, 288-290
- y la geometría del universo, 273-274, 288-289
- y las distancias estimadas, 258-260
- factor de escala, 254
- cambios en el tiempo, 257-261
- en la expansión del universo, 255
- y el big bang, 261
- y la composición del universo, 266-274
- y la densidad de energía del universo, 265-266, 273-274
- y la geometría del universo, 273-274
- fechas brutas por carbono-14, véase fechas convencionales por carbono-14
- fechas convencionales por carbono-14, 93-95, 99
- Ferae, 165, 166
- filtros (ópticos), 215-216
- fondo cósmico de microondas (CMB), 274-278
- anisotropías, 278-280
- y edad del universo, 284, 288-292
- y el universo en expansión, 283-285, 288-291
- y el universo primitivo, 278-279, 280-284
- y geometría del universo, 279, 285-291
- y oscilación acústica, 282-284
- fraccionamiento de masa, 94-95, 107
- fuerzas, y relatividad general, 251-253
- función de onda, 79
- fusión
- de helio en carbono, 228
- de hidrógeno en helio, 222-226, 235
- galaxia, 239
- desplazamientos, 239-242
- distancias, 241-246
- distribución, 249-251
- y expansión del universo, 256-257

318 *Orígenes*

- gases nobles, 134
 gen, 144, 168, véase también ADN; mutación
 geometría euclidiana, 252, 260, 286-288, véase también curvatura
 gigantes rojas, 229-235
 Giza, 43, 46, 49-50, 63
 glaciares, 106-111
 Glires, 165, 166, 173
 Gondwana, 178, 179
 gorila, 128, 147-152
 Gran Valle del Rift del África Oriental, 136-138
 Grandes Pirámides, véase pirámides
 grandes simios, 128, 147-152, véase también Primates
 gravedad
 y reacciones nucleares en estrellas, 224-227
 y relatividad general, 252-253
 Groenlandia, 106-109
- Haab, 26, 27, 28, véase también rueda calendárica
 helio (-4), 73, 222-224, 228-231
 Hertzsprung-Russell, diagrama de, véase color-magnitud, diagrama
 hidrógeno, 213, 223-225, 228-231, 289
 Hipparcos, 219, 221-222
 homínidos, 129, 131, 139
 bipedalismo, 129, 130-131
 edad fósil, 136, 138
 tamaño del cerebro, 128-131
 Homo erectus, 116, 130, 131, 139
 Homo habilis, 130, 131, 139
 Homo sapiens (humanos), 15-16, 128-130, 131, 139, 147-153
 Hubble, diagrama de, 246
 interpretación incorrecta, 246-249
 y el universo en expansión, 253-261
 y la composición del universo, 264-274
 humanos, véase Homo sapiens
 Hyracoidea, 160, 162, 165, 166, 172, 173
- Imperio Antiguo (de Egipto), 45, 46, 48-49
 Imperio Medio (de Egipto), 45-49, 88
 Imperio Nuevo (de Egipto), 45-47
 inclusiones ricas-en-calcio-y-aluminio, 200-206, 209-210
 Inman, meteorito, 201-202
 Insectívora, 162-163, 165, 166, 173
 inundación del Nilo, 47
 isócrona, datación, 192-196, 207
 isótopo, 71, véase también isótopos individuales (ejemplo, aluminio-26)
 y fraccionamiento de masa, 94-95, 107
- Jasaw Chan K'awiil (gobernante de Tikal), 33, 36
- Kefrén (gobernante de Egipto), 43, 50-53
 Kenya, 129, 132
 Keops (gobernante de Egipto), 43, 49-53, 63
 Kochab, 62, 63-64, 66
- La Corona, 33, 38
 Lagomorpha, 160, 165, 166, 172, 173

Índice alfabético 319

- Lambda, véase energía oscura
 Laurasiatheria, 171, 172, 173, 178, 179, 182
 lémures voladores, véase Dermoptera
 Li, Wen-Hsiung, 146-147
 Libby, Willard F., 81-82, 87, 88, 96
 longitud de onda, 214, 255, 274, 275, 277, véase también onda electromagnética
 luminosidad, 219, 221, 226-227, 231-232, 243-245
 luz, véase radiación electromagnética

 Macroscelidea, 160, 163, 165, 172, 173
 magnesio-24, 201-203
 magnitud, 215-217
 absoluta, 221
 aparente, 215-217, 221
 mamíferos, 156-159, véase también Eutheria; marsupial; monotrema; placentarios; y grupos individuales (ejemplo, murciélago)
 ancestro común, 158
 registro fósil, 163-164, 177-183
 relaciones inferidas por datos de ADN, 16, 166, 171-172, 177-179
 relaciones inferidas por datos morfológicos, 163-166
 tipos modernos, 158-164
 mamuts, 116, 123
 manatíes, véase Sirenia
 mancha solar, 104-106
 Manetón, 44
 manganeso-53, 205
 marsupiales, 159
 masa, 71, 251-252, 265-266
 materia, 266-268, véase también materia oscura
 materia oscura, 268-274, 284, 291-292
 Meadowcroft, 114, 119-121, 123, 124
 mecánica cuántica, 78-81
 desintegración de carbono-14, 70, 82
 y espectro atómico, 240-241
 medición de distancias astronómicas, véase también cefeida; distancia de coordenadas; distancia de luminosidad; paralaje; supernova
 con cefeidas, 242-246
 con las supernovas Tipo Ia, 245-246
 en la expansión del universo, 257-261
 paralaje, 218-219, 220, 245
 y geometría del universo, 260, 273.
 meganesio-26, 200-203
 Meidum, 49, 52
 Mesozoico, 15, 16, 156, 173-175
 mamíferos, 178-183
 metálicos, meteoritos, 187, 198, 199
 meteoritos, véase también acondritas; CAI; condrita; cóndrulo; metálicos, meteoritos; rocoso-metálicos, meteoritos; rocosos, meteoritos
 datación, 189-210
 tipos, 187
 y fin del mesozoico, 156, 183, 186
 y sistema solar primitivo, 188-189, 196-199, 209-210
 métodos de distancia (análisis de secuencia de ADN), 171

320 *Orígenes*

- métodos de máxima parsimonia (análisis de secuencia de ADN), 171
- métodos de máxima probabilidad (análisis de secuencia de ADN), 171
- Micerino (gobernador de Egipto), 43, 50, 52
- microondas, 274-278, véase también fondo cósmico de microondas
- mínimo de Maunder, 104, 105-107
- Mizar, 62, 63-64, 66
- monotremas, 159, 180
- Monte Alegre, 114, 125
- Monte Verde, 114, 121-122
- Moral, 31, 33, 35-36, 39
- murciélagos, 159, 164, 166, 173, véase también Chiroptera
- musaraña, véase Insectívora; Macroscelidea; Scadentia; Soricidae
- musaraña arborícola, véase Scandentia
- musarañas elefante, véase Macroscelidea
- mutación, 141, véase también ritmo de acumulación de mutaciones
- acumulación en el tiempo, 141-144, 146, 149-150, 158, 167
- en regiones codificadoras, 145, 168
- mutaciones silentes, 144-146
- sustitución puntual, 146, 166
- y cuantificación de las relaciones, 142
- y edad de los linajes, 149-152, 176-178
- y las relaciones entre mamíferos, 166-174
- y relaciones entre los grandes simios, 147-150.
- Mutul, véase Tikal
- Naranjo, 33, 38
- Neferirkara (gobernador de Egipto), 43, 50, 52
- neutrino, 73, 133, 223-224, 285
- neutrón, 70-71, 86
- nitrógeno (-14), 74, 78, 80, 236-237
- niveles de carbono-14 atmosférico, 84-87
- y actividad solar, 103-107
- y campo magnético de la Tierra, 102-104
- y clima de la Tierra, 106, 109-110
- y curva de calibración, 101
- Nube de Magallanes, 243-245
- núcleos, 70
- nucleótido, 140
- Nuevo Mundo, primeros habitantes del, véase América, primeros habitantes de
- Nuun Ujol Chaak (gobernador de Tikal), 33, 34-36, 39
- Nyanzachoerus syrticus, 138
- onda electromagnética, véase radiación electromagnética
- orangután, 147-152
- orden (de mamíferos placentarios), 159-164
- relaciones inferidas por datos de ADN, 166, 171-173
- relaciones inferidas por datos morfológicos, 163-166
- Orrorin taginensis, 132, 138, 139, 153
- orto heliaco de Sirio, véase Sirio
- oscilaciones acústicas (en el universo primitivo), 282-284

Índice alfabético 321

- oso hormiguero, véase *Xenarthra*
 oxígeno-15, 236
 oxígeno-18, 108, 109
- Paenungulata*, 166
 Palenque, 31, 32, 33, 35, 38-39
 Pangolin, véase *Pholidota*
 papiro 10012 del Museo de Berlín, 48
 paralaje, 218-218, 220, 243, 245
Paranthropus robustus, 130, 139
 pares de bases, 140, 146, 171
 Park Forest, meteorito de, 186
 Pennsylvania, 119
 Perezoso, véase *Xenarthra*
 Período Tardío (de Egipto), 45, 45
 períodos intermedios (de Egipto), 45, 46, 49
Perissodactyla, 160, 161, 165, 166, 172, 173
Pholidota, 160, 161-163, 165, 166, 172, 173, 182
 Piedra de Palermo, 44
 Piedras Negras, 18, 21, 28-29, 31, 33, 35, 39-40
 pirámides (egipcias), 14, 43, 50, 52, véase también alineación astronómica de las pirámides; textos piramidales
 de la Quinta Dinastía, 50-51, 64
 de la Sexta Dinastía, 51
 de Sneferu en Dahshur, 49, 87, 88
 de Sneferu en Meidum, 49
 en Abu Rowash, 50, 63
 en Giza (las Grandes Pirámides), 14, 42-46, 49-51, 63-64
 estimación de su edad, 42-46, 60-63
 medidas de orientación, 51-54, 63-64, 66-68
Placentalia, 180
 placentarios, mamíferos, 159-163, véase también *Eutheria*
 ancestros Mesozoicos, 178-182
 registro fósil, 164, 177-183
 relaciones inferidas por datos de ADN, 166, 171-173
 relaciones inferidas por datos morfológicos, 165-167
 plasma, 105, 276
 en el universo primitivo, 277, 283-284, 289
 plomo-204, 206-207
 plomo-206, 206-207
 plomo-207, 206-207
 Polaris, 55-56, 57, véase también polo celeste
 polo celeste, 56, 58, 61, 66, véase también precesión
 positrón, 223
 potasio-39, 132, 135
 potasio-40, 132-135
 potasio-argón, datación, 132-136, 138, 189-190
 precesión, 54-56
 y alineación de las pirámides, 57-64
 pre-Clovis, sitios, 114, 118-125, véase también Meadowcroft; Monte Verde
Primates, 160, 161, 165, 166, 172, 173, véase también grandes simios
 primeros americanos, véase América, primeros habitantes de; Clovis; pre-Clovis, sitios
 primitivo, universo, véase universo prior, 175-177

322 *Orígenes*

- Proboscidea, 160, 161, 165, 166, 172, 173
 Procónsul, 152
 Proskouriakoff, Tatiana, 28-30
 proteína, 144-145
 protón, 70-71, 223
 puente de tierra (entre Asia y Alaska), 117
 puntual, mutación de sustitución, 146, 166
 quintaesencia, véase energía oscura
 radiación electromagnética, 214, 274, 275, véase también desplazamiento
 en el universo en expansión, 253-256, 277
 térmica, 215, 275-276
 transición atómica, 241
 radiación, véase radiación electromagnética
 radioactividad, 81, véase desintegración nuclear
 radiocarbono, datación por, véase carbono-14, datación por
 rapidez de la luz, véase velocidad de la luz
 rayos cósmicos, 85, 101-103, 105
 razón isotópica de oxígeno, 107-109
 regiones flanqueantes, 144, véase también genes
 registro fósil
 de los grandes simios, 151-153
 de los homínidos, 128-132, 137-140, 153
 de los mamíferos, 163-164, 177-183
 relación masa-luminosidad, 226-227
 y tiempo de vida estelar, 230-232
 relaciones
 entre grandes simios, 147-150
 entre mamíferos, 163-166, 168-174
 relatividad general, 252-253, 254, 269
 ritmo de acumulación de mutaciones, 143, 145-146
 en los grandes simios, 149-153
 variabilidad, 167-169, 175, 177
 rocoso-metálicos, meteoritos, 187
 rocosos, meteoritos, 187
 Rodentia, 160, 165, 166, 172, 173, 182
 rubidio-87, 189-195, 206
 rubidio-estroncio, datación, 190-195, 206, 208
 rueda calendárica, 23-29, véase también Haab; Tzolk'in
 Sahelanthropus tchadensis, 132, 138, 139, 153
 Sahura (gobernador de Egipto), 43, 50, 52
 salida de la secuencia principal, 234-237
 Scadentia, 160, 163, 165, 172, 173
 Schonberg-Chandrasekhar, límite de, 230
 secuencia principal (estrellas), 222, 225
 en cúmulo globular, 232-237
 relación masa-luminosidad, 226-227
 tiempos de vida, 227-232
 transformación en gigante roja, 229-232, 234-235
 selección natural, 143

Índice alfabético 323

- semivida, 75-81
 del aluminio-26, 200
 del carbono-14, 75
 del potasio-40, 133, 135
 del rubidio-87, 189-190
 del uranio, 206
 Senusert (gobernador de Egipto), 48, 88, 88
 Serpiente Enrollada (gobernador de Egipto), 32, 33, 35, 38
 Shotico, ciclo, véase Sirio
 silentes, mutaciones, 144-146, 167-169
 Sirenia, 160, 162, 165, 166, 172, 173
 Sirio
 brillantez, 217-219
 luminosidad, 219
 magnitud, 219
 orto heliaco, 47-48
 y el calendario egipcio, 47-48
 Sistema Solar, formación del, 16, 187-189, 196-200, 204-205, 209-210
 Sivapithecus, 151-152
 Sloan Digital Sky Survey, 249, 250
 Sneferu (faraón de Egipto), 42, 43, 49, 52, 88, 88
 Sol
 composición, 187-188
 formación, 187-188
 tiempo de vida, 231
 y aluminio-26, 204
 y niveles del carbono-14 atmosférico, 93, 103-106
 Solenodontidae, 162, 163, 172,
 Soricidae, 162, 172, 173
 Spence, K. E., 49, 57-64, 66
 supernova: tipo Ia, 245-247, 290-292, véase también Hubble, diagrama de supernova 1987A, 213 y aluminio-26, 204-205
 Tajoom Uk'ab K'ak' (gobernador de Calakmul), 32, 33, 38
 Talpidae, 162, 163, 172, 173, 182
 temperatura: de cuerpo negro, 275-276
 de la superficie de las estrellas, 214, 216, 217, 221, 226
 del universo primitivo, 277
 Tenrecidae, 162, 163, 172, 173
 térmica, radiación, véase cuerpo negro; radiación electromagnética
 textos piramidales, 51, 59
 Tierra, 15, 16, 189
 campo magnético, 103
 precesión, 54-57
 Tikal, 31, 33, 34-36, 39
 tipo Ia, supernova, véase supernova
 topos, véase Chrysochloridae; Insectivora; Talpidae
 topos dorados, véase Chrysochloridae
 transición de fase, 289
 Tubulidentata, 160, 161-162, 165, 172, 173, 182
 Turín, Papiro, 43, 53
 Tzolk'in, 24-25, 27, véase también rueda calendárica
 Ungulata, 165, 166
 universo, 239, véase también energía oscura; materia oscura; expansión (universal)
 composición, 264-274
 expansión, 251-256
 historia temprana, 278, 291
 homogeneidad a gran escala, 250

324 Orígenes

- uranio-235, 206-208
- uranio-238, 206-208
- uranio-plomo, datación por, 206-208
- vacío, energía de, 270, véase también energía oscura
- velocidad de la luz, 258
- volcánicas, rocas, véase también Gran Valle del Rift del África Oriental
- magnetización, 103
- y datación por potasio-argón, 132-136
- y fósiles homínidos, 136-138.
- Willkinson Microwave Anysotropy Probe (WMAP), 278, 281, 282
- Xenarthra, 160, 161, 165, 171-174, 178, 179, 182
- Yich'aak K'ak' (gobernador de Calakmul), 33, 36, 40
- Younger Dryas, 109-110
- Yuknoom Ch'een (gobernador de Calakmul), 20, 30-31, 32, 33, 38-39
 - ascensión al trono, 31-32
 - nacimiento, 31-32
 - implicación con otras ciudades, 34-36
 - muerte, 31-36
- Yuknoom Chan (gobernador de Calakmul), 32, 33, 38
- Yuknoom Head (gobernador de Calakmul), 32, 33, 38
- zalambalestidos, 181
- zhelestidos, 181

Índice

<i>Agradecimientos</i>	9
1. Introducción	11
2. Los calendarios de los mayas clásicos	19
3. Precesión, Polaris y la Edad de las Pirámides	42
4. La física del carbono-14	69
5. La calibración de las fechas por carbono-14 y la historia del aire	91
6. El carbono-14 y el poblamiento del Nuevo Mundo	113
7. Potasio, argón, ADN y la marcha erguida	128
8. La datación molecular y los muchos tipos de mamíferos diferentes	156
9. Los meteoritos y la edad del Sistema Solar	186
10. Colores, brillos y la edad de las estrellas	213
11. Distancias, desplazamientos hacia el rojo y la edad del universo	239
12. Parametrizando la edad del universo	264
Glosario	295
Índice alfabético	313

