

Reseña

Todos nos equivocamos. Nadie es perfecto. Y eso incluye también a cinco de los más grandes genios de la historia de la ciencia: Charles Darwin, William Thompson, Linus Pauling, Fred Hoyle y Albert Einstein. Sin embargo, sus meteduras de pata fueron fundamentales en su investigación científica y condujeron hacia algunos de los más importantes hallazgos científicos de la historia de la humanidad. Es más, según Mario Livio, la ciencia se basa en el error. Se avanza conforme se desmontan falsas ideas.

Cuando era joven, Albert Einstein trató con insistencia de concebir una forma de describir la evolución del universo basado en la teoría general de la relatividad. No obstante, fue víctima de una noción errónea de simplicidad estética. Fred Hoyle era un eminente astrofísico que ridiculizó una teoría emergente sobre el origen del universo a la que peyorativamente catalogó de «*Big Bang*».

Ambos, junto a Darwin y su teoría de la selección natural, Kelvin y su cálculo erróneo de la edad de la Tierra y Pauling y su modelo fallido de la estructura del ADN, fueron todos ellos hombres geniales y fascinantes. Sus meteduras de pata fueron esenciales en el progreso científico y ayudaron a profundizar en el conocimiento de la evolución de la Tierra, la vida y el universo.

Índice

Prefacio

1. Errores y grandes errores
2. El origen
3. Y con él quienes lo hereden, han de disolverse
4. ¿Qué edad tiene la Tierra?
5. La certidumbre suele ser una ilusión
6. El intérprete de la vida
7. Pero ¿de quién es el ADN?
8. B de Big Bang
9. ¿Lo mismo para toda la eternidad?
10. El «mayor error»
11. A partir del espacio vacío

Coda

Bibliografía

Para Noga y Danielle

Prefacio

Durante el tiempo que dediqué a escribir este libro, alguien me preguntaba cada pocas semanas de qué trataba. Siempre respondía lo mismo: «Trata de errores, ¡pero no es una autobiografía!». Así provocaba algunas risas y la ocasional aprobación: «Qué idea más interesante». Mi objetivo era simple: corregir la impresión de que los grandes avances de la ciencia son historias de éxito redondas. Lo cierto es que nada puede estar más lejos de la verdad. No es tanto que el camino que lleva al triunfo esté jalonado de errores; es que cuanto mayor es el premio, mayor puede ser la metedura de pata.

Hay una cita célebre de Immanuel Kant, el gran filósofo alemán, que dice: «Dos cosas llenan el ánimo de una admiración y un respeto crecientes y renovados cuanto más y con más ahínco reflexionamos sobre ellas: el *cielo estrellado sobre mi cabeza y la ley moral en mi interior*». Desde la publicación de su *Crítica de la razón práctica* (1788), hemos hecho progresos impresionantes en nuestra comprensión de lo primero, pero, en mi humilde opinión, hemos avanzado bastante menos en esclarecer lo segundo. Al parecer, es mucho más difícil conseguir que la vida o la mente sean comprensibles para sí mismas. Con todo, las ciencias de la vida en general, y la investigación sobre el funcionamiento del cerebro humano en particular, están ganando velocidad, y ya no nos parece del todo inconcebible que algún día lleguemos a entender incluso por qué la evolución ha conducido hasta una especie consciente.

Aunque este libro trata de algunos de los más notables empeños por comprender la vida y el cosmos, se ocupa más del viaje que del destino. He intentado centrar mi atención en el proceso del pensamiento y en los obstáculos del camino hacia el descubrimiento antes que en los propios logros.

Son muchas las personas que me han ayudado a lo largo del viaje, algunas tal vez sin saberlo. Gracias a Steve Mojszsis y Reika Yokochi por discusiones sobre temas relacionados con la geología. Mi agradecimiento también para Jack Dunitz, Horace Freeland Judson, Matt Meselson, Evangelos Moudrianakis, Alex Rich, Jack Szostak y Jim Watson por conversaciones sobre química, biología y, especialmente, sobre el trabajo de Linus Pauling. Estoy en deuda con Peter Eggleton, John Faulkner, Geoffrey Hoyle, Jayant Narlikar y lord Martin Rees por sus útiles discusiones sobre astrofísica y cosmología, así como sobre las investigaciones de Fred Hoyle.

Me gustaría expresar mi gratitud también hacia todos los que me proporcionaron algún material valioso para este libro, en particular a Adam Perkins y el personal de la Biblioteca de la Universidad de Cambridge, por materiales sobre Darwin y lord Kelvin; a Mark Hurn, del Instituto de Astronomía de Cambridge, por materiales sobre lord Kelvin y sobre Fred Hoyle; a Amanda Smith, del Instituto de Astronomía de Cambridge, por materiales sobre Fred Hoyle y por procesar fotografías relacionadas con Watson y Crick; a Clifford Meade y Chris Petersen, del Departamento de Colecciones Especiales de la Universidad Estatal de Oregón, por materiales sobre Linus Pauling; a Loma Karklins, de los Archivos de Caltech, por materiales sobre Linus Pauling; a Sarah Brooks, de Nature Publishing Group, por materiales sobre Rosalind Franklin; a Bob Carswell y Peter Hingley por materiales sobre Georges Lemaître de la Real Sociedad Astronómica; a Kathryn McKee, de St. John's College, de Cambridge, por materiales sobre Fred Hoyle; y a Barbara Wolff, de los Archivos de Albert Einstein, a Diana Kormos Buchwald, de Einstein Papers Project, a Daniel Kennefick, de la Universidad de Arkansas, a Michael Simonson, del Instituto Leo Baeck, a Christine Lutz, de la Universidad de Princeton, y a Christine Di Bella, del Instituto de Estudios Avanzados, por materiales sobre Albert Einstein.

Debo un agradecimiento especial a Jill Lagerstrom, Elizabeth Fraser y Amy Gonigam, del Instituto de Ciencia del Telescopio Espacial, y al personal de la

Biblioteca Universitaria de Johns Hopkins, por su continuada ayuda bibliográfica. Gracias también a Sharon Toolan por su asistencia profesional durante la preparación del manuscrito, a Pam Jeffries por la hábil composición de algunos dibujos, y a Zak Concannon por limpiar algunas de las figuras. Como siempre, mi esposa, Sofie, ha sido mi más paciente y comprensiva aliada.

Por último, quiero agradecer a mi agente, Susan Rabiner, sus incansables expresiones de ánimo; a mi editor, Bob Bender, sus reflexivos comentarios; a Loretta Denner, su ayuda durante la corrección de pruebas; y a Johanna Li, su dedicación durante todo el proceso de producción de este libro.

Capítulo 1

Errores y grandes errores

Los grandes errores, como las grandes cuerdas, suelen estar hechas por un gran número de hebras. Tomad el cable hilo a hilo, tomad por separado todos los pequeños motivos determinantes; los romperéis uno tras otro y excluiréis: ¡esto no vale nada! Pero si los trenzáis y torcéis juntos, el resultado es una enormidad.
Victor Hugo, *Los Miserables*

Cuando el voluble Bobby Fischer, posiblemente el jugador más famoso de la historia del ajedrez, se personó por fin en Reikiavik, en Islandia, en el verano de 1972 para enfrentarse a Boris Spassky en el campeonato mundial¹, el nerviosismo era tan denso en el mundo del ajedrez que se podía cortar con un cuchillo. Gente que nunca antes había mostrado el menor interés por el juego se sentía ahora expectante ante lo que ya se conocía como el «duelo del siglo». Sin embargo, en el vigésimo noveno movimiento del primer encuentro, en una posición que parecía conducir a unas tablas, Fischer escogió un movimiento que incluso un ajedrecista aficionado habría rechazado instintivamente como un error. Esta podría haber sido una manifestación típica de lo que se conoce como «ceguera ajedrecística», un error que en la literatura del juego se denota con «??» y que habría supuesto la desgracia para una criatura de cinco años en un club local de ajedrez. Lo más sorprendente era que aquel error lo cometía un hombre que había machacado a sus rivales de camino al enfrentamiento con el ruso Spassky con una extraordinaria secuencia de veinte victorias sucesivas contra los mejores jugadores del mundo. (En la mayoría de los campeonatos

mundiales, es fácil que haya tantas tablas como victorias). ¿Es este tipo de «ceguera» algo que solo ocurre en el ajedrez? ¿O acaso hay otras empresas intelectuales igualmente propensas a los errores sorprendentes?

Oscar Wilde escribió que «la experiencia es el nombre que le damos a nuestros errores». Sin duda todos cometemos muchos en nuestra vida diaria. Nos dejamos las llaves dentro del coche, invertimos dinero en los valores equivocados (o en los buenos, pero en el peor momento), sobreestimamos enormemente nuestra capacidad para realizar múltiples tareas, y a menudo le echamos la culpa de nuestras desgracias a las causas más absolutamente equivocadas. Este error de atribución es, por cierto, una de las razones por las que pocas veces aprendemos de nuestros errores. En todos los casos, por supuesto, nos damos cuenta de los errores solo después de cometerlos; de ahí la definición de Wilde como «experiencia». Además, somos mucho mejores juzgando a los otros que analizándonos a nosotros mismos. En palabras del psicólogo y premio Nobel Daniel Kahneman, «no soy demasiado optimista sobre la capacidad de la gente para cambiar su modo de pensar, pero bastante optimista sobre su capacidad para detectar los errores de los otros».

Incluso procesos construidos con el mayor cuidado y atención, como los relacionados con el sistema de justicia criminal, fallan ocasionalmente, y a veces de la forma más desgarradora. Por ejemplo, Ray Krone, de Phoenix, Arizona², pasó más de diez años entre rejas, sentenciado a la pena de muerte, tras haber sido condenado *dos veces* por un brutal asesinato que no había cometido. Al final fue exculpado totalmente (y el verdadero asesino condenado) gracias a unas pruebas de ADN.

Este libro, sin embargo, no se ocupa de este tipo de errores, por graves que sean, sino de los *errores científicos*. Por «errores científicos» me refiero a errores conceptuales que pueden llegar a poner en peligro grandes esquemas y teorías completas o que, al menos en principio, pueden retrasar el progreso de la ciencia.

La historia humana está repleta de ejemplos de pifias monumentales en un gran abanico de disciplinas. Algunos de estos errores con consecuencias significativas se remontan a las Escrituras, o a la mitología griega. En el libro del Génesis, por ejemplo, el primerísimo de los actos de Eva, la madre bíblica de todos los mortales, fue rendirse a la seductora serpiente y probar la fruta prohibida. Este colosal descuido de su buen juicio condujo nada más y nada menos que a la expulsión de Adán y Eva del Jardín del Edén, y, al menos en la opinión del teólogo del siglo XIII Tomás de Aquino, a que a los humanos nos esté vetado para siempre el conocimiento de la verdad absoluta. En la mitología griega, la desacertada fuga de Paris con la bella Helena, la esposa del rey de Esparta, causó la destrucción total de la ciudad de Troya. Pero estos ejemplos apenas llegan a arañar la superficie. A lo largo de la historia, ni los más renombrados militares ni los filósofos más célebres ni los más originales pensadores estuvieron a salvo de errores calamitosos. Durante la segunda guerra mundial, el mariscal de campo alemán Fedor von Bock repitió estúpidamente el malhadado ataque de Napoleón contra Rusia de 1812. Ambos militares fueron incapaces de valorar el insuperable poder del «General Invierno», el largo y duro invierno ruso para el que tan mal pertrechados estaban. El historiador británico A. J. P. Taylor³ resumió de este modo las calamidades de Napoleón: «Como la mayoría de quienes estudian la historia, [Napoleón] aprendió de los errores del pasado cómo cometer otros nuevos».

En el ámbito de la filosofía, las ideas erróneas del gran Aristóteles (como la de creer que todos los cuerpos se mueven hacia su lugar «natural») erraron el blanco tanto como las desatinadas predicciones de Karl Marx sobre el fin del capitalismo. De igual manera, muchas de las especulaciones psicoanalíticas de Sigmund Freud, ya fuese sobre el «instinto mortal» —un supuesto impulso a regresar a un estado de sosiego anterior a la vida— ya sobre el papel de un pueril complejo de Edipo en las neurosis de las mujeres, han resultado ser patéticamente equivocadas, por decirlo con suavidad.

El lector pensará que, de acuerdo, la gente comete errores, pero que sin duda cuando se trata de algunos de los grandes *científicos* de los dos últimos siglos, como Linus Pauling, dos veces galardonado con el premio Nobel, o el formidable Albert Einstein, al menos habrán acertado en las teorías por las que hoy más los conocemos. ¿O no? Al fin y al cabo, ¿no radica la gloria de los tiempos modernos precisamente en el establecimiento de la ciencia como una disciplina científica, y de las matemáticas a prueba de errores como el «lenguaje» de la ciencia fundamental? Entonces, ¿se libraron realmente las teorías de estas mentes ilustres y de otros pensadores comparables de los errores más graves? ¡En absoluto!

El propósito de este libro es presentar de manera detallada algunos de los errores más sorprendentes de algunos científicos de auténtica talla, y seguir las consecuencias inesperadas de esos errores. Al mismo tiempo, me propongo analizar las posibles causas de esos errores y, en la medida que sea posible, desvelar las fascinantes relaciones entre aquellos errores y las características o limitaciones de la mente humana. En último término, sin embargo, confío en poder demostrar que el camino hacia el descubrimiento y la innovación puede construirse incluso a lo largo del improbable sendero de los errores.

Como veremos, las delicadas hebras de la evolución se entretrejen en todos los errores concretos que he seleccionado para explorar a fondo en este libro. Así, me ocuparé de grandes errores relacionados con las teorías de la evolución de la vida en la Tierra, de la evolución de la propia Tierra y de la evolución de todo nuestro universo.

Los errores de la evolución y la evolución de los errores

Una de las definiciones de la palabra «evolución» en el *Oxford English Dictionary* dice así: «Desarrollo o crecimiento, según sus tendencias inherentes, de cualquier cosa que pueda compararse con un organismo vivo... También, el surgimiento o generación de cualquier cosa por desarrollo

natural, a diferencia de su producción por un acto específico». No es este el significado original de la palabra. En latín, *evolutio* se refería a desenrollar y leer de un libro en forma de rollo. Incluso cuando la palabra comenzó a hacerse popular en biología, al principio solo se utilizaba para describir el crecimiento de un embrión. La primera utilización de la palabra «evolución» en el contexto del origen de las especies se encuentra en los escritos del naturalista suizo del siglo XVIII Charles Bonnet, quien sostenía que Dios había preorganizado el nacimiento de nuevas especies en los gérmenes de las primeras formas de vida que había creado.

A lo largo del siglo XX, la palabra «evolución» ha quedado tan íntimamente vinculada al nombre de Darwin que a más de uno le extrañará descubrir que en la primera edición, de 1859, de su obra maestra, *El origen de las especies*, Darwin no menciona la palabra «evolución» ¡ni siquiera una vez! Aun así, la última palabra de *El origen* es «evolucionado»⁴.

Desde la publicación de *El origen*, la evolución ha asumido el significado más amplio de la definición que hemos reproducido más arriba, de manera que hoy podemos hablar de la evolución de cosas tan diversas como la lengua inglesa, la moda, la música, las opiniones, además de la evolución cultural, la evolución de los programas informáticos, etc. (Basta con ver cuántas páginas web se dedican a «la evolución de los *hipster*»)⁵. El presidente Woodrow Wilson⁶ hacía hincapié en que la manera correcta de entender la Constitución de Estados Unidos era por medio de la evolución: «El gobierno no es una máquina, sino un ser vivo [...] Rinde cuentas a Darwin, no a Newton».

Que centre mi atención en la evolución de la vida, la Tierra y el universo no debe interpretarse como indicación de que estos sean los únicos ámbitos en los que se ha metido la pata. Si he escogido estos temas concretos es por dos razones principales. La primera es que deseaba hacer una revisión crítica de los errores cometidos por algunos de los estudiosos que casi todos situamos en las primeras líneas de nuestra lista de grandes mentes. Las pifias de tamañas luminarias, aunque sean de un siglo pasado, son

extraordinariamente relevantes para las cuestiones que se plantean hoy los científicos (y, de hecho, la gente en general). Como espero poder mostrar, el análisis de estos errores conforma un cuerpo de conocimiento vivo que resulta cautivador por derecho propio, pero que también puede utilizarse para guiar las acciones en ámbitos tan dispares como la práctica científica y el comportamiento ético. La segunda razón es simple: las cuestiones relacionadas con la evolución de la vida, la Tierra y el universo han intrigado a los humanos (y no solo a los científicos) desde los albores de la civilización y han inspirado incansables indagaciones para desvelar nuestros orígenes y nuestro pasado. La curiosidad intelectual de los humanos hacia estas cuestiones se encuentra, al menos en parte, en las raíces de las creencias religiosas, de los relatos mitológicos de la creación y de las indagaciones filosóficas. Además, la vertiente más empírica, más basada en la evidencia, de esta curiosidad es lo que con el tiempo condujo al nacimiento de la ciencia. Los progresos que ha realizado la humanidad al descifrar algunos de los complejos procesos que intervienen en la evolución de la vida, la Tierra y el cosmos son poco menos que milagrosos. Resulta difícil de creer, pero hoy pensamos que podemos reconstruir la evolución cósmica hasta el momento en que la edad de nuestro universo era de apenas una fracción de segundo. Aun así, nos quedan muchas preguntas por responder, y la pregunta de la evolución sigue siendo un tema candente aún en nuestros días.

Me llevó bastante tiempo decidir a cuáles de los grandes científicos debía incluir en este periplo por profundas aguas intelectuales y prácticas, pero al final me decanté por los errores de cinco personajes. Mi lista de «cometedores de errores» sorprendentes incluye al celebrado naturalista Charles Darwin; al físico lord Kelvin (el mismo que da nombre a una escala de temperatura); a Linus Pauling, uno de los químicos más influyentes de la historia; al famoso astrofísico y cosmólogo inglés Fred Hoyle; y a Albert Einstein, que no requiere presentación. En cada uno de los casos, abordé el tema central desde dos perspectivas bastante distintas, aunque

complementarias. Por un lado, este es un libro sobre algunas de las teorías de estos grandes sabios y sobre las fascinantes relaciones entre esas teorías, examinadas en parte desde el punto de vista inusual de sus debilidades y, en algunos casos, incluso de sus fallos. Por otro lado, examinaré brevemente los diversos tipos de errores e intentaré identificar sus causas psicológicas (y, a ser posible, neurocientíficas). Como veremos, no todos los errores son iguales, y de hecho los cometidos por los cinco científicos de mi lista son de naturaleza bastante distinta. El error de Darwin consistió en no comprender las verdaderas implicaciones de una hipótesis determinada. Kelvin erró por ignorar posibilidades imprevistas. La pifia de Pauling fue el resultado de un exceso de confianza nacido de sus éxitos anteriores. Hoyle se equivocó en su obstinada defensa de la disconformidad con la corriente mayoritaria de la ciencia. Einstein falló a causa de un sentido equivocado de lo que constituye la simplicidad estética. Lo principal, en cualquier caso, es que a lo largo del camino descubriremos que los errores no solo son inevitables sino que constituyen una parte esencial del progreso de la ciencia. El desarrollo de la ciencia no es una andadura directa hacia la verdad. De no ser por los falsos inicios y los callejones sin salida, los científicos llegarían demasiado lejos por caminos equivocados. Todos los errores que se describen en este libro han actuado de un modo u otro como catalizadores de progresos realmente revolucionarios, de ahí que los describa como «errores geniales». Sirvieron para disipar la niebla por la que avanzaba la ciencia, con su habitual sucesión de pasos pequeños ocasionalmente jalonados por saltos espectaculares.

He organizado el libro de modo que, para cada uno de los científicos, primero presento la *esencia* de algunas de las teorías por las que es más conocido. Se trata de resúmenes concisos que tienen el propósito de servir de introducción a las ideas de estos maestros y de proporcionar el contexto apropiado para los errores, pero que no pretenden ser descripciones cabales de sus respectivas teorías. Además, he decidido centrarme en cada caso en *uno* solo de sus errores en lugar de pasar revista a la lista de todas las pifias

que estos sabios pueden haber cometido a lo largo de sus largas carreras. Comenzaré con el hombre de quien el *New York Times* escribió acertadamente en su obituario (publicado el 21 de abril de 1882) que «ha dado mucho que leer, pero más aún ha dado que hablar».

Capítulo 2

El origen

Hay grandeza en esta visión de que la vida, con sus diversas potencias, haya sido alentada en su origen en unas pocas formas o en una sola, y que mientras este planeta ha seguido girando de acuerdo con la ley fija de la gravedad, a partir de tan simple principio hayan evolucionado y evolucionen todavía formas innumerables, las más bellas y maravillosas.

Charles Darwin

Lo más sorprendente de la vida en la Tierra es su prodigiosa diversidad. Durante un paseo casual de una tarde de primavera es muy probable que nos encontremos con varios tipos de pájaros, muchos insectos, quizá una ardilla, unas cuantas personas (algunas acompañadas por sus perros) y una gran variedad de plantas. Incluso en lo que respecta a las propiedades más fáciles de discernir, los organismos de la Tierra difieren en tamaño, color, forma, hábitat, alimento y capacidades. En un extremo están las bacterias, con una longitud de apenas una centésima de milésima de un centímetro, y en el otro las ballenas azules, de más de 30 metros de largo. Entre los miles de especies descritas de los moluscos marinos que se conocen con el nombre de nudibranchios, muchas tienen un aspecto de lo más anodino mientras que otras exhiben algunos de los colores más suntuosos que se puedan ver entre los seres vivos de la Tierra. Las aves pueden volar hasta una altitud extraordinaria en la atmósfera: el 29 de noviembre de 1975⁷, un gran buitre

fue succionado por un motor a reacción a una altura de 11 500 metros sobre Costa de Marfil, en África occidental. Otras aves, como los ánsares indios o los cisnes cantores, durante sus migraciones suelen volar a más de 7000 metros. Para no ser menos, los organismos marinos alcanzan récords parecidos de profundidad. El 23 de enero de 1960, el explorador Jacques Piccard⁸ y el lugarteniente Don Walsh de la marina de Estados Unidos batieron un récord al descender lentamente en un vehículo especial llamado batiscafo hasta el lugar más profundo del océano Pacífico, la Fosa de las Marianas, al sur de Guam. Cuando por fin tocaron fondo a la profundidad récord de 10 912 metros, quedaron anonadados al descubrir a su alrededor un nuevo tipo de gamba abisal a la que no parecía molestar en absoluto la presión de 1157 atmósferas. El 26 de marzo de 2012, el director de cine James Cameron alcanzó el punto más hondo de la Fosa de las Marianas en un submarino especialmente diseñado. Lo describió como un paisaje gelatinoso tan desolado como la Luna. Sin embargo, también dijo haber visto unos organismos con aspecto de camarón de no más de dos o tres centímetros de longitud.

Nadie sabe a ciencia cierta cuántas especies viven en la Tierra en la actualidad. Un catálogo reciente⁹, publicado en septiembre de 2009, formalmente describe y da nombre a alrededor de 1,9 millones de especies. Pero como la mayoría de las especies son microorganismos o invertebrados de muy pequeño tamaño, muchos de ellos difíciles de observar o capturar, la mayoría de las estimaciones del número total de especies no pasan de ser conjeturas más o menos informadas. Por lo general, las estimaciones varían entre 5 millones y alrededor de 100 millones de especies diferentes, aunque se considera probable una cifra de entre 5 y 10 millones. (El estudio más reciente predice¹⁰ alrededor de 8,7 millones). Esta gran incertidumbre no puede sorprender a nadie que comprenda que una cucharada de la tierra que pisamos¹¹ puede albergar muchos miles de especies de bacterias.

La segunda cosa sorprendente que caracteriza la vida en la Tierra, además de su diversidad, es el increíble grado de *adaptación* que demuestran tanto plantas como animales. Desde el hocico alargado del oso hormiguero y la larga y veloz lengua del camaleón (capaz de golpear a su presa en apenas ¡30 milésimas de segundo!), al potente pico del pájaro carpintero, de forma tan característica, o la lente del ojo de un pez, los seres vivos parecen amoldarse perfectamente a los requerimientos que les impone la vida. No solo las abejas están construidas de tal manera que su cuerpo se aloja confortablemente en las flores de las plantas de las que extraen el néctar, sino que las propias plantas se aprovechan de las visitas de estas abejas para su propia propagación pegando su polen al cuerpo y las patas de las abejas, que así lo transportan a otras flores.

Hay muchas especies biológicas distintas que viven gracias a una portentosa interacción del tipo de «ráscame la espalda y yo te la rasco a ti»: una *simbiosis*. El pez payaso¹², por ejemplo, habita entre los urticantes tentáculos de la anémona magnífica. Los tentáculos protegen al pez payaso de sus depredadores, y el pez devuelve el favor escudando a la anémona de otros peces que se alimentan de ellas. Una mucosidad especial del cuerpo del pez lo protege de los venenosos tentáculos de su hospedador, perfeccionando así esta armónica adaptación. Las relaciones de mutualismo se han desarrollado incluso entre bacterias y animales. Por ejemplo, en las chimeneas hidrotermales del fondo marino se encontraron unos mejillones bañados por los fluidos ricos en hidrógeno; si vivían allí era gracias a que alojaban y explotaban una población interna de bacterias que consumían hidrógeno. De modo parecido, se descubrió que una bacteria del género *Rickettsia* confería ventajas para la supervivencia de la mosquita blanca del boniato, y de paso para la suya propia.

Por cierto que un ejemplo popular de una relación simbiótica extraordinaria probablemente no pase de mito. Muchos textos describen la relación recíproca entre el cocodrilo del Nilo y una pequeña ave conocida como pluvial

o chorlito egipcio. Según el filósofo griego Aristóteles¹³, cuando el cocodrilo bosteza, esta pequeña ave «vuela hasta el interior de su boca y le limpia los dientes», con lo que el pluvial consigue alimento y el cocodrilo «obtiene alivio y bienestar». Una descripción parecida¹⁴ aparece también en la influyente *Historia Natural* de Plinio el Viejo, un filósofo natural del siglo I. Sin embargo, no disponemos de una sola observación de esta simbiosis en la literatura científica moderna, ni existe tampoco ninguna fotografía o filmación que documente este comportamiento. Tal vez no debiera sorprendernos tanto si tenemos en cuenta el cuestionable historial de Plinio el Viejo: ¡muchas de sus afirmaciones científicas resultaron ser erróneas!

La prolífica diversidad, unida al intrincado encaje y adaptación de una prodigiosa riqueza de formas de vida, convencieron a muchos teólogos naturales, desde Tomás de Aquino en el siglo XIII a William Paley en el siglo XVIII, de que la vida en la Tierra requería la mano experta de un arquitecto supremo. Ideas como estas ya hicieron su aparición en el primer siglo de nuestra era. El famoso orador romano Marco Tulio Cicerón¹⁵ argumentaba que el mundo natural tenía que haber surgido de alguna «razón» natural:

Y si la estructura del mundo en todas sus partes es tal que no podría haber sido mejor ni en cuanto a utilidad ni en cuanto a belleza [...] Si, pues, los productos de la naturaleza son mejores que los del arte y si el arte no produce nada sin la ayuda de la razón, tampoco se puede pensar que la naturaleza carezca de razón.

Cicerón fue también el primero en recurrir a la metáfora del relojero que más tarde se convertiría en el argumento clave a favor de un «diseñador inteligente». En palabras de Cicerón:

Cuando ves una estatua o una pintura, reconoces allí la mano o presencia del arte; cuando ves a distancia marchar una nave no vacilas en suponer que su movimiento es guiado por la

razón y por el arte; cuando miras a un reloj de sol o a una clepsidra, infieres que eso te indica el tiempo gracias al arte y no por casualidad; ¿cómo puede, pues, ser lógico o consecuente suponer que el mundo, que incluye en sí las obras de arte de que hablamos, los artífices que las hicieron, y cualquier otra cosa además, pueda carecer de plan y razón?

Esta fue precisamente la argumentación adoptada por William Paley¹⁶ casi dos mil años más tarde: un invento implica un inventor del mismo modo que un diseño implica un diseñador. Un complicado reloj, sostenía Paley, es testimonio de la existencia de un relojero. Por consiguiente, ¿no deberíamos concluir lo mismo sobre algo tan exquisito como la vida? Al fin y al cabo, «Toda indicación de un artilugio, toda manifestación de un diseño, que existe en el reloj, existe en la obra de la naturaleza; con la diferencia, en el caso de la naturaleza, de ser más y mayor, y ello en un grado que supera todo cálculo». Esta ferviente defensa de la necesidad imperativa de un «diseñador» (pues se consideraba que la única pero inaceptable alternativa era la casualidad o el azar) convenció a muchos filósofos naturales casi hasta el principio del siglo XIX.

Implícito en el argumento del diseño había aun otro dogma: se creía que las especies eran absolutamente *inmutables*. La idea de la existencia eterna hundía sus raíces en una larga cadena de convicciones sobre otras entidades que se consideraban resistentes e inalterables. En la tradición aristotélica, por ejemplo, la esfera de las estrellas fijas se suponía totalmente inviolable. Solo en tiempos de Galileo esta idea se hizo añicos del todo con el descubrimiento de estrellas «nuevas» (que en realidad eran *supernovas*, estrellas viejas que habían explotado). Los impresionantes progresos de la física y la química durante los siglos XVII y XVIII llevó a pensar, sin embargo, que algunas esencias eran ciertamente más básicas y más permanentes que otras, y que unas pocas, en la práctica, podían

considerarse casi eternas. Así, se comprendió que elementos químicos como el oxígeno y el carbono eran constantes (al menos a lo largo de la historia humana) en sus propiedades básicas; que el oxígeno que respiró Julio César era idéntico al que exhaló Isaac Newton. De igual modo, las leyes del movimiento y de la gravitación formuladas por Newton se aplicaban a todo, desde la caída de las manzanas a las órbitas de los planetas, y parecían ser decididamente inmutables.



Figura 1

Sin embargo, a falta de directrices claras sobre cómo determinar qué cantidades o conceptos naturales eran verdaderamente fundamentales y cuáles no lo eran (pese a algunos esforzados intentos por parte de físicos como John Locke, George Berkeley y David Hume), muchos de los naturalistas del siglo XVIII optaron simplemente por adoptar la antigua concepción griega de las especies ideales e inmutables.

Estas eran las corrientes y mareas de pensamiento que prevalecían acerca de la vida hasta que un hombre tuvo el desparpajo, la visión y la comprensión profunda que le permitieron tejer, con un enorme ovillo de hilos dispares, un magnífico tapiz. Este hombre fue Charles Darwin (que en la figura 1 aparece hacia el final de su vida), y su gran concepto unificador se ha convertido en la más inspiradora teoría no matemática de la humanidad. Darwin literalmente transformó las ideas sobre la vida en la Tierra de un mito en una ciencia.

Revolución

La primera edición de la obra de Darwin¹⁷ *El origen de las especies*, se publicó el 24 de noviembre de 1859 en Londres, y aquel día la biología cambió para siempre. (La figura 2 muestra la página del título de la primera edición; Darwin se refería a su obra como «mi hija» tras su publicación). Antes de adentrarnos en las argumentaciones centrales de *El origen*, es importante entender qué *no* se discute en ese libro. Darwin no dice ni siquiera una sola palabra sobre el *origen* real de la vida o sobre la *evolución* del universo en su conjunto. Además, en contra de algunas creencias populares, tampoco discute en absoluto la evolución de los seres humanos, salvo en un párrafo profético y optimista hacia el final del libro, en el que dice: «En el futuro lejano veo cómo se abren los campos a investigaciones más importantes. La psicología se sostendrá sobre un nuevo cimiento, el de la necesaria adquisición de cada potencia y capacidad mental de manera gradual. Se arrojará luz sobre el origen del hombre y sobre su historia»¹⁸. Solo en un libro posterior, *El origen del hombre y la selección en relación al sexo*, que se publicó una docena de años después de *El origen*, decidió Darwin dejar claro que creía que sus ideas sobre la evolución también se aplicaban a los humanos. En realidad fue mucho más concreto, llegando a la conclusión de que los humanos eran los descendientes naturales de alguna

especie simiesca que probablemente viviera en los árboles del «Viejo Mundo» (África):

Llegamos así a conocer que el hombre¹⁹ desciende de un cuadrúpedo peludo y con cola, probablemente de hábito arbóreo, que vivía en el Viejo Mundo. Si un naturalista examinara toda la estructura de esta criatura, la clasificaría entre los cuadrumanos [primates con cuatro manos, como los simios] con tanta seguridad como a los progenitores, aún más antiguos, de los monos del Viejo y del Nuevo Mundo.

No obstante, la mayor parte del trabajo intelectual de peso sobre la evolución ya se había hecho en *El origen*. De un solo golpe, Darwin había acabado con el concepto de diseño, había disipado la idea de que las especies fuesen eternas e inmutables, y había propuesto un mecanismo que permitía explicar la adaptación y la diversidad.

En términos sencillos, la teoría de Darwin está constituida por cuatro pilares²⁰ principales sostenidos por un singular mecanismo. Los pilares son: *evolución, gradualismo, descendencia común y especiación*. El mecanismo crucial que mueve todo y enlaza estos elementos dispares para que cooperen es la *selección natural*, que, como hoy sabemos, está complementada hasta cierto punto por unos pocos mecanismos más de cambio evolutivo, algunos de los cuales Darwin no podía haber llegado a conocer.

Veamos de manera muy sucinta en qué consisten los distintos componentes de la teoría de Darwin. La descripción seguirá las ideas propias de Darwin más que una versión moderna y actualizada de estos conceptos. No obstante, en algunos momentos será prácticamente imposible eludir la presentación de observaciones y pruebas acumuladas desde los tiempos de Darwin.

Como descubriremos en el próximo capítulo, sin embargo, Darwin cometió un grave error que podría haber invalidado completamente su idea más nueva e importante, la de la selección natural. La raíz del error no fue culpa de Darwin, puesto que nadie en el siglo XIX entendía la genética, pero

Darwin no llegó a comprender que la teoría genética con la que trabajaba era letal para el concepto de selección natural.

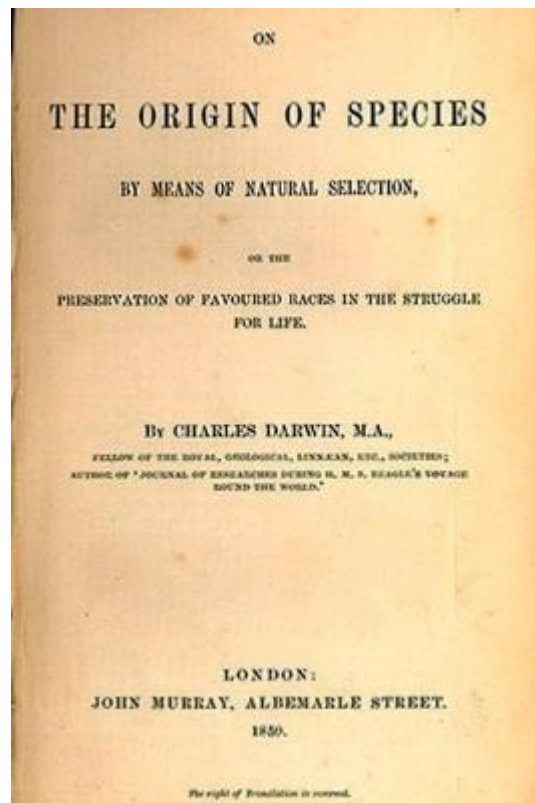


Figura 2

El primer aspecto esencial de la teoría es la propia evolución. Aunque algunas de las ideas de Darwin sobre la evolución tenían un historial más antiguo²¹, los naturalistas franceses e ingleses que lo precedieron (entre los que destacan figuras como Pierre-Louis Moreau de Maupertuis, Jean-Baptiste Lamarck, Robert Chambers y el propio abuelo de Darwin, Erasmus Darwin) no lograron proponer un mecanismo convincente que explicara la evolución. He aquí cómo describía la evolución el propio Darwin: «La concepción que sostiene la mayoría de los naturalistas, y que yo mismo he sostenido, a saber, que cada especie fue creada de manera independiente, es errónea. Estoy plenamente convencido de que las especies no son inmutables, sino que aquellas que pertenecen a lo que conocemos como los mismos géneros

son descendientes lineales de otras especies, por lo general extintas». En otras palabras, las especies que vemos hoy no existieron siempre. Son descendientes de otras especies anteriores que se extinguieron. Los biólogos modernos tienden a distinguir entre *microevolución* y *macroevolución*²². La microevolución comprende cambios pequeños (como los que a veces se observan en bacterias) que son el resultado del proceso evolutivo a lo largo de periodos de tiempo relativamente cortos, por lo general dentro de poblaciones locales. La macroevolución se refiere a los resultados de la evolución a lo largo de escalas temporales más amplias y por lo general entre especies, y puede incluir también episodios de extinción en masa, como el que acabó con los dinosaurios. Durante los años transcurridos desde la publicación de *El origen*, la idea de la evolución se ha convertido en el principio director de toda la investigación de las ciencias de la vida, hasta tal punto de que en 1973 Theodosius Dobzhansky, uno de los biólogos evolutivos más eminentes del siglo XX, publicó un ensayo titulado «Nada en la biología tiene sentido si no es a la luz de la evolución»²³. Al final de su artículo, Dobzhansky observaba que el jesuita y filósofo francés del siglo XX Pierre Teilhard de Chardin «era un creacionista, pero entendía que en este mundo la Creación se realiza por medio de la evolución».

Darwin tomó prestada la idea plasmada en su segundo pilar, la del gradualismo, principalmente de los trabajos de dos geólogos. Uno fue el geólogo del siglo XVIII James Hutton, y el otro fue Charles Lyell, un coetáneo de Darwin que llegaría a ser un amigo cercano. El registro geológico mostraba patrones formados por bandas horizontales que cubrían grandes áreas geográficas. Esto, unido al descubrimiento de distintos fósiles dentro de estas bandas, sugería una progresión de cambio paulatino. Hutton y Lyell fueron los principales responsables de la formulación de la moderna teoría del *uniformitarianismo*²⁴, la idea de que las tasas con las que ocurren procesos como la erosión y la sedimentación en el presente son parecidas a las del pasado. (Volveremos a ver este concepto en el capítulo 4, cuando

hablemos de lord Kelvin). Darwin argumentó que del mismo modo que la acción geológica modela la Tierra de forma lenta pero segura, los cambios evolutivos son el resultado de transformaciones que se extienden a cientos de miles de generaciones. Por consiguiente, uno no debería esperar ver alteraciones significativas en menos de decenas de miles de años, salvo tal vez en organismos que se multiplican con mucha frecuencia, como las bacterias, las cuales, como hoy sabemos, pueden desarrollar resistencia a los antibióticos en periodos verdaderamente breves. En contra del uniformitarianismo, sin embargo, la tasa de los cambios evolutivos por lo general no es uniforme a lo largo del tiempo para una especie determinada, y puede variar aún más de una especie a otra. Como veremos más adelante, es la presión ejercida por la selección natural lo que determina de manera más importante lo rápido que se manifiesta la evolución. Algunos «fósiles vivientes», como la lamprea²⁵ (un vertebrado marino sin mandíbulas, con la boca en forma de embudo), no parece que hayan evolucionado apenas en 360 millones de años. Como digresión fascinante, debo observar que la idea del cambio gradual ya la había propuesto en el siglo XVII el filósofo empiricista John Locke, quien escribió con clarividencia que «los límites de las especies, los que utiliza el hombre para clasificarlas, están hechos por los propios hombres».

El siguiente pilar de la teoría de Darwin, el concepto de un *antepasado común*²⁶, es lo que en su encarnación moderna se ha convertido en el principal motivador de todas las búsquedas realizadas en nuestros días del origen de la vida. Darwin primero argumentó que no hay duda de que todos los miembros de cualquier clase taxonómica, por ejemplo, todos los vertebrados, se originaron a partir de un antepasado común. Pero su imaginación lo llevó mucho más lejos que esta idea. Aunque su teoría precedía a cualquier conocimiento de que todos los organismos vivos comparten características tales como su código de ADN, un pequeño número de aminoácidos y la molécula que sirve de moneda de cambio en la

producción de energía, Darwin todavía tuvo el coraje de proclamar: «La analogía me llevaría a dar un paso más, a creer que todos los animales y las plantas descendieron de algún prototipo único». Luego, tras reconocer con prudencia que «la analogía puede ser una guía engañosa», concluyó de todos modos que «probablemente todos los seres orgánicos que hayan vivido en algún momento sobre la Tierra descendieron de alguna forma primordial, a la que en un principio se infundió la vida».

Uno se preguntará, sin embargo, que si toda la vida de la Tierra tuvo su origen en un único antepasado común, ¿de qué manera surgió la extraordinaria diversidad que vemos? Al fin y al cabo, esa es la primera característica de la vida que nos ha parecido que requería una explicación. Darwin no se amilanó y cogió el toro por los cuernos; no es ninguna casualidad que el título de su obra lleve la palabra «especies». En la solución de Darwin al problema de la diversidad²⁷ intervenía otra idea original: la de la ramificación, o especiación. Darwin razonó que la vida debía haber comenzado a partir de un antepasado común del mismo modo que un árbol tiene un único tronco. De la misma manera que de un tronco nacen ramas, que luego se dividen en otras más pequeñas, el «árbol de la vida»²⁸ evolucionó por medio de muchos eventos de ramificación, creando especies distintas en cada uno de los nodos de bifurcación. Muchas de estas especies se extinguieron, igual que se rompen y mueren las ramas de un árbol. Sin embargo, como en cada ramificación se duplica el número de especies descendientes de un antepasado, el número de especies distintas puede crecer enormemente. Pero ¿cuándo se produce la especiación? De acuerdo con las teorías actuales, sobre todo cuando un grupo de miembros de una especie determinada queda separado geográficamente. Por ejemplo, un grupo puede desplazarse hacia la vertiente lluviosa de una cadena de montañas mientras el resto de la especie se queda en el vertiente seca. Con el tiempo, estos ambientes tan distintos dan lugar a vías evolutivas diferentes que, tarde o temprano, conducen a dos poblaciones que ya no se

pueden reproducir entre ellas, o lo que es lo mismo, son especies distintas. En algunas ocasiones más raras, la especiación podría crear especies nuevas que surgen del cruce entre dos especies. Parece que así ocurrió en el caso del gorrión alpino²⁹, que en 2011 se demostró que era genéticamente intermedio entre el gorrión moruno y el gorrión común. El gorrión alpino y el moruno se comportan como especies bien diferenciadas, pero el gorrión alpino y el común forman zonas híbridas allí donde coinciden las áreas de distribución de las dos especies.

Curiosamente, en 1945, al escritor Vladimir Nabokov³⁰, autor de *Lolita* y de *Fuego pálido*, se le ocurrió una hipótesis revolucionaria para explicar la evolución de un grupo de mariposas diurnas, *Polyommatus* y afines, popularmente conocidas como niñas. Nabokov, que siempre cultivó un interés por la mariposas, especuló que estas habían llegado al Nuevo Mundo desde Asia en una serie de oleadas que se sucedieron a lo largo de varios millones de años. Para su sorpresa, en 2011 un grupo de científicos confirmó la conjetura de Nabokov con la ayuda de tecnología de secuenciación. Lo que estos científicos descubrieron fue que las especies del Nuevo Mundo compartían un antepasado común que vivió hace unos diez millones de años, pero que muchas especies del Nuevo Mundo estaban más emparentadas con mariposas del Viejo Mundo que con sus vecinas.

Darwin era lo bastante consciente de la importancia que revestía el concepto de especiación para su teoría como para incluir un diagrama esquemático de su árbol de la vida. (La figura 3 muestra el bosquejo original de su cuaderno de notas de 1837). De hecho, esta es la única figura que aparece en todo el libro. ¡Lo más fascinante es que Darwin escribió un cauteloso «Esto creo» en lo alto de la página!

En muchos casos, los biólogos evolutivos han podido identificar la mayoría de los pasos intermedios de un proceso de especiación, desde pares de especies que probablemente se hayan escindido a partir de una sola especie, a pares de especies que están casi a punto de ser empujadas a separarse. A un nivel

de más detalle, una combinación de datos moleculares y paleontológicos ha permitido dibujar, por ejemplo, un árbol filogenético³¹ con una resolución y datación relativamente finas de todas las familias de mamíferos actuales o extinguidos en tiempos muy recientes.

Llegados a este punto no puedo evitar una digresión para hacer notar que desde mi perspectiva personal hay otro aspecto de las ideas sobre un antepasado común y sobre la especiación que hace que la teoría de Darwin sea verdaderamente singular. Hace más o menos una década, mientras trabajaba en el libro *The Accelerating Universe*³², intentaba identificar los ingredientes que hacen que una teoría física del universo sea «bella» a los ojos de los científicos. Al final, llegué a la conclusión de que dos de los constituyentes absolutamente esenciales eran la *simplicidad* y algo que se conoce como *principio copernicano*. (En el caso de la física, el tercer ingrediente es la *simetría*). Por «simplicidad» me refiero al reduccionismo³³, en el sentido en que lo entiende la mayoría de los físicos: la capacidad de explicar tantos fenómenos como sea posible con el menor número de leyes posible. Esta ha sido siempre, y lo sigue siendo, la meta de la física moderna. Los físicos no se quedan satisfechos con una teoría extraordinariamente buena del mundo subatómico (la mecánica cuántica) y otra igualmente buena para el universo a gran escala (la relatividad general), sino que querrían tener una «teoría de todo» unificada que dé cuenta de todo el conjunto.

El principio copernicano debe su nombre al astrónomo polaco Nicolás Copérnico, que en el siglo XVI expulsó a la Tierra de la posición privilegiada que ocupaba en el centro del universo. Las teorías que obedecen el principio de Copérnico no requieren que los humanos ocupen ningún lugar especial para que las teorías funcionen.



Figura 3

Copérnico nos enseñó que la Tierra no es el centro del sistema solar, y todos los hallazgos posteriores de la astronomía no han hecho más que reforzar nuestra convicción de que, desde una perspectiva física, los humanos no desempeñamos ningún papel especial en el cosmos. Vivimos en un planeta diminuto que da vueltas en torno a una estrella normal y corriente de una galaxia que contiene cientos de miles de millones de estrellas parecidas. Nuestra insignificancia física va aún más lejos. No solo hay unos doscientos mil millones de galaxias en el universo, sino que, además, la materia ordinaria, la sustancia de la que estamos hechos nosotros y las estrellas y el gas de todas las galaxias, no constituye mucho más del 4 por ciento de toda la energía que contiene el universo. O sea, que no tenemos nada de especial. (En el capítulo 11 me ocuparé de algunas ideas que sugieren que tampoco deberíamos llevar demasiado lejos la humildad copernicana).

Tanto el reduccionismo como el principio copernicano son auténticas características de la teoría de la evolución de Darwin. Con una concepción unificada, Darwin nos explicó casi todo lo concerniente a la vida en la Tierra (salvo su origen). Difícilmente se puede ser más reduccionista. Pero, además, su teoría era copernicana hasta la médula. Los humanos evolucionaron del mismo modo que cualquier otro organismo. En la analogía del árbol, todas las yemas jóvenes están separadas del tronco principal por un número parecido de nodos de bifurcación; solo difieren en que apuntan en direcciones distintas. De manera equivalente, en el esquema evolutivo de Darwin, todos los organismos vivos en la actualidad, incluidos los humanos, son el producto de rutas evolutivas parecidas. Los humanos decididamente no ocupan un lugar excepcional o único en este esquema: no son los señores de la creación, sino producto de la adaptación y el desarrollo a partir de sus antepasados en la Tierra. Este fue el fin del «antropocentrismo absoluto». Todos los seres vivos de la Tierra forman parte de la misma gran familia. En palabras del influyente biólogo evolutivo Stephen Jay Gould, «la evolución darwiniana es más un arbusto que una escalera». En buena medida, lo que durante más de 150 años ha alimentado la oposición a Darwin ha sido precisamente ese temor a que la teoría de la evolución expulse a los humanos del pedestal sobre el que ellos mismos se han colocado. Darwin nos ha obligado a repensar la naturaleza del mundo y de los humanos. Fijémonos en que en un esquema en el que solo sobreviven los «mejor adaptados» (como enseguida discutiremos en el contexto de la selección natural), uno podría argumentar que los insectos claramente han sobrepasado a los humanos, puesto que son muchos más. Suele citarse a este respecto al genetista británico J. B. S. Haldane³⁴ quien (posiblemente la historia sea apócrifa) le replicó a un teólogo que le acababa de preguntar si a partir del estudio de la creación se podía concluir algo sobre el Creador, con la observación de que Dios «siente debilidad por los escarabajos». Hoy sabemos que incluso en términos del tamaño del genoma (el conjunto de la

información que se hereda), los humanos, se crea o no, nos quedamos por debajo de un ameboide de agua dulce³⁵ llamado *Polychaos dubium*. Con 670 miles de millones de pares de bases de ADN según las mediciones actuales, el genoma de este microorganismo podría ser ¡más de doscientas veces mayor que el genoma humano!

La teoría de Darwin, por consiguiente, satisface ampliamente los dos criterios aplicables (que debo admitir que son un tanto subjetivos) para que una teoría sea realmente hermosa. No es de extrañar, entonces, que *El origen* haya instigado el que tal vez sea el cambio más drástico del pensamiento jamás provocado por un tratado científico.

Volviendo ahora a la teoría en cuestión, Darwin no estaba satisfecho con hacer afirmaciones sobre los cambios evolutivos y la producción de la diversidad. Creía que su principal tarea consistía en explicar *cómo* se habían producido esos procesos. Para alcanzar su meta, tuvo que concebir una alternativa convincente al creacionismo que explicase el aparente diseño de la naturaleza. Su idea, la selección natural, ha sido considerada por el filósofo Daniel C. Dennett, de la Universidad Tufts, como nada menos que «la mejor idea que nadie haya tenido jamás».

La selección natural

Uno de los retos que planteaba el concepto de la evolución concernía a la adaptación, es decir, la observación de que las especies parecen estar en perfecta armonía con su ambiente, y del ajuste mutuo de los rasgos de los organismos, desde las partes de su cuerpo a los procesos fisiológicos. Esto resultaba enigmático incluso para los naturalistas más inclinados a la evolución que precedieron a Darwin: si las especies se encuentran tan bien adaptadas, ¿cómo pueden evolucionar y aun así mantenerse bien adaptadas? Darwin era muy consciente de este problema, y se preocupó porque su principio de la selección natural lo explicara de una manera satisfactoria.

La idea básica que subyace a la selección natural es bastante sencilla (¡cuando se la explican a uno!). Como a menudo pasa con los descubrimientos cuyo momento ha llegado, el naturalista Alfred Russel Wallace formuló de manera independiente y más o menos al mismo tiempo unas ideas muy parecidas. No obstante, Wallace fue muy claro acerca de quién creía que merecía la mayor parte del crédito. En una carta a Darwin³⁶ del 29 de mayo de 1864, escribió:

Por lo que atañe a la teoría de la selección natural en sí, siempre sostendré que es vuestra y solo vuestra. Usted la ha desarrollado en aspectos sobre los que yo nunca había pensado, años antes de que yo mismo viese un rayo de luz sobre este asunto, y mi artículo nunca hubiera convencido a nadie ni se le hubiera tenido por nada más que una ingeniosa especulación, mientras que su libro ha revolucionado el estudio de la historia natural.

Intentemos seguir la línea del pensamiento de Darwin. En primer lugar, se dio cuenta de que las especies tienden a producir más descendientes de los que pueden sobrevivir. En segundo lugar, los individuos de una especie determinada nunca son del todo idénticos. Si algunos poseen algún tipo de ventaja en cuanto a su capacidad para enfrentarse a la adversidad de su entorno, *y si suponemos que esa ventaja es heredable y se transmite a sus descendientes*, debemos concluir que, con el tiempo, la población irá cambiando de forma paulatina hacia los organismos que están mejor adaptados. He aquí cómo lo expresa el propio Darwin³⁷ en el capítulo 3 de *El origen*:

A causa de esta lucha por la existencia, cualquier variación, por pequeña que sea y sea cual sea la causa de la que proceda, si en alguna medida resulta provechosa para un individuo de una especie en sus infinitamente complejas relaciones con otros seres orgánicos y con la naturaleza de su entorno, tenderá a preservar a ese individuo y por lo general será heredada por sus descendientes. Estos, a su vez, gozarán de este modo de una mayor probabilidad de sobrevivir, pues de los muchos individuos de una especie que

nacen cada cierto tiempo, solo puede sobrevivir un pequeño número. A este principio, por el que cada pequeña variación, si es útil se preserva, lo he llamado selección natural³⁸.

Con la terminología moderna de los genes (de la que Darwin no sabía absolutamente nada), diríamos que la selección natural enuncia sencillamente que aquellos individuos cuyos genes sean «mejores» (en cuando a supervivencia y reproducción) serán capaces de producir más descendientes, y que esos descendientes también tendrán genes mejores (en términos relativos). Dicho de otro modo, a lo largo de muchas generaciones, las mutaciones beneficiosas acaban imponiéndose mientras que las perjudiciales son eliminadas, lo que tiene como resultado la evolución hacia una mejor adaptación. Por ejemplo, es fácil ver que ser más rápido puede beneficiar tanto al depredador como a su presa. Es así como en las amplias llanuras del Serengueti, en África oriental, la selección natural ha producido algunos de los animales más veloces de la Tierra.

Hay varios elementos que se combinan de manera efectiva para configurar el concepto completo de la selección natural. En primer lugar, la selección natural tiene lugar en las *poblaciones*, es decir, las comunidades de individuos que se reproducen entre sí en localidades geográficas concretas, y no en los individuos. En segundo lugar, las poblaciones suelen tener un potencial reproductor tan alto que, si no estuviera sometido a algún tipo de limitación, conduciría a un crecimiento exponencial. Por ejemplo, la hembra del pez luna (*Mola mola*) produce hasta trescientos millones de huevos de cada vez. Si tan solo un 1 por ciento de esos huevos fuese fecundado y sobreviviera hasta la edad adulta, no tardaríamos en tener los océanos repletos de peces luna (cada uno con un peso medio de más de 1000 kilos). Por suerte, a causa de la competencia con otras especies, los enfrentamientos con depredadores y otras adversidades de su entorno, de una pareja de progenitores de cualquier especie, por término medio solo sobreviven hasta reproducirse dos descendientes.

Esta descripción deja claro que la palabra «selección», en la formulación de Darwin de la selección natural, en realidad se refiere más a un proceso de *eliminación* de los miembros «más débiles» (en términos de supervivencia y reproducción) de una población, que a una selección de naturaleza antropomórfica. De manera metafórica, podemos ver el proceso de selección como una criba por un enorme cedazo. Las partículas más grandes (que corresponden a los individuos que sobreviven) se quedan en el cedazo, y las que lo atraviesan quedan eliminadas. El entorno es el agente que sacude el cedazo. Por eso, en una carta que Wallace le escribió a Darwin³⁹ el 2 de julio de 1866, llegó a sugerirle que considerara la posibilidad de cambiar el nombre del principio:

Deseo, por ello, sugerirle la posibilidad de evitar por completo esta fuente de confusión [...] y creo que puede hacerse sin dificultad y de manera muy eficaz adoptando el término de Spencer (que suele utilizar de preferencia al de selección natural), a saber, «supervivencia del más apto». Este término es la expresión llana de los hechos; la «selección natural» es una expresión metafórica de los mismos, hasta cierto punto indirecta e incorrecta, pues, aun personificando a la Naturaleza, no es tanto que seleccione variaciones especiales como que extermine a las menos favorecidas.

Darwin adoptó esta expresión acuñada en 1864 por el erudito Herbert Spencer como sinónimo de la selección natural en su quinta edición de *El origen*. No obstante, los biólogos actuales apenas utilizan esta expresión porque puede dar la impresión errónea de que solo sobreviven los individuos fuertes y sanos. De hecho, «supervivencia de los más aptos» significaba para Darwin exactamente lo mismo que «selección natural». Es decir, los organismos con *características favorecidas por la selección y heredables* son los que con mayor éxito las transmiten a su descendencia. En este sentido, aunque Darwin admitía la inspiración que había recibido de las ideas de filósofos radicales como el economista político Thomas Malthus⁴⁰ (una suerte

de economía biológica en un mundo de libre competencia), existen diferencias importantes.

Cabe destacar un tercer aspecto de extrema importancia sobre la selección natural, y es que realmente consiste en dos pasos que se producen en secuencia, el primero de los cuales implica principalmente a la casualidad o el azar, mientras que el segundo es decididamente no aleatorio. En el primer paso se produce una *variación* heredable. En el lenguaje moderno de la biología, entendemos esto como una variación genética introducida por mutaciones aleatorias, por el barajado de los genes y todos los procesos asociados con la reproducción sexual y la generación de un huevo fecundado. En el segundo paso, la *selección*, aquellos individuos de la población que estén mejor dotados para competir, ya sea con miembros de su propia especie, ya con miembros de otras especies, o en términos de su capacidad para hacer frente a su entorno, tienen una mayor probabilidad de sobrevivir y reproducirse. En contra de lo que llevan a pensar algunas interpretaciones equivocadas de la selección natural, el azar desempeña un papel mucho menor en el segundo paso. Con todo, el proceso de selección no es del todo determinista: no hay genes buenos que puedan ayudar a una especie de dinosaurio exterminada por un meteorito gigante, por poner un ejemplo. Dicho en pocas palabras, evolución es el cambio en el tiempo de la frecuencia de genes.

Hay dos rasgos principales que distinguen a la selección natural del concepto de «diseño». El primero es que la selección natural carece de un fin último, de un «plan estratégico» a largo plazo. (No es teleológica). En lugar de esforzarse por alcanzar algún ideal de perfección, se limita a hacer chapuzas mediante la eliminación, generación tras generación, de los peor adaptados, y a menudo cambia de dirección o incluso lleva a la extinción de linajes enteros. No es eso lo que uno esperaría de un diseñador maestro. Lo segundo es que, como la selección natural se ve limitada a operar sobre lo que ya existe, el abanico de sus posibilidades es restringido. La selección

natural comienza con la modificación de especies que ya han evolucionado hasta cierto estado; no puede en ningún caso volver a diseñarlas desde cero. Es como pedirle a un sastre que haga algunas modificaciones en un vestido viejo en lugar de pedirle a la casa de moda de Versace que diseñe uno nuevo. En consecuencia, la selección natural deja bastante que desear en cuestión de diseño. (¿No estaría bien tener cuatro manos o un campo visual de 360 grados? ¿Y de verdad fue tan buena idea eso de tener nervios en los dientes o una próstata que rodea totalmente a la uretra?). Así pues, aunque ciertas características confieran una ventaja en términos de aptitud biológica, mientras no haya una verdadera variación heredable que alcance ese resultado, la selección natural no tiene manera de producir esas características. Las imperfecciones son, de hecho, la marca inconfundible de la selección natural.

El lector se habrá dado cuenta ya de que, por su propia naturaleza, la teoría de la evolución de Darwin es difícil de demostrar mediante observaciones directas, pues por lo general actúa a una escala de tiempo tan larga que, en comparación, mirar cómo crece la hierba es ver una película de acción. El propio Darwin escribió al geólogo⁴¹ Frederick Wollaston Hutton el 20 de abril de 1861: «La verdad es que estoy harto de decirle a la gente que no pretendo aducir pruebas del paso de una especie a otra, pero que creo que, en lo principal, esta concepción es correcta, puesto que permite agrupar y explicar tantos fenómenos». No obstante, biólogos, geólogos y paleontólogos han acumulado un gran número de pruebas circunstanciales de la evolución, algo que en su mayor parte queda fuera de las pretensiones de este libro, puesto que no influyeron directamente sobre el error de Darwin. Bastará con llamar la atención sobre el hecho siguiente: el registro fósil revela de manera inconfundible una evolución desde la vida simple a la vida compleja. Específicamente, en el curso de miles de millones de años de tiempo geológico, cuanto más antigua es la capa geológica en la que se descubre un fósil, más simple es la especie.

Es importante mencionar de manera sucinta algunas de las pruebas que apoyan la idea de la selección natural, puesto que el aspecto de la teoría de Darwin que más profundamente inquietó a sus coetáneos fue precisamente la idea de que la vida podía evolucionar y diversificarse sin que hubiera una meta *hacia* la cual evolucionar. Ya he mencionado una de las pistas que apuntan a la realidad de la selección natural: la resistencia a los fármacos que desarrollan diversos patógenos. La bacteria *Staphylococcus aureus*, por ejemplo, es la causa más común de las llamadas infecciones nosocomiales o intrahospitalarias, que cada año afectan a no menos de medio de millón de pacientes⁴² de los hospitales de Estados Unidos. A principios de la década de 1940, todas las cepas conocidas de estafilococo eran susceptibles a la penicilina; sin embargo, con el paso de los años, a causa de mutaciones que producen resistencia y de la posterior selección natural, la mayoría de las cepas se han tornado resistentes a la penicilina. En este caso, el proceso entero de evolución se ha comprimido drásticamente en el tiempo (en parte debido a la presión selectiva ejercida por los humanos), gracias a que las generaciones de las bacterias son muy cortas y sus poblaciones enormes. Desde 1961, una cepa específica de estafilococo conocida como MRSA (el acrónimo en inglés de *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina) ha desarrollado resistencia no solo a la penicilina, sino también a la meticilina, la amoxicilina, la oxacilina y a toda una serie de antibióticos. Es difícil encontrar una manifestación mejor de la selección natural en acción.

Otro ejemplo fascinante, aunque controvertido, de la selección natural es la evolución de la mariposa del abedul⁴³. Antes de la revolución industrial, los colores claros de esta mariposa nocturna (que los biólogos conocen como *Biston betularia betularia morpha typica*) le proporcionaban un buen camuflaje contra el fondo de su hábitat: líquenes y árboles. La revolución industrial en Inglaterra trajo consigo altísimos niveles de contaminación que mataron muchos líquenes y oscurecieron muchos árboles con hollín. A consecuencia de ello, las mariposas de cuerpo blanco quedaron súbitamente

expuestas a una gran presión de depredación, que casi las llevaron a la extinción. Al mismo tiempo, la forma melánica (*carbonaria*) de esta mariposa, de color oscuro, comenzó a prosperar alrededor de 1848 gracias a su mejorada capacidad de camuflaje. Como si quisieran demostrar la importancia de las políticas «verdes», las mariposas de color claro comenzaron a reaparecer en cuanto se adoptaron controles ambientales. Aunque algunos estudios sobre la mariposa del abedul y el fenómeno que acabamos de describir («melanismo industrial») hayan sido criticados por varios creacionistas, hasta algunos de los críticos conceden que este es un caso claro de selección natural, aunque sostienen que eso no prueba la evolución, puesto que el resultado neto es simplemente el paso de un tipo de forma a otro, no a una nueva especie.

Otra objeción común, y más filosófica, a la selección natural es que la definición de Darwin es circular o *tautológica*. Dicho en términos sencillos, este juicio adverso se puede expresar así: la selección natural significa «supervivencia del más apto». Pero ¿cómo se definen «los más aptos»? Como aquellos que sobreviven mejor; por tanto, la definición es una tautología. Esta argumentación tiene su origen en un equívoco, y es absolutamente errónea. Darwin no usó «el más apto» para referirse a los que sobreviven sino a aquellos que, comparados con otros miembros de la especie, tenían una mayor *esperanza* de sobrevivir *porque estaban mejor adaptados a su entorno*. La interacción entre una característica variable de un organismo y el medio en el que este habita es crucial en esta definición. Como los organismos compiten por unos recursos limitados, algunos sobreviven y otros no. Además, para que la selección natural pueda actuar, las características que confieren adaptación tienen que ser *heredables*, es decir, tienen que poder transmitirse por vía genética.

Sorprendentemente, hasta el propio filósofo de la ciencia⁴⁴ Karl Popper planteó una sospecha de tautología contra la evolución por selección natural (aunque su objeción era más sutil). Popper básicamente cuestionaba el

poder explicativo de la selección natural basándose en la siguiente argumentación: si cierta especie existe, entonces es que estaba adaptada a su entorno (puesto que las que no lo estaban se habrían extinguido). En otras palabras, lo que Popper decía era que la adaptación se *define* simplemente como la cualidad que garantiza la existencia, y no se descarta nada. Sin embargo, desde que Popper publicó este argumento, diversos filósofos han demostrado que es incorrecto. En realidad, la teoría de la evolución de Darwin descarta más posibilidades de las que permite. Por ejemplo, según Darwin, no puede aparecer ninguna especie nueva que no tenga una especie ancestral. De manera parecida, en la teoría de Darwin quedan descartadas todas las variaciones que no puedan alcanzarse por medio de pasos graduales. En terminología moderna, «alcanzar» se refiere a procesos gobernados por las leyes de la genética y la biología molecular. Una cuestión crucial es la naturaleza estadística de la adaptación: no pueden hacerse predicciones sobre individuos, solo sobre probabilidades. Dos gemelos idénticos no tienen por qué producir el mismo número de descendientes, o incluso sobrevivir ambos. Popper, por cierto, reconoció su error ⁴⁵ años después, declarando: «He cambiado de opinión sobre la posibilidad de contrastar la selección natural y sobre su estatus lógico; me complace tener la oportunidad de retractarme».

Por último, para no dejar ningún fleco, debo mencionar que si bien la selección natural es el principal motor de la evolución, hay otros procesos que también pueden ocasionar cambios evolutivos. Un ejemplo (que Darwin no pudo conocer) es lo que los modernos biólogos evolutivos denominan *deriva genética*⁴⁶, un cambio causado por el azar o un efecto de muestreo, en la frecuencia relativa con la que una variante de un gen (un *alelo*) aparece en una población. Este efecto puede ser significativo en poblaciones pequeñas, como demuestra el siguiente ejemplo. Cuando se lanza una moneda, lo que se espera es que salga cara más o menos la mitad de las veces. Eso significa que si se tira una moneda un millón de veces, el número

de ocasiones en que sale cara andará cerca de medio millón. Sin embargo, si se tira una moneda tan solo cuatro veces, existe una probabilidad no despreciable (alrededor del 6,2 por ciento) de que salga siempre cara, desviándose de este modo de lo esperado de una manera sustancial. Ahora imaginemos una gran población de organismos de una isla en la que solo un gen aparece con dos variantes (alelos): X o Z. Los alelos se presentan en la población con la misma frecuencia; o sea, la frecuencia de X y Z es 1/2 para cada uno de los alelos. Pero antes de que estos organismos tengan ocasión de reproducirse, un enorme tsunami arrasa la isla y mata a todos los individuos menos cuatro. Los cuatro individuos que sobreviven pueden tener cualquiera de las siguientes dieciséis combinaciones de alelos:

XXXX, XXXZ, XXZX, XZXX, ZXXX, XXZZ, ZZXX, XZZX,
ZXXZ, XZXZ, ZXZX, XZZZ, ZZZX, ZXZZ, ZZXZ, ZZZZ.

El lector habrá observado que en diez de estas dieciséis combinaciones, el número de alelos X *no* es igual al número de alelos Z. Dicho de otro modo, en la población superviviente hay una probabilidad mayor de deriva genética (un cambio en la frecuencia relativa de alelos) que de mantener el estado inicial de frecuencias iguales.

La deriva genética puede causar una evolución relativamente rápida en el acervo genético de una población pequeña, y de forma totalmente independiente de la selección natural. Un ejemplo de deriva genética que se suele citar concierne a la comunidad amish del este de Pensilvania. Entre los amish, la polidactilia (dedos supernumerarios en manos o pies) es mucho más común que entre la población general de Estados Unidos. Esta es una de las manifestaciones del infrecuente síndrome de Ellis-van Creveld⁴⁷. Las enfermedades asociadas a genes recesivos, como el síndrome de Ellis-van Creveld, requieren dos copias del alelo para provocar la enfermedad; es decir, los dos progenitores tienen que ser portadores del gen recesivo. La razón de la frecuencia anormalmente elevada de estos alelos entre los amish

es que los miembros de esta comunidad tienden a casarse entre ellos, y la propia población tuvo su origen en un grupo de unos doscientos inmigrantes alemanes. El pequeño tamaño de esta comunidad permitió a los investigadores buscar los orígenes del síndrome de Ellis-van Creveld hasta llegar a una sola pareja, Samuel King y su esposa, que llegaron en 1744.

Hay tres aspectos de la deriva genética que conviene resaltar. El primero es que los cambios evolutivos que se deben a la deriva genética se producen completamente como consecuencia del azar y de efectos de muestreo, es decir, no vienen impulsados por una presión de selección. En segundo lugar, la deriva genética no produce adaptación, que sigue siendo un resultado propio únicamente de la selección natural. De hecho, al ser completamente aleatoria, la deriva genética puede llevar a la evolución de ciertas propiedades cuya utilidad es, por lo demás, difícil de explicar. Por último, mientras que claramente la deriva genética se produce en cierta medida en todas las poblaciones (pues todas tienen un tamaño finito), sus efectos son más pronunciados en poblaciones pequeñas y aisladas.

Estas son, de manera muy sucinta, algunas de las características fundamentales de la teoría de la evolución por selección natural que enunció Darwin. Este biólogo revolucionó el pensamiento de dos maneras principales. No solo reconoció que unas creencias, aunque se hubieran mantenido durante siglos, podían ser falsas, sino que demostró que la verdad científica se puede alcanzar mediante la paciente recolección de datos y observaciones, combinada con unas hipótesis osadas sobre la teoría que enlaza a todas esas observaciones. Como el lector ya habrá apreciado, la teoría de Darwin explica muy bien por qué la vida en la Tierra es tan diversa y por qué los seres vivos tienen las características que tienen. La sufragista y botánica⁴⁸ de la Inglaterra del siglo XIX Lydia Becker describió de una forma muy bella lo que Darwin había logrado:

¡Qué poca importancia parecen tener los movimientos de los insectos mientras se arrastran adentro y afuera de las floras en busca del néctar del

que se nutren! Si viéramos un hombre que pasara su tiempo observándolos y fijándose en su trajín con mirada curiosa, se nos podría perdonar por pensar que se estaba entreteniendo, pasando una hora ociosa en la observación de cosas, aunque curiosas, del todo nimias. Pero ¡cuánto nos podríamos equivocar al suponer tal cosa! Pues esos pequeños mensajeros alados llevan a la mente del filósofo naturalista noticias de misterios hasta ahora nunca revelados; y del mismo modo que Newton vio la ley de la gravitación en la caída de una manzana, Darwin encontró, en la conexión entre las moscas y las flores, algunos de los hechos más importantes que sustentan la teoría que ha promulgado sobre la modificación de formas específicas en los seres animados.

En efecto, Darwin fue para el siglo XIX lo que Newton había sido para el siglo XVII y lo que Einstein sería para el siglo XX. Es curioso que la teoría de la *evolución* constituyera una de las *revoluciones* más drásticas de la historia de la ciencia. En palabras del biólogo e historiador de la ciencia Ernst Mayr, «provocó en el pensamiento del hombre un trastorno mayor que cualquier otro avance científico desde el resurgimiento de la ciencia en el Renacimiento». La cuestión, entonces, es: ¿dónde se equivocó Darwin?

Capítulo 3

Y con él quienes lo hereden, han de disolverse

La vida quizá sea el único enigma ante el cual no queremos rendirnos.

William Schwenck Gilbert, *The Gondoliers*

El título de este capítulo está tomado en parte de *La tempestad*, de William Shakespeare, pero como pronto veremos, recoge de manera poética la esencia del error de Darwin. La fuente del error fue el hecho de que la teoría de la herencia que predominó durante el siglo XIX estaba fundamentalmente equivocada. El propio Darwin era consciente de sus deficiencias, según confesó con candidez en *El origen*:⁴⁹

Las leyes que gobiernan la herencia nos son bastante desconocidas; nadie sabe decir por qué la misma peculiaridad en individuos distintos de la misma especie, y en individuos de especies distintas, a veces se hereda y a veces no; por qué a menudo en los niños vuelven a aparecer los rasgos del abuelo o de la abuela o de algún antepasado aún más lejano; por qué a menudo una peculiaridad se transmite de un sexo a los dos sexos, o solo a uno de ellos, por lo general al mismo sexo, aunque no de manera exclusiva.

Decir que las leyes de la herencia nos eran «bastante desconocidas» probablemente constituya, de todo el libro, el enunciado que de forma más notoria subestimaba la realidad. Darwin había sido educado en la creencia, entonces muy extendida, de que las características de los dos padres se mezclan físicamente en sus descendientes, como en una mezcla de pinturas. De acuerdo con esta «teoría del bote de pintura»⁵⁰, la contribución hereditaria de cada uno de los antepasados se vería reducida a la mitad en cada generación, y se esperaba que los descendientes de cualquier pareja sexual presentasen características intermedias. En palabras del propio

Darwin: «Al cabo de doce generaciones⁵¹, la proporción de sangre, por usar una expresión común, de cualquiera de los antepasados es de solo 1 en 2048». Como en un *gin-tonic*: si se va mezclando la bebida con más tónica, al final ni se nota la ginebra. A pesar de que evidentemente Darwin comprendía esta inevitable dilución, de algún modo todavía esperaba que la selección natural funcionase. Por ejemplo, al hablar de los lobos que depredan sobre los ciervos, concluye: «Si cualquier ligero cambio innato de hábito o estructura beneficiase a un lobo, este tendría una mayor probabilidad de sobrevivir y dejar descendencia. Algunos de sus hijos probablemente heredarían los mismos hábitos o estructura, y mediante la repetición de este proceso, podría llegar a formarse una nueva variedad». Pero a Darwin no se le ocurrió el simple hecho de que esta expectativa fuese absolutamente insostenible bajo la suposición de una teoría de la herencia por mezcla. Quien primero llamó la atención sobre esta incoherencia fue el ingeniero escocés Fleeming Jenkin.

Jenkin fue una persona de múltiples talentos⁵² con ocupaciones tan variadas como pintar retratos de transeúntes y diseñar cables submarinos para el telégrafo. Su crítica de Darwin era bastante simple. Jenkin argumentó que la selección natural sería del todo ineficaz para «seleccionar» una *característica singular* (una novedad infrecuente que apareciese por azar, lo que entonces se conocía como «capricho» y hoy llamaríamos mutación), porque cualquier variación de este tipo se vería *desbordada* y diluida por todos los tipos normales de la población y al cabo de unas pocas generaciones quedaría borrada por completo.

No se puede culpar a Darwin por no conocer nada mejor que la teoría de la herencia científicamente aceptada en su tiempo. En consecuencia, no considero un error que adoptase la idea de la herencia por mezcla. Donde Darwin erró fue en *pasar completamente por alto (al menos en un principio) el hecho de que, bajo la suposición de la herencia por mezcla, su mecanismo de selección natural simplemente no podía funcionar como él creía.*

Examinemos con mayor detalle este grave error y sus consecuencias potencialmente devastadoras.

Dilución

Fleeming Jenkin publicó su crítica⁵³ a la teoría de Darwin en una reseña anónima a la cuarta edición de *El origen de las especies*. El artículo apareció en el *North British Review* en junio de 1867. Aunque el ensayo atacaba la teoría de la evolución por varios flancos, me centraré en la argumentación que dejaba al descubierto el error de Darwin. Para ilustrar su crítica, Jenkin supuso que cada individuo tenía un centenar de descendientes, de los cuales, por término medio, solo uno sobrevivía para reproducirse. Luego pasaba a comentar el caso de un individuo con una mutación rara (un «capricho») que tuviera la ventaja de una probabilidad dos veces mayor de sobrevivir y reproducirse que cualquier otro. De forma apropiada para el riguroso ingeniero que era (obtuvo no menos de treinta y siete patentes entre 1860 y 1886), la manera en que Jenkin abordó su argumentación fue cuantitativa:⁵⁴ quería calcular el efecto de ese «capricho» sobre la población general:

Se reproducirá y engendrará una progenie de, digamos, 100, y esta progenie, en términos generales, será intermedia entre el individuo promedio y el capricho. [Puesto que los caprichos son raros, cabe esperar que se apareen con individuos promedio]. Las probabilidades a favor de un individuo de esta generación de la nueva raza serán, pongamos por caso, de 1,5 contra 1 [bajo la suposición de la mezcla], en comparación con un individuo promedio; por tanto, su ventaja será menor que la de su progenitor, pero gracias a su mayor número, las probabilidades son que alrededor de 1,5 de estos individuos sobrevivirán. A no ser que se apareen entre ellos, lo cual es muy improbable, su progenie se acercará nuevamente al individuo promedio; serán 150 [1,5 por 100], y su superioridad se quedará en la razón de 1,25 a 1 [otra vez a causa de la mezcla]; es probable entonces que casi dos de ellos sobrevivan [1 por ciento de 1,25 por 150] y tengan 200 descendientes con

una octava parte de la superioridad. Más de dos de estos sobrevivirán, pero nuevamente la superioridad quedará mermada, hasta que al cabo de unas pocas generaciones ya no podrá percibirse, y no contará más en la lucha por la existencia que cualquiera de los cientos de ligeras ventajas que de manera natural aparecen en los órganos.

Jenkin argumentaba que incluso bajo la forma más extrema de selección, no podía esperarse que una característica bien establecida, como el color de la piel, se transformase en una nueva, si esa característica solo se introducía una sola vez en la población. Para ilustrar este efecto de dilución, Jenkin escogió un ejemplo sorprendentemente cargado de prejuicios: el de un hombre blanco con rasgos superiores que naufragara en una isla habitada por hombres negros. El tono racista e imperialista del pasaje hoy nos deja anonadados, pero posiblemente fuese bastante habitual en la Inglaterra tardovictoriana: aunque esta persona «mataría muchos negros en la lucha por la existencia» y «tendría muchas esposas e hijos», y «en la primera generación habría varias docenas de jóvenes mulatos inteligentes», argumentaba Jenkin, «¿se puede creer que poco a poco la isla entera adquiriría una población blanca, o siquiera amarilla?».

Pero resulta que Jenkin cometió un grave error lógico en sus cálculos: supuso que cada pareja sexual tenía cien descendientes, de los cuales, por término medio, solo sobrevivía *uno* hasta la reproducción. Sin embargo, dado que solo se reproducen las hembras, se sigue que de cada pareja reproductora deberían sobrevivir por término medio *dos* de los descendientes (un macho y una hembra), pues de lo contrario el tamaño de la población se reduciría a la mitad en cada generación, lo cual es una receta segura para una rápida extinción. Sorprendentemente, solo Arthur Sladen Davis⁵⁵, un ayudante de profesor de matemáticas de Leeds Grammar School⁵⁶, descubrió este error obvio, que explicó en una carta a la revista *Nature* en 1871.

Davis demostraba que cuando se hacía la corrección para mantener la población con un tamaño aproximadamente constante, el efecto del capricho

no se desvanecía (como sostenía Jenkin), sino que se distribuía por toda la población, aunque diluido. Por ejemplo, un gato negro introducido en una población de gatos blancos engendraría (de acuerdo con la suposición de herencia por mezcla) dos gatos grises por término medio, y estos engendrarían cuatro gatos un poco más grises, y así sucesivamente. Una tras otra, las generaciones se irían haciendo más claras, pero la tonalidad de gris no acabaría de desaparecer nunca. Davis también llegó a la conclusión correcta de que «si bien un capricho favorable que aparezca una única vez, y nunca más, si no es por herencia, apenas provocará un cambio en una raza, ese mismo capricho podría producir un cambio considerable si apareciera de manera independiente en varias generaciones, aunque nunca más de una vez por generación».

A pesar del error matemático de Jenkin, su crítica general era correcta: bajo la suposición de la herencia por mezcla, incluso en las condiciones más favorables, un gato negro que aparezca en una sola ocasión no puede convertir una población entera de gatos blancos en gatos negros, por muy ventajoso que sea el color negro.

Antes de examinar a fondo la cuestión de cómo pudo Darwin pasar por alto este defecto aparentemente fatal para su teoría de la selección natural, resultará útil entender la teoría de la herencia por mezcla desde la perspectiva de la genética moderna.

El error de Darwin y las semillas de la genética

En el contexto del conocimiento actual de la genética, la molécula conocida como ADN (*ácido desoxirribonucleico*) proporciona en todos los seres vivos el mecanismo responsable de la herencia. A muy grandes rasgos, el ADN está formado por *genes*, que contienen la información que codifica las proteínas, y por algunas regiones no codificadoras. Físicamente, el ADN se encuentra en unos elementos llamados *cromosomas*, de los que cada organismo de una especie con reproducción sexual posee dos conjuntos, uno heredado de la

madre (la hembra) y el otro heredado del padre (el macho). En consecuencia, cada individuo posee dos copias de todos sus genes, y estas dos copias pueden ser idénticas o pueden variar ligeramente. Las distintas formas de un gen que pueden estar presentes en una posición determinada de un cromosoma son las variantes que conocemos como alelos.

La teoría genética moderna⁵⁷ nació en la mente de un insólito explorador, un monje del siglo XIX llamado Gregor Mendel que realizó una serie de experimentos de apariencia sencilla que consistían en hacer la polinización cruzada de miles de unas plantas de guisante que solo producían semillas verdes con otras plantas que solo producían semillas amarillas. Para su sorpresa, la primera generación de descendientes solo produjo semillas amarillas. Sin embargo, en la siguiente generación apareció una relación de 3:1 entre semillas amarillas y semillas verdes. A partir de estos desconcertantes resultados, Mendel tuvo la habilidad de destilar un teoría de la herencia *atomista* o *particulada*. En claro contraste con la teoría de la mezcla, la teoría de Mendel decía que los genes (que él llamaba «factores») eran entidades discretas que no solo se preservaban durante el desarrollo sino que además se transmitían *totalmente intactas* a la siguiente generación. Mendel añadió, además, que cada uno de los descendientes hereda uno de esos genes («factores») de cada uno de sus progenitores, y que una característica determinada podía no manifestarse en un descendiente y aun así pasar a las generaciones siguientes. Estas deducciones, como los propios experimentos de Mendel, eran absolutamente geniales. Nadie había llegado a conclusiones parecidas en casi diez mil años de agricultura. Los resultados de Mendel hacían añicos de un solo golpe la idea de la mezcla, pues ya en la primera generación de descendencia, ninguna de las semillas era un promedio de los dos progenitores.

Un ejemplo simple ayudará a clarificar⁵⁸ las diferencias fundamentales entre la herencia mendeliana y la herencia por mezcla con relación a sus efectos sobre la selección natural.

Aunque obviamente la herencia por mezcla nunca usó el concepto de gen, podemos utilizar este lenguaje y aun así preservar la esencia del proceso de mezcla. Imaginemos que los organismos que poseen cierto gen A son negros mientras que los que poseen el gen a son blancos, cuando ambos tienen dos copias del gen respectivo (como en la figura 4).

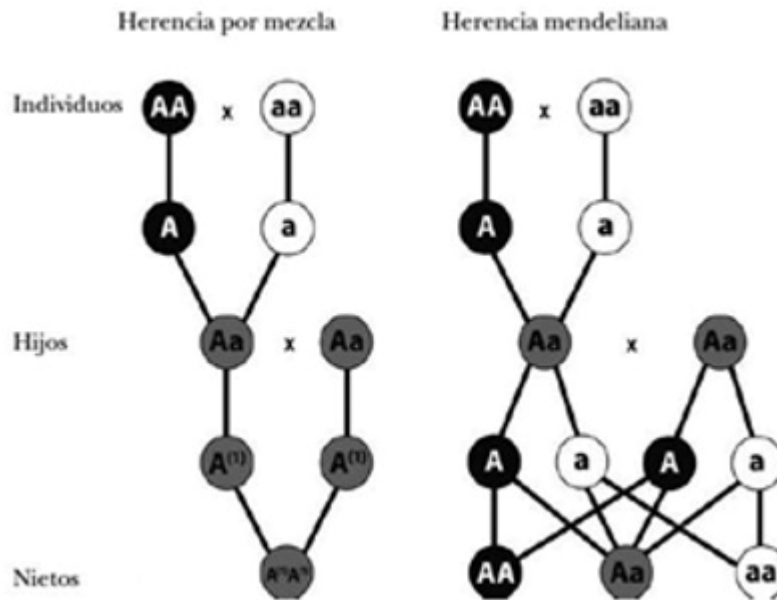


Figura 4

Si ninguno de los dos genes dominase sobre el otro, tanto en la herencia con mezcla como en la herencia mendeliana los hijos de una de estas parejas serían grises, puesto que tendrían la combinación de genes (o *genotipo*) Aa . Ahora viene la diferencia fundamental. En la teoría de la mezcla, A y a se mezclarían físicamente creando un nuevo tipo de gen que confiere el color gris a quienes lo llevan. A este nuevo gen lo llamaremos $A^{(1)}$. Este tipo de mezcla no ocurriría en la herencia mendeliana, donde cada gen conservaría su identidad. Como muestra la figura 4, en la generación de los nietos todos los descendientes son grises si la herencia es por mezcla, mientras que si la herencia es mendeliana, los nietos pueden ser negros (AA), blancos (aa) o grises (Aa). Dicho de otro modo, la genética mendeliana transmite los tipos

genéticos extremos de una generación a la siguiente, manteniendo de este modo la variación genética de una forma muy eficiente. En la herencia por mezcla, en cambio, la variación se pierde inevitablemente, pues todos los tipos extremos se desvanecen rápidamente en una suerte de promedio. Como Jenkin señaló correctamente, y como el siguiente ejemplo (muy simplificado) demuestra claramente, esta característica de la herencia por mezcla era catastrófica para las ideas de Darwin sobre la selección natural.

Supongamos que empezamos con una población de diez individuos. Nueve tienen la combinación de genes aa (y por lo tanto son blancos) y uno tiene la combinación Aa (por ejemplo, por una mutación), que lo convierte en gris. Supongamos además que ser negro resulta ventajoso para la supervivencia y la reproducción, y que incluso tener un color un poco más oscuro es mejor que ser completamente blanco (aunque la ventaja se reduce a medida que se reduce el tono gris). La figura 5 intenta seguir de manera esquemática la evolución de una población de estas características si la herencia es por mezcla. En la primera generación, la mezcla de A y a producirá un nuevo «gen» $A^{(1)}$, que en un cruce con aa dará $A^{(1)}a$, que de nuevo se mezclará produciendo el gen $A^{(2)}$, correspondiente a un color todavía más claro y menos ventajoso. Es fácil ver que después de un gran número (n) de generaciones, lo más que puede ocurrir es que la población se transforme en otra con las combinaciones $A^{(n)}A^{(n)}$, que solo será ligeramente más oscura que la generación blanca original. En particular, el color negro se extingue ya en la primera generación, cuando, al mezclarse, el gen que lo codifica deja de existir.

En cambio, en la herencia mendeliana (figura 6), como el gen A se preserva de una generación a la siguiente, tarde o temprano dos Aa se aparearán y producirán la variedad negra, AA . Si el negro confiere una ventaja en aquel entorno, dado un tiempo suficiente la selección natural podría llevar a que toda la población fuese negra.

La conclusión es simple: para que realmente funcione la teoría de la evolución de Darwin por medio de la selección natural, necesita la herencia mendeliana⁵⁹. Pero en un momento en que este conocimiento genético todavía no se había descubierto, ¿cómo respondió Darwin a la crítica de Jenkin?

Lo que a unos mata, a otros, sana

Darwin fue un genio en muchos sentidos, pero decididamente no fue un buen matemático. Él mismo lo reconoció en su autobiografía:⁶⁰ «Intenté hacerme con las matemáticas, e incluso durante el verano de 1828 estudié con un tutor privado (un hombre muy aburrido) en Barmouth, pero avancé muy despacio. El trabajo me repugnaba, sobre todo porque no era capaz de ver ningún sentido en los primeros pasos del álgebra [...] No creo que hubiese llegado nunca a pasar de los niveles más bajos». Siendo este el caso, las argumentaciones de *El origen* suelen ser más cualitativas que cuantitativas, especialmente cuando se trata de la producción del cambio evolutivo. En los pocos lugares de *El origen* en los que Darwin intenta hacer unos pocos cálculos, en más de una ocasión acaba metiendo la pata. Por eso no es extraño que en una de sus cartas a Wallace, después de leer la crítica bastante matemática de Jenkin, confiese: «Estaba cegado cuando creía⁶¹ que las variaciones singulares se podrían preservar con mucha más frecuencia de lo que ahora veo que es posible o probable». Aun así, resulta casi impensable que Darwin no fuera en absoluto consciente del potencial efecto de dilución de la herencia por mezcla hasta el momento en que leyó el artículo de Jenkin. No fue así. Ya en 1842, veinticinco años antes de la publicación de la reseña de Jenkin, Darwin había observado: «Si en algún país o distrito⁶² todos los animales de una especie pudieran cruzarse libremente, cualquier pequeña tendencia a variar que hubiera en ellos quedaría contrarrestada». Hasta cierto punto, Darwin incluso contaba⁶³ con el efecto de la dilución para garantizar la integridad poblacional frente a la

tendencia de los individuos a apartarse de su tipo a causa de variaciones. Entonces, ¿cómo pudo no comprender lo difícil que sería para un «capricho» (una variación singular) superar la fuerza igualadora de la mezcla? El error de Darwin y su tardanza en reconocer la crítica planteada por Jenkin probablemente reflejasen, de un lado, sus dificultades conceptuales con la herencia en general, y, por otro lado, su excesiva fijación residual con la idea de que las variaciones tenían que ser escasas. Esto último podría haber sido en parte una consecuencia de su teoría general de la reproducción y el desarrollo, en la que suponía que solo las presiones durante el desarrollo desencadenaban variaciones. El desconcierto de Darwin con la herencia era mucho más profundo, como puede apreciarse en la siguiente incoherencia. En cierto lugar de *El origen*, Darwin observa lo siguiente:

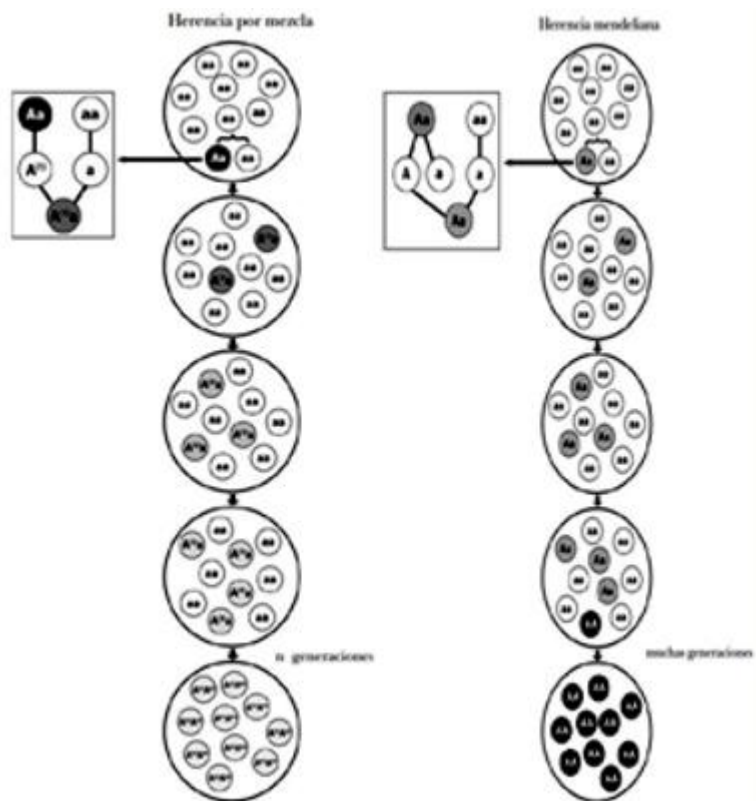


Figura 5 y 6 (Figura 26a y 26b)

Cuando un carácter que se ha perdido en una raza reaparece tras un gran número de generaciones, la hipótesis más probable no es que los descendientes de repente saquen parecido con un antepasado de varios cientos de generaciones atrás, sino que en cada generación sucesiva se ha producido una tendencia a reproducir el carácter en cuestión, y por fin este, en unas condiciones favorables que ignoramos, adquiere dominancia.

Esta idea de una «tendencia» latente⁶⁴ se alejaba de forma manifiesta de la habitual herencia por mezcla, y de diversas maneras era más cercana en lo esencial a la herencia mendeliana. Sin embargo, no parece que, al menos en un principio, a Darwin se le ocurriera apelar a esta idea de la latencia en sus intentos por responder a Jenkin. En vez de eso, Darwin decidió cambiar el énfasis del papel que previamente había asignado a las variaciones singulares para situarlo sobre las *diferencias individuales* (el amplio abanico de diminutas diferencias que se producen con frecuencia, que suponía que se distribuían de manera continua por toda la población), como fuente de «materia prima» sobre la que actuaría la selección natural. En otras palabras, Darwin confiaba ahora en todo un continuo de variaciones para producir la evolución por selección natural a lo largo de muchas generaciones.

En una carta a Wallace fechada el 22 de enero de 1869⁶⁵, un turbado Darwin escribía: «Me he visto interrumpido en mi trabajo habitual de preparar una nueva edición del *Origen*, que me ha costado mucho esfuerzo, y que confío en haber mejorado considerablemente en dos o tres aspectos importantes. Siempre he considerado que las diferencias individuales eran más importantes que las variaciones singulares, pero ahora he llegado a la conclusión de que aquellas [las diferencias individuales] tienen una importancia suprema, y en esto creo que concuerdo con usted. Los argumentos de Fleeming Jenkin me han convencido». Para reflejar su nuevo énfasis, Darwin enmendó *El origen* desde la quinta edición cambiando los singulares que se referían a individuos en plurales, por ejemplo cambiando

«cualquier variación» por «variaciones» y «un individuo» por «diferencias individuales». También añadió a la quinta edición algunos párrafos nuevos, dos de los cuales, en particular, revisten un enorme interés. En uno, admite abiertamente:

Observaba también que la preservación⁶⁶ en estado natural de una desviación ocasional de estructura, como la monstruosidad, era un suceso raro, y que, cuando se preservaba, por lo general se perdía en los cruzamientos posteriores con individuos normales. No obstante, fue al leer un autorizado y valioso artículo del *North British Review* (1867), cuando comprendí hasta qué punto es infrecuente que las variaciones singulares, poco o muy marcadas, se perpetúen.

En el otro párrafo, Darwin presentaba su propio resumen conciso del argumento de la dilución de Jenkin. Este párrafo es fascinante por contener dos diferencias aparentemente pequeñas pero muy significativas con respecto al texto original de Jenkin. En primer lugar, Darwin supone en él que una pareja de animales tiene doscientos hijos, de los que *dos* sobreviven hasta reproducirse⁶⁷. Así pues, a pesar de su débil preparación matemática, Darwin parece adelantarse ya en 1869 a la corrección a Jenkin que A. S. Davis señalaría en su carta a *Nature* de 1871: para que la población no desaparezca, tienen que sobrevivir por término medio dos hijos. En segundo lugar, y esto es lo más curioso, Darwin supone en su resumen que solo la mitad de los hijos del «capricho» heredan la variación favorable. Pero ¡esta predicción es contraria a las predicciones de la teoría de la mezcla! Lamentablemente, Darwin no supo aun entonces desarrollar las consecuencias de una teoría de la herencia sin mezcla, y aceptó las conclusiones de Jenkin sin más discusión.

Existen, no obstante, bastantes indicaciones de que Darwin no estaba satisfecho con la teoría de la herencia con mezcla desde hacía tiempo. En una carta que escribió en 1857 al biólogo Thomas Henry Huxley, su amigo y defensor en los debates públicos, le explicaba:

Al abordar el tema [de la evolución] desde el ángulo que más me atrae, a saber, la herencia, últimamente me he visto inclinado a especular de manera muy tosca y confusa que la propagación por fecundación verdadera resultará en una especie de mezcla, y no en una auténtica fusión de dos individuos diferenciados, o más bien de innumerables individuos, pues cada progenitor tiene sus progenitores y antepasados. No puedo entender de otro modo que las formas resultantes de los cruces reviertan con tanta frecuencia a formas ancestrales. Pero todo esto, naturalmente, es infinitamente tosco⁶⁸.

Tosco o no, su observación era extraordinariamente perspicaz. Darwin reconocía aquí que la combinación del material hereditario materno y paterno se parecía más al resultado de barajar dos juegos de cartas que al de mezclar dos pinturas.

Aunque las ideas que expresa Darwin en esta carta se pueden considerar definitivamente como un impresionante predecesor de la genética mendeliana, la frustración de Darwin con la herencia por mezcla lo llevó finalmente a desarrollar una teoría completamente errónea conocida como *pangénesis*. En la pangénesis de Darwin, se suponía que el cuerpo entero enviaba instrucciones a las células reproductoras. «Supongo», escribió en su libro *La variación de los animales y las plantas bajo domesticación*⁶⁹, que las células, antes de convertirse en una «materia formada» completamente pasiva, desprenden unos gránulos minúsculos o átomos que circulan libremente a través del sistema, y cuando reciben el nutrimento adecuado se multiplican por autodivisión, yendo a desarrollarse posteriormente en células como aquellas de las que se derivaron. [...] Por consiguiente, en rigor, no son los elementos reproductores [...] los que generan nuevos organismos, sino las propias células a través de todo el cuerpo.

Para Darwin, la gran ventaja que ofrecía la pangénesis en comparación con la mezcla era que si se producía algún cambio evolutivo durante la vida de un organismo, los gránulos (o «gémulas», como las llamaba) podían tomar

nota del cambio, alojarse en los órganos de la reproducción y garantizar que el cambio se transmitiese a la siguiente generación. Por desgracia, la pangénesis llevaba a la herencia justamente en la dirección contraria a la que pronto habrían de llevarla los genéticos modernos: es el huevo fecundado el que da las instrucciones para el desarrollo del cuerpo entero, y no al contrario. Confundido, Darwin se aferró a su equivocada teoría con una convicción parecida a la que antes había demostrado aferrándose a su teoría correcta de la selección natural. Pese a los ataques vehementes de la comunidad científica, Darwin escribió a su gran defensor Joseph Dalton Hooker en 1868: «Estoy convencido de que cada célula realmente desprende un átomo o gémula de su contenido; pero de un modo u otro, esta hipótesis sirve para establecer un útil enlace entre varias de las grandes clases de observaciones fisiológicas que en la actualidad se mantienen absolutamente aisladas». Añadía también con seguridad que incluso «si ahora la pangénesis se ha malogrado, en algún momento del futuro reaparecerá, gracias a Dios, engendrada por algún otro padre y bautizada con algún otro nombre». Este es un ejemplo perfecto de una idea brillante (la herencia particulada) que fracasó de manera estrepitosa porque se había asociado con el mecanismo equivocado para su implementación: la pangénesis.

En ningún lugar articuló Darwin con más claridad sus ideas atomísticas, esencialmente mendelianas, que en un intercambio que mantuvo con Wallace en 1866. Al principio, en una carta escrita el 22 de enero, observó: «Conozco un buen número de variedades, pues así debemos llamarlas, que no se mezclan ni combinan, sino que producen descendencia bastante parecida a alguno de los progenitores». Sin comprender lo que Darwin le decía, Wallace le respondió el 4 de febrero: «Si dice que "conozco un buen número de variedades que no se mezclan ni combinan, sino que producen descendencia bastante parecida a alguno de los progenitores", ¿no es esa la mismísima prueba fisiológica de una especie que faltaba para la *demostración completa* del "origen de las especies"?».

Consciente del equívoco, Darwin se apresuró a corregir a Wallace en su siguiente carta:⁷⁰

No creo que entienda usted lo que quiero decir al referirme a ciertas variedades que no se mezclan. No se trata de la fertilidad. Un caso lo clarificaré. Crucé guisantes Painted Lady y Purple, que son variedades de colores muy distintos, y obtuve, incluso en la misma vaina, ambas variedades perfectas, pero ninguna intermedia. Me imagino que algo por el estilo debe ocurrir al principio con sus mariposas y las tres formas de *Lythrum*; aunque en apariencia estos casos sean tan portentosos, no sé si realmente lo son más que el hecho de que cada hembra del mundo produzca descendientes que son machos o hembras, tan distintos unos de otras.

Esta carta es notable en dos aspectos. El primero es que Darwin describe aquí los resultados de unos experimentos parecidos a los que realizó Mendel; de hecho, los mismos experimentos que llevaron a Mendel a formular la herencia mendeliana. El propio Darwin se acercó bastante al descubrimiento de la razón mendeliana de 3:1. Tras cruzar la boca de dragón (de simetría bilateral) con su forma pelórica (de simetría radial), la primera generación de la descendencia estaba compuesta únicamente por el tipo común, mientras que en la segunda aparecieron ochenta y ocho comunes y treinta y siete pelóricas (una razón de 2,4:1). En segundo lugar, Darwin señala el hecho obvio⁷¹ de que la simple observación de que todos los descendientes sean machos o hembras, y no algún hermafrodita intermedio, en sí mismo ¡es un argumento en contra de la mezcla del «bote de pintura»! Así que Darwin tuvo ante sus ojos la prueba de la forma correcta de la herencia. Como ya había señalado en *El origen*: «El ligero grado de variabilidad de los híbridos del primer cruzamiento o de la primera generación, en contraste con su extrema variabilidad en generaciones posteriores, es un hecho curioso que merece atención». Nótese también que toda la correspondencia anterior entre Darwin y Wallace se desarrolló *antes* de la publicación de la reseña de Jenkin. En cualquier caso, aunque Darwin llegó a estar escalofriantemente

cerca del descubrimiento de Mendel, no llegó a comprender su enorme generalidad y no logró reconocer su importancia vital para la selección natural.

Para acabar de entender la actitud de Darwin hacia la herencia particulada, hay unas cuantas preguntas inquietantes a las que hay que dar respuesta. Gregor Mendel presentó su artículo fundacional⁷² en el que describía sus experimentos y su teoría genética, «Versuche über Pflanzen-Hybriden» («Experimentos sobre hibridación de plantas») ante la Sociedad de Historia Natural de Brno (Moravia) en 1865. ¿Es posible que Darwin leyera ese artículo en algún momento? ¿Cabe la posibilidad de que sus cartas a Wallace de 1866 se vieran influidas (al menos en parte) por los trabajos de Mendel, en lugar de reflejar sus propias ideas? Si había leído el artículo de Mendel, ¿por qué no comprendió que los resultados de Mendel proporcionaban la respuesta definitiva a las críticas de Jenkin?

Curiosamente, no menos de tres libros⁷³ publicados entre 1982 y 2000 afirman que se habían encontrado copias del artículo de Mendel en la biblioteca de Darwin, y un cuarto libro⁷⁴ (publicado en 2000) llegó incluso a asegurar que Darwin había proporcionado el nombre de Mendel para que se incluyera en la *Encyclopaedia Britannica*, en la entrada de «hibridismo». Obviamente, si esta última afirmación resultase ser cierta, significaría que Darwin era plenamente consciente del trabajo de Mendel.

En 2003, Andrew Sclater, del Darwin Correspondence Project de la Universidad de Cambridge⁷⁵, respondió de una manera definitiva todas estas preguntas. Por lo visto, el nombre de Mendel (como autor) no aparece ni una sola vez en la lista entera de libros y artículos que poseía Darwin. Esto no debe sorprender, toda vez que el artículo original de Mendel apareció en las actas, de poca difusión, de la Sociedad de Historia Natural de Brno, a las que Darwin nunca se había suscrito. Además, el trabajo de Mendel languideció sin que prácticamente nadie lo leyera durante treinta y cuatro años, hasta su redescubrimiento en 1900, cuando los botánicos Carl Correns de Alemania,

Hugo de Vries de Holanda y Erich von Tschermak-Seysenegg de Austria publicaron de manera independiente observaciones a favor de aquella teoría. No obstante, dos de los libros que sí poseía Darwin hacían referencia a los trabajos de Mendel. En *Los efectos de la fecundación cruzada y la autofecundación en el reino vegetal*, Darwin incluso cita uno de esos libros: *Untersuchungen zur Bestimmung des Werthes von Spezies und Varietät (Exámenes para determinar el valor de especie y variedad)*, de Hermann Hoffmann, publicado en 1869. Sin embargo, Darwin nunca citó el trabajo de Mendel ni hizo en el libro de Hoffmann ninguna anotación en la que citase a Mendel. Tampoco esto debe sorprender, puesto que el propio Hoffmann no supo comprender el verdadero significado del trabajo de Mendel y resumió las conclusiones de este con un enunciado más bien prosaico: «Los híbridos poseen la tendencia a revertir a sus progenitores en generaciones sucesivas». Los experimentos de Mendel con los guisantes se mencionaron también en otro libro que Darwin poseía: *Die Pflanzen-Mischlinge (Los híbridos de las plantas)*, de Wilhelm Olbers Focke. La figura 7 muestra la página del título, en la que Darwin escribió su nombre. Como he podido ver con mis propios ojos, este libro tuvo un destino aún menos distinguido: las páginas precisas en las que se describe el trabajo de Mendel ¡siguen sin cortarse en la copia del libro que poseía Darwin! (En las viejas encuadernaciones, las páginas estaban unidas por su margen externo y había que cortarlas). La figura 8 muestra una imagen de la copia de Darwin, realizada a petición mía, donde se pueden ver las páginas sin cortar. No obstante, si Darwin hubiese leído esas páginas, tampoco es mucho lo que habría esclarecido, puesto que Focke no logró comprender los principios de Mendel.

Todavía nos queda una pregunta: ¿es cierto que Darwin sugirió el nombre de Mendel a la *Encyclopaedia Britannica*? Sclater no dejó sombra de duda en su respuesta: de ninguna manera. En realidad, cuando el naturalista George Romanes le pidió que leyera un borrador sobre el hibridismo para la

Britannica y proporcionara referencias, Darwin le envió su copia del libro de Focke (con las páginas sin cortar), ¡y le sugirió a Romanes que aquel libro podría «ayudarle más de lo que yo mismo podría»!



Figura 7

En contraste con la total falta de familiaridad de Darwin⁷⁶ con los trabajos de Mendel, las teorías de Darwin sí que ejercieron una clara influencia sobre las ideas de Mendel, aunque no en 1854-1855, cuando Mendel comenzó sus experimentos con los guisantes. Mendel tenía la segunda edición alemana de *El origen*, que se publicó en 1863. En su copia, resaltó ciertos pasajes con líneas en el margen, y otros subrayando partes del texto. Las marcas de Mendel demuestran un gran interés por asuntos como la aparición repentina de nuevas variedades, la selección artificial y natural, y las diferencias entre especies. No cabe duda de que ya en 1866 la lectura de *El origen* había afectado de manera significativa a los escritos originales de Mendel, pues su

artículo refleja en muchos lugares aspectos diversos de los conceptos de Darwin. Por ejemplo, al discutir el origen de la variación heredable, Mendel escribe:

Si el cambio en las condiciones de la vegetación fuese la única causa de variabilidad, uno esperaría que las plantas agrícolas que durante siglos se han cultivado en condiciones casi constantes nunca revertieran de nuevo a la estabilidad. Como bien se sabe, no es así, pues precisamente entre esas plantas se encuentran no solo las más variadas sino las más variables⁷⁷.



Figura 8

Podemos comparar este lenguaje con el utilizado en uno de los párrafos de Darwin en *El origen*: «No se conoce ni un solo caso de un organismo que haya dejado de variar al ser cultivado. Nuestras plantas cultivadas más antiguas, como el trigo, todavía producen variedades nuevas, y nuestros animales domésticos más antiguos todavía pueden modificarse o mejorarse con rapidez»⁷⁸. Pero lo más importante es que, por lo que parece, Mendel podría haberse dado cuenta de que su teoría de la herencia podía solucionar el principal problema de Darwin: un suministro adecuado de variaciones heredables sobre las que la evolución podía actuar. Es precisamente en este

aspecto donde fallaba la herencia por mezcla, como había señalado Jenkin. Mendel escribió:

Si se acepta que el desarrollo de los híbridos tiene lugar de acuerdo con la ley establecida para *Pisum* [guisantes], cada experimento debe realizarse con un gran número de individuos... En *Pisum* se ha demostrado mediante experimentación que los híbridos producen óvulos y granos de polen de distintas constituciones, y que esta es la razón de la variabilidad de su descendencia⁷⁹.

En otras palabras, variación heredada y nada de mezcla. Además, Mendel intentó varias veces crear variaciones de plantas sacándolas de su hábitat natural y trayéndolas a su huerta en el monasterio. Cuando de este modo no logró producir cambio alguno, Mendel le dijo a su amigo Gustav von Niessl: «Esto al menos me parece claro: que la naturaleza no modifica las especies de este modo, así que debe actuar alguna otra fuerza». Mendel aceptó, por tanto, al menos algunas partes de la teoría de la evolución. Esto, sin embargo, plantea otra interesante pregunta: si Mendel estaba de acuerdo con los conceptos de Darwin y tal vez llegó incluso a reconocer la importancia de sus propios resultados para la evolución, ¿por qué en sus escritos no menciona a Darwin por su nombre? Para responder a esta pregunta tenemos que entender las especiales circunstancias históricas que rodearon a Mendel. El 14 de septiembre de 1852, el emperador austriaco Francisco José I dio autoridad al príncipe-obispo Rauscher para que actuase en representación suya en la negociación de un concordato con el Vaticano. Este concordato se firmó en 1855, y como reacción a los vientos de cambio que soplaban en Europa en 1848, contenía algunas reglas estrictas como: «Toda la instrucción escolar de los niños católicos se hará de acuerdo con las enseñanzas de la Iglesia católica... Los obispos tienen derecho a condenar libros injuriosos con la religión y la moral, y a prohibir que los católicos los lean».

A consecuencia de estas restricciones, por ejemplo, al paleontólogo Antonén Frič no se le permitió siquiera dictar conferencias en Praga, en Checoslovaquia, sobre sus impresiones acerca de un congreso científico celebrado en Oxford en 1860 en el que Huxley presentó la teoría de Darwin. Aunque el propio Vaticano⁸⁰ postergó durante muchas décadas un pronunciamiento oficial sobre la teoría de Darwin, un consejo de obispos católicos alemanes se pronunció de este modo en 1860: «Nuestros padres primeros fueron formados inmediatamente por Dios, por lo tanto declaramos que la opinión de aquellos que no temen aseverar que este ser humano [...] surgió al final de un cambio continuo y espontáneo de la naturaleza imperfecta a la más perfecta, es claramente contraria a las Sagradas Escrituras y a la Fe». En esta atmósfera tan opresiva, Mendel, que había sido ordenado sacerdote en 1847 y elegido abad del monasterio en 1868, probablemente no creyera prudente expresar ningún tipo de apoyo explícito a las ideas de Darwin.

Aún podemos preguntarnos qué habría pasado si Darwin hubiese leído el artículo de Mendel antes del 21 de noviembre de 1866, cuando acabó de escribir su capítulo sobre la descaminada pangénesis. Por supuesto, nunca lo sabremos, pero creo que no habría cambiado nada. Ni Darwin estaba preparado para pensar en términos de variación que afectasen solamente a una parte de un organismo y no a las otras, ni tenía la habilidad suficiente con las matemáticas para entender y valorar en su justa medida el enfoque probabilístico de Mendel. Desarrollar un mecanismo específico y universal a partir de unos pocos casos aislados de una razón 3:1 en la transmisión de algunas propiedades de una planta determinada no era el fuerte de Darwin. Además, la obstinada defensa que hizo Darwin de su teoría de la pangénesis sugiere que en aquel momento de su vida quizá estuviera afectado por lo que los psicólogos modernos denominan *ilusión de confianza*⁸¹, un estado común en el cual las personas sobrestiman sus capacidades. Aunque en principio se aplica a las personas que carecen de una habilidad pero no son

conscientes de ello, en algún nivel puede afectar a cualquiera. Hay estudios que demuestran, por ejemplo, que la mayoría de los jugadores de ajedrez creen que pueden jugar mucho mejor de lo que indica su posición en la clasificación formal. Si Darwin realmente hubiera sufrido una ilusión de confianza, resultaría bastante irónico, pues él mismo en una ocasión había tenido la perspicacia de observar que «la ignorancia engendra confianza con mayor frecuencia que el conocimiento».

Hicieron falta setenta años para resolver las complejidades que entraña el desarrollo de un enfoque cuantitativo de los fenómenos de la variación y las tasas de supervivencia, así como la integración plena de la selección darwiniana y la genética mendeliana. En un principio, en los años que siguieron al redescubrimiento, en 1900, del artículo pionero de Mendel de 1865, las leyes de la herencia de Mendel llegaron a considerarse incluso *opuestas* al darwinismo. Los genetistas argumentaban entonces que las mutaciones, que eran la única forma aceptable de variación heredable, eran abruptas y producían directamente el cambio final, en lugar de seleccionarse gradualmente. Esta oposición comenzó a disiparse hacia la década de 1920 como consecuencia de varios proyectos de investigación que abrieron nuevos caminos. En primer lugar, los experimentos de cruzamientos con la mosca del vinagre, *Drosophila*, que realizaron el biólogo Thomas Hunt Morgan y su grupo, demostraron sin lugar a dudas que los principios de Mendel eran universales. En segundo lugar, el genetista William Ernest Castle logró demostrar que se podían producir cambios heredados por medio de la acción de la selección natural sobre pequeñas variaciones en los rasgos de una población de ratas. Por último, el genetista inglés Cyril Dean Darlington descubrió los mecanismos que permiten el intercambio cromosómico de material genético. Todos estos estudios, y otros parecidos, mostraban que las mutaciones se producían con poca frecuencia y que en la mayoría de los casos conferían desventajas. En las raras ocasiones en que aparecían mutaciones ventajosas, se identificó a la selección natural como el único

mecanismo que podía permitir que se propagasen por la población. Además, los biólogos poco a poco fueron comprendiendo también que la actuación independiente de un gran número de genes puede dar como resultado la variación continua de una característica. El gradualismo de Darwin, por el que la selección natural producía adaptación al actuar sobre diferencias diminutas, acabó por imponerse.

El error de Darwin y la crítica de Jenkin tuvo otra consecuencia inesperada: en esencia, prepararon el camino para el desarrollo de la teoría de genética de poblaciones de la mano de Ronald Fisher, J. B. S. Haldane y Sewall Wright. Este fue el trabajo que aportó la prueba definitiva de que la genética mendeliana y la selección darwiniana eran complementarias y mutuamente indispensables. Teniendo en cuenta que Darwin se equivocó en la cuestión fundamental de la genética, es absolutamente prodigioso lo mucho que sí acertó.

La historia de la evolución no es, pues, una narración simple que vaya del mito al conocimiento, sino una colección de desviaciones, errores y caminos tortuosos. Con el tiempo, todos estos hilos entrelazados se unieron en una única conclusión: para entender la vida hace falta entender algunos procesos químicos tremendamente intrincados en los que intervienen algunas moléculas muy complejas. Recogeremos este hilo de nuevo en los capítulos 6 y 7, cuando nos ocupemos del descubrimiento de la estructura molecular de las proteínas y el ADN.

He mencionado antes que el artículo de Jenkin planteaba algunas otras objeciones a la teoría de la evolución de Darwin. En particular, Jenkin se basó en cálculos de su amigo y compañero, el famoso físico William Thomson (que más adelante sería lord Kelvin), que parecían demostrar que la edad de la Tierra era mucho más corta que los enormes periodos de tiempo que Darwin necesitaba para su teoría de la evolución. La controversia que siguió nos permitirá hacer algunas apreciaciones fascinantes no solo sobre las diferencias entre las metodologías utilizadas en diferentes ramas de la

ciencia, sino también (aunque debo admitir que de forma mucho más especulativa) sobre cómo funciona la mente humana.

Capítulo 4

¿Qué edad tiene la Tierra?

En el principio, Dios creó el Cielo y la Tierra [...] Este principio del tiempo corresponde, de acuerdo con nuestra cronología, a la entrada de la noche que precedió al día 23 de octubre del año 710 del calendario juliano.

James Ussher, 1658

Los humanos han sentido curiosidad por la edad de la Tierra desde el principio de la historia. A fin de cuentas, no es habitual que un solo número, la edad de la Tierra, pueda tener implicaciones importantes en campos tan diversos como la teología, la geología, la biología y la astrofísica. En todas estas disciplinas ha habido personajes con opiniones vehementes, de manera que no debería sorprendernos que hacia el siglo XIX los intentos por estimar la edad de la Tierra ya hubieran provocado más de una controversia agria.

El concepto de un tiempo universal y lineal no surgió de inmediato. En la antigua tradición hindú⁸², por ejemplo, el tiempo esencialmente carecía de límites y, como el antiguo símbolo del uróboros (la serpiente que se muerde la cola), se suponía que el universo experimentaba ciclos continuos de destrucción y regeneración. A pesar de ello, las sagas hindúes de la antigüedad llegaron a dar una cifra bastante «precisa» de la edad de la Tierra, que en 2013 habría sido de 1.972.949 114 años. En la tradición occidental, a Platón y Aristóteles les preocupaba más el *porqué* y el *cómo* del orden de la naturaleza que el *cuándo*, pero incluso ellos jugaron con la idea de los ciclos recurrentes, en sintonía con los movimientos celestiales. En la cristiandad, en cambio, se rechazó el tiempo circular a favor de una línea recta única, que no se repetía y que conducía desde la Creación al Juicio

Final. En este contexto religioso, las determinaciones de la edad de la Tierra habían sido durante siglos la prerrogativa de los teólogos. En una de las primeras estimaciones⁸³, en el año 169, Teófilo, el sexto obispo de Antioquía, llegó a la conclusión de que el mundo se había creado unos 5698 años antes. Su motivación para calcular la edad, según declaró, no era «proveer mera materia para mucha discusión» sino «arrojar luz sobre el número de años desde la fundación del mundo». Aunque Teófilo admitía cierto margen de error en sus cálculos, no pensaba que este fuese mayor de unos 200 años.

Muchos de los cronólogos que le siguieron tendieron a sumar simplemente los intervalos de tiempo entre acontecimientos bíblicos señalados, las edades de la muerte de ciertos individuos de acuerdo con las Escrituras o la duración de las generaciones. Entre estos estudiosos de la Biblia destacaron John Lightfoot⁸⁴, vicescanciller de la Universidad de Cambridge en el siglo XVII, y James Ussher, nombrado arzobispo de Armagh en 1625. Aunque Lightfoot elaboró con sumo cuidado el título del breve libro que publicó en 1642, *Unas pocas y nuevas observaciones basadas en el libro del Génesis, la mayoría de ellas ciertas, el resto probables, todas inocuas, extrañas y raramente escuchadas hasta ahora*, no dudó en proclamar que la creación del primer ser humano, Adán, ocurrió precisamente ¡a las nueve en punto de la mañana! Por lo que respecta a la fecha de creación del mundo, Lightfoot se decidió por 3928 AEC.

Los cálculos de Ussher fueron algo más sofisticados, puesto que complementó los relatos bíblicos con algunos datos astronómicos e históricos. Su puntillosa conclusión: el mundo apareció la noche anterior al 23 de octubre del año 4004 AEC. Esta fecha en concreto llegó a ser muy conocida en el mundo anglosajón porque se añadió en una nota al margen a la Biblia⁸⁵ inglesa de 1701.

Naturalmente, la visión cristiana del tiempo seguía muy de cerca la tradición judía, que a su vez se basaba sobre todo en una lectura literal del relato del libro del Génesis. En el contexto de un drama divino en el que

supuestamente el pueblo judío representaba el papel principal, disponer de una historia era claramente crucial. De acuerdo con esta herencia, el mundo habría sido creado hace unos 5773 años (respecto a 2013). Proféticamente, uno de los filósofos judíos más influyentes de la Edad Media, Maimónides (Moshe ben Maimon), argumentó en contra de una interpretación literal del texto bíblico. Como en una anticipación de lo que Galileo Galilei diría más de cuatro siglos más tarde, Maimónides defendió que cuando unos hallazgos científicos precisos entran en conflicto con las Escrituras, es necesario volver a interpretar los textos bíblicos. El filósofo judío holandés Baruch de Spinoza se hizo eco del mismo sentimiento: «El conocimiento de [...] casi todo lo que contienen las Escrituras debe buscarse únicamente en las propias Escrituras, del mismo modo que el conocimiento sobre la naturaleza se busca en la propia naturaleza»⁸⁶. De hecho, Maimónides no había sido siquiera el primero en sugerir que los pasajes del Génesis solamente tenían intención alegórica. En el siglo I, el filósofo judío helenista Filón de Alejandría (llamado el Judío) escribió con presciencia:

*Sería indicio de gran ingenuidad pensar que el mundo fue creado en seis días, o siquiera en cualquier tiempo; pues el tiempo no es otra cosa que la secuencia de días y noches, y estas cosas están conectadas con el movimiento del Sol por encima y por debajo de la Tierra. Pero el Sol es parte de la bóveda celeste, de manera que el tiempo debe reconocerse como algo posterior al cosmos. Así pues, lo correcto no sería decir que el mundo fue creado en el tiempo, sino que el tiempo debe al mundo su existencia*⁸⁷.

Como veremos en el capítulo 10, la última frase de Filón se ajusta de maravilla a las ideas que Einstein expresa en su teoría general de la relatividad.

El gran filósofo alemán Immanuel Kant fue uno de los primeros en juzgar de manera crítica el equilibrio entre la interpretación bíblica y las leyes de la ciencia física. Kant se decantaba de manera decidida por la física. En 1754 llamó la atención⁸⁸ sobre el peligro de basarse en el tiempo de una vida

humana para estimar la edad de la Tierra. Esto es lo que escribió: «El hombre comete el mayor de los errores cuando intenta utilizar la secuencia de las generaciones humanas que han transcurrido en un [periodo de] tiempo determinado como medida de la edad de la grandeza de la obra de Dios». Refiriéndose a un pasaje sarcástico⁸⁹ escrito por el autor francés Bernard le Bovier de Fontenelle en 1686, en el que las rosas metafóricamente ponderaban la edad de su jardinero, Kant añadió una «cita» de las rosas: «Nuestro jardinero es un hombre muy viejo; en la memoria de las rosas tiene el mismo aspecto que siempre ha tenido: no muere, ni siquiera cambia».

Más o menos al mismo tiempo que Kant reflexionaba sobre la naturaleza de la existencia, el diplomático y geólogo francés Benoît de Maillet llevó a cabo⁹⁰ uno de los primeros intentos audaces por utilizar observaciones reales y un razonamiento científico metódico para determinar la edad de la Tierra. De Maillet aprovechó su posición como cónsul general de Francia en diversos lugares alrededor del Mediterráneo para realizar observaciones geológicas que le llevaron al convencimiento de que la Tierra no podía haberse creado totalmente formada en un instante de tiempo. Al contrario, infirió una larga historia de procesos geológicos graduales. Consciente del riesgo que suponía poner en duda el dominio de la ortodoxia eclesiástica, De Maillet compuso su teoría sobre la historia de la Tierra en una serie de manuscritos que no fueron compilados, editados y publicados bajo el título de *Telliamed* («de Maillet» al revés) hasta 1748, diez años después de su muerte. La obra estaba escrita como una serie de conversaciones ficticias entre un filósofo indio (Telliamed) y un misionero francés. Aunque las ideas originales de De Maillet han quedado un tanto diluidas por la mano de su editor, el abad Jean Baptiste le Mascrier, todavía es posible discernir el argumento principal. En términos modernos, se trataba de una teoría de lo que hoy conocemos como sedimentación. Las conchas fosilizadas en rocas sedimentarias cerca de la cima de algunas montañas llevaron a De Maillet a la conclusión de que el

agua había cubierto completamente la Tierra. Esta hipótesis ofrecía una posible solución a una pregunta que dos siglos atrás había llevado de cabeza a Leonardo da Vinci: «¿Por qué se encuentran huesos de peces y ostras y corales y otras conchas y caracolas en las altas cimas de montañas que bordean los océanos, del mismo modo que se encuentran en las profundidades del mar?»⁹¹. De Maillet casó su teoría de una Tierra cubierta de agua con la teoría de Descartes sobre el sistema solar, en la que el Sol residía en un vórtice alrededor del cual daban vueltas los planetas, para afirmar que la Tierra estaba perdiendo su agua hacia el interior del vórtice. Tras haber observado en varios puertos antiguos, como Acre, Alejandría y Cartago, que el nivel del mar había descendido a razón de unos ocho centímetros por siglo, De Maillet estimó para la Tierra una edad de unos 2400 millones de años.

En rigor, los cálculos de De Maillet, así como la teoría en los que se basan, eran erróneos por varios motivos. En primer lugar, el mar nunca cubrió del todo la Tierra; De Maillet no cayó en la cuenta de que, en lugar de que descendiera el agua, podía levantarse la tierra. En segundo lugar, su conocimiento de la formación de las rocas era bastante deficiente, y además debilitó su argumentación con ocasionales incursiones en la fantasía. Por ejemplo, para sustentar su aseveración de que todas las formas de vida salieron del mar (una idea que en realidad es coherente con lo que hoy sabemos), De Maillet se basó en relatos sobre sirenas y hombres con cola. No obstante, la estimación que hizo De Maillet de la edad de la Tierra supuso un punto de inflexión en la manera de enfocar este problema. Por primera vez la edad de la Tierra no se medía con relación a la vida humana sino con relación al ritmo de los procesos naturales.

De Maillet humildemente dedicó su obra al dramaturgo romántico francés Cyrano de Bergerac, que había muerto un día antes del nacimiento de De Maillet⁹². Su dedicatoria comienza así: «Es a vos, Ilustre Cyrano, a quien dedico esta obra, pues ¿acaso podría escoger más digno Protector de las

extravagancias que encierra?». Hoy podemos apreciar que la obra de De Maillet era más que una «extravagancia»: contenía las semillas de la geocronología. Determinar la edad de la Tierra con métodos científicos estaba a punto de convertirse en un digno desafío para la ciencia.

La Tierra y la vida ganan una historia

En su obra maestra *Principia*, publicada originalmente en 1687, Isaac Newton observa que «un globo de hierro al rojo vivo⁹³ igual a nuestra Tierra, es decir, de unos 40.000 000 de pies [12.200 000 metros] de diámetro, apenas se enfriaría en un número igual de días, o en más de 50 000 años». Consciente de que no podía conciliar fácilmente este resultado con sus creencias religiosas, Newton se apresura a añadir: «Pero sospecho que, a tenor de algunas causas latentes, la duración del calor podría aumentar en una proporción menor a la del diámetro, y me complacería que esa proporción verdadera se investigara mediante experimentos».

Newton no fue el único científico del siglo XVII que reflexionó sobre este problema. Los famosos filósofos Descartes y Gottfried Wilhelm Leibniz también tratan el enfriamiento de la Tierra desde un estado inicial fundido. Sin embargo, la primera persona que parece haberse tomado seriamente el ruego de Newton sobre una investigación experimental, y que además disponía del ingenio suficiente para intentar utilizar el problema del enfriamiento para estimar la edad de la Tierra, fue el matemático y naturalista del siglo XVIII Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon.

Buffon fue un personaje verdaderamente prolífico que no solo fue un científico consumado sino también un hombre de negocios de éxito. Tal vez se le conozca sobre todo por la claridad y la persuasión con las que presentó un nuevo método para estudiar la naturaleza. La obra monumental de su vida, *Histoire Naturelle, Générale et Particulière*, de la cual se completaron treinta y seis volúmenes durante su vida (y ocho más se publicaron de manera póstuma), fue leída por la mayor parte de las personas cultas de la

época en Europa y América del Norte. El objetivo de Buffon era tratar sistemáticamente temas que iban del sistema solar, la Tierra y la raza humana a los distintos reinos de los seres vivos.

En su excursión mental al pasado físico de la Tierra, Buffon supuso que nuestro planeta⁹⁴ había comenzado siendo una esfera fundida después de ser eyectada del Sol a causa de la colisión con un cometa. Luego, en el más puro estilo de un experimentador, no quedó satisfecho con un escenario puramente teórico y procedió de inmediato a fabricar esferas de distintos diámetros y a medir con precisión el tiempo que tardaban en enfriarse. A partir de estos experimentos, estimó que el globo terrestre se había solidificado en 2905 años y había tardado 74 832 años en enfriarse hasta su temperatura actual, aunque sospechaba que el tiempo de enfriamiento debía ser mucho más dilatado.

Al final, sin embargo, no fue la física newtoniana pura lo que atrajo la atención sobre el problema de la edad de la Tierra. El creciente interés por el estudio de los fósiles durante el siglo XVIII convenció a naturalistas como Georges Cuvier, Jean-Baptiste Lamarck y James Hutton de que los registros tanto paleontológicos como geológicos requerían de la actuación de fuerzas geológicas durante periodos de tiempo larguísimos. Tan largos, de hecho, que, según decía Hutton, no había hallado «vestigios de un principio ni expectativa de un final»⁹⁵.

A la vista de la creciente dificultad de intentar embutir toda la historia de la Tierra en los pocos miles de años bíblicos, algunos de los naturalistas más religiosos (aunque no solo ellos) optaron por recurrir a catástrofes, por ejemplo inundaciones, como agentes de cambios rápidos. Si había que negar los grandes periodos de tiempo, las catástrofes se presentaban como el único vehículo que podía modelar apreciablemente la superficie de la Tierra de forma casi instantánea. Desde luego, la distribución de fósiles marinos proporcionaba pruebas claras de la acción de las inundaciones y de las glaciaciones en el pasado geológico de la Tierra, pero muchos de los

catastrofistas más ardientes se sentían motivados, al menos en parte, por su inquebrantable lealtad al texto bíblico más que por el testimonio científico. Richard Kirwan, uno de los químicos más conocidos de la época, articuló con suma claridad esta posición. Kirwan confrontó a Hutton directamente con Moisés al describir lo mucho que le preocupaba observar «cuán fatal ha resultado la sospecha de la gran antigüedad del globo para el crédito a la historia mosaica, y en consecuencia para la religión y la moralidad»⁹⁶.

La situación comenzó a cambiar de una manera drástica en los años 1830-1833 con la publicación de los tres volúmenes de los *Principios de geología* de Charles Lyell⁹⁷, que también era amigo cercano de Charles Darwin. Lyell argumentaba que las fuerzas que esculpieron la Tierra (vulcanismo, sedimentación, erosión y otros procesos por el estilo) se habían mantenido esencialmente inmutables a lo largo de la historia de la Tierra, tanto en su fuerza como en su naturaleza. Esta era la idea del uniformitarianismo que inspiró el concepto de Darwin del gradualismo en la evolución de las especies. La premisa básica era sencilla: si había algo que todas estas fuerzas geológicas de lenta actuación requirieran para tener un efecto apreciable, era tiempo. Mucho tiempo. Los seguidores de Lyell casi abandonan la idea de una edad definida para la Tierra a favor de una vaga noción de un tiempo «inconcebiblemente dilatado». En otras palabras, la Tierra de Lyell se encontraba *casi en un estado estacionario*, y sobre ella, a paso de caracol, actuaban cambios a lo largo de un tiempo casi infinito. Este principio contrastaba marcadamente con las estimaciones teológicas de unos seis mil años.

Hasta cierto punto, la perspectiva de una edad geológica inconmensurablemente grande impregnaba *El origen* de Darwin, por bien que el intento del propio Darwin de estimar la edad del Weald (el valle erosionado que se extiende a lo largo de la región sudeste de Inglaterra) resultase tan desastrosamente erróneo que más tarde habría de retractarse. Darwin imaginaba la evolución como una larga secuencia de fases, cada una

de las cuales duraba tal vez unos diez millones de años. Existía, sin embargo, una diferencia importante entre la posición de Darwin y la de los geólogos. Aunque desde luego hacían falta largos periodos de tiempo para que la evolución desarrollara su curso, Darwin insistía en una «flecha del tiempo» con una única dirección; no le satisfacía un estado estacionario o una progresión cíclica, pues el concepto de evolución impartía al tiempo una tendencia clara. Sin embargo, comenzaba a cocerse una controversia. No una personal entre Darwin y Lyell, ni siquiera entre la geología y la biología en general, sino entre un adalid de la física de un lado y algunos biólogos y geólogos del otro. Aquí es donde entra en escena uno de los físicos más eminentes de su tiempo: William Thomson, más tarde conocido como lord Kelvin.

Enfriamiento global

En 1897, el *Vanity Fair Album*, un compendio de lo más granado del famoso semanario de la sociedad británica, publicó un panegírico de lord Kelvin⁹⁸, un fragmento del cual dice así:

Su padre fue profesor de Matemáticas en Glasgow. Él mismo nació en Belfast hace setenta y dos años, y se educó en la Universidad de Glasgow y en St. Peter's, en Cambridge, de cuyo *College*, tras llegar a ser *Second Wrangler* y *Smith's Prizeman*⁹⁹, fue nombrado *Fellow*. Aunque no escocés, enseguida regresó a Glasgow como catedrático de Filosofía Natural, y desde entonces es tanto lo que ha inventado y, pese a su conocimiento matemático, tanto el bien que ha hecho, que su nombre, William Thomson, es conocido no solo a lo largo y ancho del mundo civilizado, sino también en todos los mares. Pues siendo un simple caballero inventó la brújula de marinero de *sir* William Thomson, así como una máquina de sondeo para la navegación, que tristemente es menos conocida. También ha hecho grandes aplicaciones de la electricidad en el mar: como ingeniero de varios cables atlánticos, como

inventor del galvanómetro de espejo y el registrador de sifón, y de mucho más que no solo es científico sino también útil. A tal punto es buen hombre que hace cuatro años fue ennoblecido como barón Kelvin de Largs; y aun así sigue lleno de sabiduría, pues pertenecer a la nobleza no lo ha malogrado... Sabe todo lo que se puede saber sobre calor, todo lo que hasta el momento se sabe sobre el magnetismo y todo lo que puede averiguar sobre la electricidad. Un gran científico, honesto y humilde, que es mucho lo que ha escrito y más aún lo que ha hecho.

Esta es una descripción bastante precisa, aunque a veces hilarante, de los numerosos logros de un hombre al que uno de sus biógrafos apodó como el «victoriano dinámico». En el momento de su ennoblecimiento, en el año 1892, Thomson adoptó el título de barón Kelvin de Largs, por el río Kelvin, que discurría cerca de su laboratorio en la Universidad de Glasgow. Lo de «Second Wrangler» se refiere a que Kelvin, para su decepción, quedó segundo en la lista final de honores de la escuela de matemáticas de Cambridge. Se cuenta que la mañana en que habían de publicarse los resultados de los exámenes, envió a su sirviente para que averiguase «¿quién es Second Wrangler?» y quedó desolado cuando este le comunicó «¡Usted, señor!». No cabe duda de que Kelvin fue la figura más destacada de la época que presencié el fin de la física clásica y el nacimiento de la era moderna. La figura 9 muestra un retrato de lord Kelvin, posiblemente realizado a partir de una fotografía tomada en 1876. Como corresponde, tras su muerte en 1907 fue sepultado en una tumba junto a la de Isaac Newton en la abadía de Westminster. Lo que el panegírico no reflejaba, sin embargo, fue cómo en sus últimos años el prestigio de Kelvin en los círculos científicos se había venido abajo. En su vejez, Kelvin se ganó una reputación como obstruccionista de la física moderna. A menudo se lo presenta como una persona aferrada con obstinación a sus ideas anticuadas, que se resistió a los últimos hallazgos sobre los átomos y la radiactividad. Pero lo más sorprendente es que, aunque James Clerk Maxwell se basó en algunas de las

aplicaciones de Kelvin de los principios de la energía para desarrollar su impresionante teoría del electromagnetismo, Kelvin todavía objetaba a la teoría, declarando: «Debo decir que lo único que en ella me parece inteligible, no me parece admisible»¹⁰⁰. A pesar de ser una persona con amplios conocimientos tecnológicos, Kelvin hizo declaraciones igualmente sorprendentes sobre la tecnología, por ejemplo: «No tengo ninguna fe en la navegación aérea más allá de los globos aerostáticos». Fue este enigmático hombre, un científico brillante de joven pero que de viejo había perdido contacto con la ciencia, quien intentó desacreditar las ideas de los geólogos sobre la edad de la Tierra.



Figura 9

El 28 de abril de 1862, Kelvin (que entonces todavía era Thomson) leyó ante la Real Sociedad de Edimburgo un artículo titulado «Sobre el enfriamiento secular de la Tierra»¹⁰¹. Este artículo seguía el hilo de otro artículo reciente,

publicado tan solo un mes antes con el título «Sobre la edad del calor del Sol»¹⁰². Thomson dejaba claro desde la primera frase que aquel no iba a ser un ensayo técnico fácil de olvidar. Era un ataque frontal contra la suposición de los geólogos acerca de la naturaleza inmutable de las fuerzas que habían modelado la Tierra:

Durante dieciocho años me ha inquietado¹⁰³ que principios esenciales de la termodinámica hayan sido ignorados por aquellos geólogos que de una manera intransigente se oponen a toda hipótesis paroxística, y mantienen no solo que tenemos ejemplos ahora, en la Tierra, de todas las distintas acciones por las que su corteza se ha ido modificando a lo largo de la historia geológica, sino que estas acciones nunca han sido, o en general no han sido, más violentas en el pasado que en nuestros tiempos.

Aunque lo de «inquietado» sea una pequeña exageración, sí es cierto que los primeros artículos de Kelvin sobre la cuestión de la conducción y distribución del calor por el cuerpo de la Tierra los había escrito mucho antes, en 1844 (cuando no era más que un estudiante de veinte años) y 1846, respectivamente. Incluso antes de cumplir diecisiete años, Thomson había logrado detectar un error en un artículo sobre el calor escrito por un profesor de Edimburgo.

El planteamiento de Kelvin era sencillo: las mediciones realizadas en minas y pozos indicaban que fluía calor desde el interior de la Tierra hacia su superficie, lo que implicaba que la Tierra había sido en su origen un planeta más caliente y se estaba enfriando. En consecuencia, argumentaba Kelvin, salvo que se pudiera demostrar la existencia de fuentes internas o externas de energía que compensaran las pérdidas de calor, estaba claro que no era posible ningún estado estacionario o la repetición de ciclos geológicos idénticos. Charles Lyell era consciente de este problema, y en sus *Principios de geología* proponía un mecanismo que se autosostenía, por el cual creía que se podía intercambiar energía química, eléctrica y calor de manera cíclica en el interior de la Tierra. Dicho llanamente, Lyell imaginaba que unas

reacciones químicas generaban calor, el cual impulsaba corrientes eléctricas que a su vez disociaban los compuestos químicos en sus constituyentes originales, y de este modo comenzaba de nuevo todo el proceso. Kelvin casi no podía disimular su desdén. Demostró con toda claridad que un proceso así equivalía a una suerte de máquina de movimiento perpetuo, violando el principio de disipación (y conservación) de la energía: cuando la energía mecánica se transforma de manera irreversible en calor, como en el caso de la fricción. El mecanismo de Lyell violaba las leyes básicas de la termodinámica. Para Kelvin, esta era la prueba definitiva de que los geólogos eran unos completos ignorantes de los principios de la física, y señaló cáusticamente:

Suponer, como Lyell ha hecho al adoptar la hipótesis química, que las sustancias, tras combinarse, puedan separarse de nuevo electrolíticamente mediante corrientes termoeléctricas, y que de ese modo la acción química y su calor prosigan en un ciclo sin fin, viola los principios de la filosofía natural exactamente del mismo modo, y en el mismo grado, como creer que un reloj construido con un movimiento que se dé cuerda a sí mismo pueda satisfacer las expectativas de su ingenioso inventor de mantenerse en marcha para siempre¹⁰⁴.

En lo más básico, el cálculo de Kelvin de la edad de la Tierra era simple. Como la Tierra se estaba enfriando, se podía utilizar la ciencia de la termodinámica para calcular la edad geológica finita de nuestro planeta: el tiempo que habría tardado en alcanzar su estado actual desde la formación de la corteza sólida. La idea en sí no era del todo novedosa; el físico francés Joseph Fourier¹⁰⁵ había desarrollado la teoría matemática de la conductividad térmica y del proceso de enfriamiento de la Tierra a principios del siglo XIX. Kelvin comprendió el potencial de la teoría y en 1849 se dedicó a realizar una serie de mediciones de temperaturas subterráneas (junto al físico James David Forbes), y en 1855 propuso con vehemencia que se realizara una

prospección geotérmica completa, precisamente para que se pudiera calcular la edad de la Tierra.

Kelvin había supuesto que el mecanismo que transportaba el calor desde el interior hasta la superficie era el mismo tipo de conducción que transfiere calor desde una sartén de hierro sobre un fuego hasta su mango. Aun así, para poder aplicar la teoría de Fourier al enfriamiento de la Tierra, necesitaba conocer tres cantidades físicas:

1. la temperatura interna inicial de la Tierra,
2. la tasa de cambio de la temperatura en función de la profundidad, y
3. el valor de la conductividad térmica de la corteza rocosa de la Tierra (que determina lo rápido que puede transportarse el calor).

Kelvin creía disponer de buenas estimaciones de dos de estas cantidades. Las mediciones realizadas por diversos geólogos habían mostrado que, aunque los resultados variaban de un lugar a otro, por término medio la temperatura aumentaba unos 3 °C por cada 100 metros de descenso (esta cantidad se conoce como gradiente geotérmico). En cuanto a la conductividad térmica, Kelvin se basó en sus propias mediciones de dos tipos de roca y de la arena, con lo que obtuvo lo que le pareció un promedio aceptable. La tercera cantidad física, la temperatura del interior profundo de la Tierra, era extremadamente problemática, puesto que no se podía medir directamente. Pero Kelvin no era un hombre que se dejara vencer fácilmente por las dificultades. Puso su mente analítica a trabajar y consiguió al fin deducir una estimación de la desconocida temperatura interna. Las contorsiones intelectuales que tuvo que realizar para llegar a este resultado mostraron al mejor Kelvin, pero también al peor. De un lado, su virtuoso dominio de la física y su capacidad para examinar alternativas potenciales con una lógica afilada como cuchilla no tenían parangón. Por otro lado, como veremos en el siguiente capítulo, a veces su exceso de confianza le llevaba a caer asaltado por sorpresa por posibilidades que no había contemplado.

Kelvin comenzó a atacar el problema de la temperatura interna de nuestro planeta analizando varios modelos posibles del enfriamiento de la Tierra. Según la suposición general, el estado inicial era de roca fundida como consecuencia del calor generado por alguna colisión, bien con varios cuerpos pequeños, como los meteoritos, bien con un solo cuerpo de masa casi igual. La posterior evolución de esa esfera fundida dependía de una propiedad de las rocas que no se conocía con certeza: si al solidificarse, la roca fundida se expandía (como el agua al congelarse) o se contraía (como los metales). En el primer caso, se podía esperar que la corteza sólida flotase sobre el interior líquido, igual que el hielo flota sobre la superficie de los lagos en invierno. En el segundo caso, las rocas sólidas, más densas, que se formasen en la superficie más fría de la Tierra acabarían hundiéndose, hasta que con el tiempo formarían una especie de andamiaje sólido que sostendría la corteza terrestre. Aunque las observaciones empíricas eran escasas, los experimentos con rocas fundidas de granito, pizarra y traquita parecían indicar que la roca fundida se contraía al enfriarse y al solidificarse. Kelvin utilizó esta información para esbozar una nueva posibilidad. Propuso que antes de que tuviera lugar la solidificación completa, el líquido más frío de la superficie se habría hundido hacia el centro, manteniendo de este modo corrientes de convección parecidas a las que se generan en el aceite de una sartén. En este modelo, se suponía que la convección mantenía una temperatura casi uniforme a todas las profundidades. En consecuencia, Kelvin supuso que en el punto de solidificación, la temperatura era en todos lados aproximadamente la temperatura de fusión de las rocas, y esta es la temperatura que atribuyó también al interior de la Tierra (suponiendo que el núcleo apenas se había enfriado desde entonces). Este modelo implicaba que la Tierra era casi homogénea en sus propiedades físicas. Por desgracia, ni siquiera este ingenioso truco acabó de resolver el problema, pues en tiempos de Kelvin no se conocía el valor de la temperatura de fusión de la roca. Así pues, se vio forzado a hacer la mejor conjetura que le permitía el

conocimiento disponible, adoptando finalmente una horquilla de valores aceptables entre 3800 y 5500 °C. (Unas mediciones sísmicas realizadas en 2007 arrojaron una temperatura de unos 3700 °C para una región situada a unos 3000 kilómetros bajo la superficie de la Tierra).

Juntando toda esta información, Kelvin por fin calculó una edad para la corteza de la Tierra: noventa y ocho millones de años. Tras estimar las incertidumbres en sus supuestos y en los datos de que disponía, Kelvin llegó a la conclusión de que podía establecer con cierta confianza¹⁰⁶ que la edad de la Tierra tenía que estar entre veinte millones y cuatrocientos millones de años.

En muchos sentidos, a pesar de la inseguridad de las suposiciones, se trataba de un cálculo realmente brillante. ¿Quién hubiera pensado que de verdad se podía calcular la edad de la Tierra? Kelvin abordó un problema aparentemente irresoluble y lo descifró. Utilizó principios físicos sólidos tanto en la formulación del problema como en su método de cálculo, y todo ello con las mejores mediciones cuantitativas disponibles en su época (algunas de las cuales realizó él mismo). En comparación con su determinación, las estimaciones de los geólogos no pasaban de burdas conjeturas y ociosas especulaciones basadas en procesos pobremente entendidos como la erosión y la sedimentación.

El número que Kelvin produjo (aproximadamente cien millones de años) era muy coherente con una estimación previa que había hecho de la edad del Sol. Esto era importante, pues incluso algunos de los coetáneos de Kelvin se dieron cuenta de que la fuerza de su argumentación sobre la edad de la Tierra se derivaba al menos en parte de la credibilidad que había ganado con sus cálculos solares. La premisa básica de Kelvin en el artículo «Sobre la edad del calor del Sol», y en varios artículos parecidos posteriores, no era demasiado distinta de la tesis central de su análisis de la edad de la Tierra. La suposición clave en ambos casos era que la *única* fuente de energía a disposición del Sol era la *energía gravitatoria* mecánica. Suponía que esta

era suministrada bien por la caída de meteoritos, como Kelvin imaginó inicialmente, para luego rechazar, bien, como propuso más tarde y reiteró con fuerza en 1887, por la continua contracción del Sol, que provocaba la disipación de su energía gravitatoria en forma de calor. Sin embargo, como el aporte de energía claramente no era infinito y el Sol la perdía sin cesar por radiación, Kelvin llegó a la conclusión, bien justificada, de que el Sol no podía mantenerse inmutable de manera indefinida. Para calcular su edad, tomó prestadas algunas ideas de las teorías de la formación del sistema solar propuestas por el físico francés Pierre-Simon Laplace y por el filósofo alemán Immanuel Kant, que complementó con algunas ideas importantes sobre la contracción potencial del Sol que había tomado de los trabajos de su coetáneo el físico alemán Hermann von Helmholtz. Tras tejer con todos estos hilos una historia coherente, Kelvin logró obtener una estimación aproximada¹⁰⁷ de la edad del Sol. El último párrafo del artículo de Kelvin deja claro que era consciente de las muchas incertidumbres implicadas:

Parece, pues, que en términos generales lo más probable es que el Sol no haya iluminado la Tierra durante cien millones de años, y casi cierto que no lo ha hecho durante quinientos millones de años. En cuanto al futuro, podemos decir, con igual certidumbre, que los habitantes de la Tierra no podrán seguir disfrutando de la luz y el calor esenciales para su vida durante muchos millones de años a no ser que existan en el gran almacén de la creación otras fuentes que hoy desconocemos¹⁰⁸.

Tal como describiré en el próximo capítulo (y explicaré con detalle en el capítulo 8), la última frase resultó ser del todo clarividente.

El hecho de que las edades calculadas para el Sol y la Tierra resultasen ser comparables aunque se hubiesen estimado de manera independiente, hacía que los cálculos de Kelvin fuesen más convincentes, pues había buenas razones para sospechar que todo el sistema solar se había formado más o menos al mismo tiempo. Aun así, no fueron pocos los geólogos británicos que no quedaron convencidos. Era casi como si para algunos de ellos

resultara más conveniente explicarlo todo, no mediante las leyes de la física, sino mediante aquello que en 1899 el geólogo americano Tomas Chamberlin había denominado, no sin cinismo, «imprudentes letras de cambio en el banco del tiempo». La mejor ilustración de la actitud escéptica hacia los hallazgos de Kelvin es una fascinante conversación que Kelvin mantuvo en 1867 con el geólogo escocés Andrew Ramsay. La ocasión en que se produjo fue una conferencia del geólogo Archibald Geikie sobre la historia geológica de Escocia. Kelvin describiría más tarde la charla¹⁰⁹ que mantuvo con Ramsay inmediatamente después de la ponencia, señalando que casi todas las palabras pronunciadas habían quedado «grabadas en mi mente»:

Le pregunté a Ramsay qué cantidad de tiempo requería aquella historia. Me respondió que no podía sugerir un límite. Yo le dije: «¿No supondrá usted que la historia geológica ha necesitado 1.000.000 000 de años?». «¡Desde luego que lo pienso!» «¿10.000.000 000 de años?» «¡Sí!» «El Sol es un cuerpo finito. Se pueden contar las toneladas. ¿Cree usted que lleva brillando un billón de años?» «Soy tan incapaz de estimar y entender las razones que ustedes, los físicos, aducen para limitar el tiempo geológico como usted es incapaz de entender las razones geológicas de nuestras estimaciones sin límites». Le respondí: «Puede entender perfectamente el razonamiento de los físicos si le dedica atención».

Kelvin tenía toda la razón. Dejando de un lado por un momento la cuestión de lo sólidas que fuesen sus suposiciones físicas y los detalles matemáticos de sus cálculos, la conclusión principal de Kelvin era accesible. Su argumentación era que si tanto el Sol como la Tierra estaban perdiendo energía y no poseían ninguna fuente conocida que pudiera reponer las pérdidas, el pasado geológico de la Tierra debía haber sido más activo que el presente. Un Sol más caliente habría causado una mayor evaporación, y consiguientemente una tasa mayor de erosión por la precipitación. Al mismo tiempo, una Tierra más caliente habría experimentado más actividad

volcánica. Por lo tanto, concluía Kelvin, la suposición uniformitarianista de una Tierra en un estado estacionario casi indefinido no se sostenía.

No sorprende, entonces, que en 1868, cuando Kelvin pronunció un discurso¹¹⁰ ante la Sociedad Geológica de Glasgow, escogiera como diana de sus mordaces críticas el primer texto que había llamado la atención de un amplio público hacia el principio del uniformitarianismo (formulado por James Hutton). Se trataba de la obra de 1802 *Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth (Ilustraciones de la teoría huttoniana de la Tierra)*, del científico escocés John Playfair. De este libro, Kelvin citó un sorprendente pasaje que para él representaba el paradigma de la opinión ortodoxa de los geólogos de la época:

Con qué frecuencia se han repetido estas vicisitudes de decadencia y renovación no es algo que nos sea dado determinar; constituyen una serie de la que, como bien ha señalado el autor de esta teoría [Hutton], no vemos ni el principio ni el final, una circunstancia que concuerda bien con lo que se conoce sobre otras partes de la economía del mundo [...] en los movimientos planetarios donde la geometría ha llevado la mirada tan lejos tanto hacia el futuro como hacia el pasado, no descubrimos tampoco marca alguna del comienzo o la terminación del orden actual. *No es, de hecho, razonable suponer que tales marcas puedan existir en ningún lugar* [la cursiva es mía]. El Autor de la naturaleza no ha dotado al universo de leyes que, como las instituciones de los hombres, lleven en sí mismas los elementos de su propia destrucción. No ha permitido en Su obra síntoma alguno de infancia o vejez, ni signo alguno por el que podamos estimar su duración pasada o futura. Puede darle fin, pues Él, sin duda, dio un principio al presente sistema en algún tiempo determinado; pero podemos concluir con seguridad que la gran *catástrofe* no será provocada por ninguna de las leyes que hoy existen, y que no es indicada por nada que podamos percibir.

La reacción de Kelvin hacia este fragmento fue despiadada. «Nada», dijo, «podría estar más lejos de la verdad». Explicando una vez más sus argumentos en términos que cualquiera pudiera entender, observó:

Si perforamos la Tierra en cualquier lugar, está caliente, y si pudiéramos aplicar esta prueba a la profundidad suficiente, no hay duda de que la encontraríamos muy caliente. Supongamos que tenemos aquí ante nosotros un globo de arenisca, y que al perforarlo hallamos que está caliente, si lo perforamos en otro punto también está caliente, y así siempre, ¿sería razonable decir que ese globo de arenisca se ha mantenido tal como es ahora durante mil años? Uno diría: «No; esa arenisca ha estado en el fuego, donde se calentó hace no muchas horas». Tan razonable sería coger un frasco de agua caliente, como los que se usan en los carros, y decir que esa botella ha estado así desde siempre, como para Playfair lo es afirmar que la Tierra podría haber sido siempre tal como es ahora, y que no muestra indicio alguno de un principio o de un progreso hacia un final¹¹¹.

Para reforzar aún más su argumentación, Kelvin decidió no basarse únicamente en su antiguo razonamiento sobre la Tierra y el Sol. Se le ocurrió una tercera línea de argumentación basada en la rotación de la Tierra alrededor de su eje. El concepto en sí era ingenioso y fácil de entender. Una Tierra inicialmente fundida habría adquirido, a causa de la rotación, una forma ligeramente elipsoidal, más achatada por los polos y más abultada por el ecuador. Cuanto mayor hubiera sido la rotación inicial, menos esférica habría sido la forma resultante. Esta forma, según infería Kelvin, se habría conservado tras la solidificación de la Tierra. Por consiguiente, se podían utilizar mediciones precisas de la desviación de la esfericidad para determinar la tasa de rotación inicial. Como era de esperar que las mareas provocadas por la gravitación de la Luna¹¹² actuaran como una fricción, ralentizando la rotación, se podía estimar cuánto tiempo se habría necesitado para reducir la tasa inicial de rotación hasta la actual de una rotación cada veinticuatro horas.

Aunque la idea era fascinante, convertirla en un valor para la edad de la Tierra era extremadamente difícil. El propio Kelvin admitía: «Con los datos imperfectos que poseemos sobre las mareas, es imposible calcular la magnitud de su efecto sobre la reducción de la rotación de la Tierra»¹¹³. No obstante, Kelvin pensaba que el solo hecho de que se *podiera* poner un límite a la edad de la Tierra, por mucha incertidumbre que tuviera, bastaba para refutar la idea uniformitarista de un tiempo inconcebiblemente dilatado. Refiriéndose a su propia estimación numérica de una lentificación de 22 segundos por siglo, llegó a la conclusión de que «[tanto si] el tiempo perdido por la Tierra es de 22 segundos en un siglo, como si es considerablemente más, o menos, que 22 segundos, el principio es el mismo. No puede haber uniformidad. La Tierra está repleta de pruebas de que no ha estado desde siempre en el estado actual, y de que se produce una progresión hacia un estado infinitamente distinto del actual».

Para decepción de Kelvin, la estimación basada en la tasa de rotación de la Tierra no perduró mucho tiempo, por lo menos no de una forma cuantitativa. El destino quiso que fuese precisamente George Howard Darwin, el quinto hijo de Charles Darwin, quien demostrase que el argumento no servía para estimar una edad. George fue un físico¹¹⁴ de considerable destreza matemática, y atacó el problema de la rotación de la Tierra alrededor de su eje con infinita paciencia y atención al detalle. En una serie de artículos publicados sobre todo entre 1877 y 1879, el joven Darwin logró demostrar que, contra lo que Kelvin creía, la Tierra podía seguir cambiando su forma de manera gradual aunque su tasa de rotación se fuese frenando. Esto era consecuencia de que incluso una Tierra solidificada¹¹⁵ no era completamente rígida. La conclusión era inequívoca. Darwin demostró que dadas las muchas incertidumbres sobre el interior de la Tierra, no había ninguna forma fiable de calcular la edad del planeta a partir de su tasa de rotación.

Huelga decir que Charles Darwin estuvo encantado¹¹⁶ de saber que su propio hijo había conseguido «hacer tambalear» al gran Kelvin, y exclamó: «Hurra

por las tripas de la Tierra y su viscosidad y por la Luna y por los cuerpos celestes y por mi hijo George».

Pero las investigaciones de George Darwin no afectaban a las principales afirmaciones de Kelvin, solo establecían que el tercer argumento de Kelvin (el concerniente a la rotación de la Tierra) no se podía usar para apoyar el *valor* de la estimación de la edad de la Tierra. No obstante, el trabajo de Darwin fue revelador en otro sentido: demostró que ni siquiera el augusto lord Kelvin era infalible. Como veremos en el siguiente capítulo, esto podría haber ayudado a abrir las puertas a otras críticas.

Impacto profundo

Describir la controversia sobre la edad de la Tierra como una batalla a muerte entre la física y la geología sería un error. Aunque no cabe duda de que existía tensión en la frontera entre estas disciplinas, tanto se veía Kelvin a sí mismo como parte de la corriente principal de la geología británica que en su conferencia ante la Sociedad Geológica de Glasgow de 1878 no dudó en declarar que «*nosotros, los geólogos* [la cursiva es mía], tenemos la culpa de no haber exigido a los físicos experimentos sobre las propiedades de la materia»¹¹⁷. Esta «flexible» identificación de su persona es un reflejo del mundo científico menos compartimentalizado del siglo XIX. Los científicos victorianos asistían libremente a las reuniones de sociedades que formalmente representaban otras ramas de la ciencia. Más que una disputa entre disciplinas, el debate sobre la edad de la Tierra era fundamentalmente una confrontación entre Kelvin y la doctrina de *algunos* geólogos.

Uno puede preguntarse qué motivó a Kelvin a examinar este problema. La respuesta es muy simple. El más superficial de los exámenes deja pocas dudas sobre el hecho de que fue la publicación de *El origen* de Darwin en 1859 lo que proporcionó el principal impulso para el ataque directo de Kelvin a las estimaciones de las edades del Sol y de la Tierra. Una cosa hay que dejar clara: Kelvin no ponía objeciones a la teoría de la evolución *per se*. Por

ejemplo, en su discurso presidencial de 1871 ante la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, apoyó hasta cierto punto algunas de las conclusiones de Darwin en *El origen*. Sin embargo, rechazaba de plano la selección natural porque «siempre había tenido la impresión de que esta hipótesis¹¹⁸ no contiene la verdadera teoría de la evolución, si es que ha habido evolución, en la biología». ¿Por qué no? Porque, según explicaba, estaba «profundamente convencido de que en los últimos años¹¹⁹, en las especulaciones zoológicas, se ha perdido demasiado de vista el argumento del diseño». En otras palabras, incluso este decidido físico matemático que apasionadamente declaraba que «la esencia de la ciencia [...] consiste en inferir las condiciones antecedentes y predecir las evoluciones en el futuro a partir de fenómenos que realmente se hayan observado», creía que «a todo nuestro alrededor hallamos pruebas extraordinariamente fuertes de un diseño inteligente». De hecho, Kelvin sostenía que las propias leyes de la termodinámica formaban parte de ese diseño universal. Con todo, deberíamos recordar que incluso si Kelvin se sentía en cierto modo emocionalmente apegado al concepto de «diseño», no cabe duda de que sus feroces críticas a las prácticas de los geólogos se basaban enteramente en la física, no en sus creencias religiosas.

¿Qué impacto tuvo Kelvin en la geología? Hasta la década de 1860, los geólogos estuvieron mucho más ocupados en discusiones sobre si el interior de la Tierra era sólido o fluido que preocupados por la cronología de la Tierra. Hacia mediados de la década de 1860, sin embargo, un número considerable de los geólogos más influyentes comenzaron a prestar atención de verdad¹²⁰ a lo que había dicho Kelvin. Entre estos, los más destacados fueron John Phillips, Archibald Geikie y James Croll. Basándose en estudios sobre los sedimentos, el propio Phillips había sugerido en 1860 una edad para la Tierra de unos noventa y seis millones de años. Hacia 1865, ya apoyaba públicamente a Kelvin. Geikie, el nuevo director del Servicio Geológico de Escocia, asumió más o menos el papel de comunicador y

mediador entre la física y la geología. De un lado, criticaba la afirmación de Kelvin de que el pasado geológico de la Tierra hubiera sido más activo, para lo cual citaba observaciones empíricas que parecían mostrar que, en todo caso, «la intensidad [...] en términos generales, ha ido aumentando». Por otro lado, en un artículo publicado en 1871, esencialmente abandonaba el uniformitarianismo y afirmaba que, basándose en investigaciones de la física, «alrededor de 100 millones de años es el tiempo asignado dentro del cual debe incluirse toda la historia geológica». Croll, un impresionante físico y geólogo autodidacta, estaba completamente convencido por los cálculos de Kelvin de una Tierra que se estaba enfriando, y aunque se mostraba en extremo escéptico sobre la estimación que había hecho Kelvin de la edad del Sol, aceptaba cien millones de años para la edad de la Tierra.

A menudo se puede juzgar si una teoría científica tuvo impacto por la vehemencia con la que anuncian sus objeciones los pesos pesados que tienen algo que perder. En el caso de Kelvin, la señal inequívoca de que la oposición había tomado nota llegó en febrero de 1869, cuando el biólogo Thomas Huxley atacó los cálculos de Kelvin.

Huxley se había ganado el apodo de «bulldog de Darwin» por su enérgico apoyo de la teoría de la evolución y el entusiasmo con que la defendía en los debates. Huxley amaba la controversia tanto como Darwin la detestaba. Es bien conocida su legendaria y breve confrontación verbal con Samuel Wilberforce, obispo de Oxford, el 30 de junio de 1860¹²¹. El encuentro se produjo en la biblioteca del Nuevo Museo de la Universidad de Oxford, durante el congreso anual de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia. La historia apareció relatada¹²² con todo lujo de jugosos detalles, algunos probablemente imaginarios, en el número de octubre de 1898 de la revista *Macmillan's*. El escritor lo recordaba así:

Tuve la fortuna de hallarme presente en Oxford en la memorable ocasión en que *Mr.* Huxley desafió al obispo Wilberforce [...] Entonces el obispo se alzó, y con un leve tono de burla, florido y fluido, nos aseguró que no había nada

en la idea de la evolución; que las palomas eran hoy lo que siempre habían sido. Entonces se giró hacia su antagonista y con una sonrisa insolente le suplicó que le aclarase si cuando afirmaba que descendía de un mono se refería al linaje de su abuela o al de su abuelo. *Mr.* Huxley se levantó lenta pero deliberadamente. Con su alta y esbelta figura, severa y pálida, con gran tranquilidad y gravedad pronunció ante todos nosotros aquellas palabras tremendas, unas palabras de las que nadie hoy está seguro, ni creo yo que nadie pudiese recordar al momento de ser pronunciadas, pues su significado nos dejó sin aliento, aunque sin ninguna duda sobre lo que eran. No le daba vergüenza tener un mono como antepasado; pero le avergonzaría estar vinculado con un hombre que usaba sus grandes dotes para oscurecer la verdad. Nadie dudó de su significado y su efecto fue formidable. Una dama se desmayó y tuvo que ser sacada de la sala.

Aunque hay muchas versiones¹²³ sobre las palabras exactas de este improvisado diálogo, las dotes oratorias de Huxley y el creciente sentimiento en contra de la intromisión de los hombres de la Iglesia en los asuntos de la ciencia han ayudado a que creciera la leyenda. El historiador de la ciencia James Moore¹²⁴ llegó incluso a afirmar: «Desde Waterloo, no hay otra batalla del siglo XIX que sea más conocida».

Huxley decidió asumir la defensa de los geólogos en su discurso presidencial de 1869 ante la Sociedad Geológica de Londres. Para empezar, aprovechó el hecho de que Kelvin había dirigido sus saetas contra un texto bastante antiguo de Playfair para hacer la cuestionable declaración de que «yo no creo que en la actualidad haya ningún geólogo que defienda un uniformitarianismo absoluto»¹²⁵. Prosiguió preguntándose retóricamente si algún geólogo había necesitado más de cien millones de años para la acción de la geología, lo que en realidad era un juego de manos porque el «maestro» de Huxley, el propio Darwin, había estimado para el Weald, erróneamente, una edad de trescientos millones de años. Por último, tras unas cuantas declaraciones más, discutibles pero elocuentes, Huxley

pronunció su propio resumen de que «el caso [contra la geología y la biología] se ha venido abajo completamente».

El discurso de Huxley suscitó la furiosa respuesta de uno de los más acérrimos defensores de Kelvin: Peter Guthrie Tait. Este matemático, que nunca dejó pasar una buena pelea, escribió una reseña de los discursos de Kelvin y Huxley en la cual, envueltos en unas cuantas frases corteses, escondió insultos dirigidos a Huxley. Entonces, para dar un golpe todavía más lacerante, Tait decidió dar una cifra para la edad de la Tierra que no solo no tenía ninguna justificación física sino que además era más pequeña incluso que las más extremas estimaciones de Kelvin:

Vemos que podríamos decir, con considerable probabilidad, que la Filosofía Natural ya apunta a un periodo de unos diez o quince millones de años como el máximo que cabe permitir para el propósito del geólogo y el paleontólogo; y que no es improbable que, con mejores datos experimentales, este periodo pueda reducirse todavía más¹²⁶.

El resultado neto de las provocadoras declaraciones de Tait fue un creciente sentimiento de descontento entre los geólogos, que tenían la impresión de que, pese a sus propios esfuerzos por abordar las limitaciones impuestas por Kelvin, no parecía que los físicos les correspondieran haciendo la menor concesión a las pruebas de la geología. En cualquier caso, si dejamos de lado estos detalles, no cabe duda de que, al menos conceptualmente, Kelvin había ganado la batalla y había triunfado la idea de un tiempo limitado en lugar de un tiempo inconmensurable para la edad de la Tierra. Hacia finales del siglo XIX, la idea de una Tierra en estado estacionario había dado paso a la comprensión de que el cálculo de la edad de la Tierra con la ayuda de principios físicos era parte de lo que debía hacer la geología.

Uno podría pensar que estos enormes avances para la geología, unidos a la multitud de otras contribuciones de Kelvin a la ciencia (publicó más de seiscientos artículos), lo habrían elevado al rango de los científicos de impacto imperecedero, como Galileo y Newton. Tristemente la realidad es

otra, y ni siquiera bastó el hecho de que Kelvin se sintiera tan cómodo en el mundo académico como en el técnico. En 1999 la revista *Physical World* y *Physics Web* (una publicación en Internet del Instituto Británico de Física) realizaron sendas encuestas en las que pidieron a un centenar de físicos destacados que nombrasen a los diez físicos más grandes de todos los tiempos¹²⁷. El nombre de Kelvin no apareció en ninguna de las dos listas. Al menos una de las razones del deterioro posterior del estatus de Kelvin tiene que ver con el debate sobre la edad de la Tierra: hoy sabemos que la edad de nuestro planeta es de unos 4540 millones de años¹²⁸. *¡Eso es unas cincuenta veces más que la estimación de Kelvin!* ¿Cómo pudo equivocarse tanto en unos cálculos supuestamente basados en las leyes de la física?

Capítulo 5

La certidumbre suele ser una ilusión¹²⁹

La ciencia solo se vuelve peligrosa cuando cree que ha alcanzado su objetivo.

George Bernard Shaw

El debate entre Kelvin y Thomas Huxley sobre la edad de la Tierra generó un considerable interés tanto entre científicos como entre el público en general. Pocos discutieron la valoración de que, en cualquier caso, la posición de Kelvin se había visto reforzada hasta cierto punto por esta guerra dialéctica. Huxley, sin embargo, planteó una cuestión que resultó ser particularmente perceptiva. De hecho, identificó el núcleo del error de Kelvin:

La matemática puede compararse con un molino de exquisita factura, que muele con cualquier grado de finura; sin embargo, lo que da depende de lo que se pone; y del mismo modo que el mayor de los molinos no extraerá harina blanca de unas vainas de guisante, tampoco unas páginas de fórmulas darán una respuesta definitiva a partir de datos imprecisos¹³⁰.

Lo cierto es que Kelvin tenía un dominio de la matemática tan excepcional que prácticamente quedaba garantizado que si había cometido algún error, no habría sido en los cálculos en sí. Fue el conjunto de *suposiciones* que alimentaron sus cálculos lo que había que inspeccionar a fondo.

El pupilo valiente

La primera persona que, aunque a regañadientes, probó suerte en la búsqueda de alguna fisura en los postulados originales de Kelvin fue un antiguo pupilo y ayudante de este, el ingeniero John Perry¹³¹. Da la

casualidad de que Perry estudió ingeniería con James Thomson, el hermano mayor de Kelvin, pero luego pasó un año en el laboratorio de Kelvin en Glasgow. Aunque la mayor parte de la producción científica de Perry se centró en la ingeniería eléctrica y en la física aplicada, hoy posiblemente se le conozca más por su breve incursión en la geología.

En agosto de 1894, Robert Cecil, el Tercer Marqués de Salisbury, pronunció el discurso inaugural del sexagésimo cuarto congreso de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia. Salisbury utilizó entonces la estimación que había hecho Kelvin de la edad de la Tierra (cien millones de años) para argumentar que la evolución por medio de la selección natural¹³² no se podía haber producido. Pero como suele ocurrir cuando los mensajes son demasiado dogmáticos, su discurso tuvo justamente el efecto contrario al que pretendía, al menos en John Perry. La negación por Salisbury de la teoría de la evolución convenció a Perry de que algo debía estar mal en los cálculos de Kelvin. Impresionado por la acumulación de datos geológicos y paleontológicos, Perry le escribió a un amigo físico¹³³ que «cuando tuve claro que necesariamente se debía haber producido un error [en las estimaciones de Kelvin], su descubrimiento dejó de ser una cuestión de suerte».

Perry finalizó la primera versión de su investigación sobre el problema del enfriamiento de la Tierra el 12 de octubre, y a lo largo de las semanas siguientes se dedicó a enviarle el artículo¹³⁴ a varios físicos (Kelvin entre ellos) para que le enviaran comentarios. Respetuoso incluso en sus críticas, Perry firmó la carta que le envió a Kelvin como «Su afectuoso pupilo». Aunque una media docena de físicos expresó su apoyo a las conclusiones de Perry, Kelvin ni siquiera se molestó en contestar. Perry tuvo una segunda ocasión cuando fue invitado a una cena en Trinity College, en Cambridge, a la que también iba a acudir Kelvin. La oportunidad de hablar con él cara a cara era demasiado buena para dejarla perder. Al día siguiente le describía emocionado el acontecimiento a un amigo físico:

Anoche me senté junto a él¹³⁵ [Kelvin] en Trinity y tuvo que escucharme. Sabía de antemano que no habría leído mis documentos, y así era, pero le di mucho que pensar y la sonrisa condescendiente que dirigía a mi ignorancia se le desdibujó en apenas 15 minutos. Creo que ahora sí que se ocupará del asunto. Geikie [el geólogo Archibald Geikie] estaba enfrente, y los ojos le brillaban de placer.

La revista científica *Nature* publicó al fin el artículo de Perry el 3 de enero de 1895¹³⁶. El trabajo comienza en tono apologético: «En varias ocasiones me han pedido amigos interesados en la geología que criticara los cálculos de lord Kelvin de la edad probable de la Tierra, y solía contestarles que era inútil esperar que lord Kelvin hubiera cometido un error en el cálculo». Perry pasa entonces a expresar sus reservas personales sobre la metodología utilizada en la geología de su tiempo: «Me desagradó enormemente tomar en consideración un problema cuantitativo planteado por un geólogo. Casi siempre las condiciones aportadas son demasiado vagas para que la cuestión resulte en modo alguno satisfactoria, y a un geólogo no parecen importarles demasiado unos cuantos millones de años en lo que respecta al tiempo». Por fin, Perry explica lo que a pesar de todo le había convencido para asumir la abrumadora tarea de desafiar a Kelvin: «Su cálculo se está utilizando en la actualidad para desacreditar los datos empíricos recogidos por geólogos y biólogos, y es por ello por lo que he considerado mi deber cuestionar los supuestos de Kelvin».

Perry centró su atención sobre todo en una de las suposiciones fundamentales de Kelvin: que la conductividad de la Tierra era *la misma* a cualquier profundidad. Dicho de otro modo, Kelvin daba por supuesto que el calor era transportado con una eficiencia uniforme, ya sea a un kilómetro de profundidad o a mil kilómetros. Esta hipótesis era crucial. Del mismo modo que un investigador forense puede determinar el momento de la muerte midiendo la temperatura de un cuerpo, Kelvin usaba su suposición para determinar la edad de enfriamiento de la Tierra midiendo en qué medida

aumentaba la temperatura del interior de la Tierra con cada metro de profundidad. El cálculo de Kelvin demostraba que si la Tierra tuviera más de cien millones de años, la temperatura aumentaría con la profundidad más lentamente de lo que se observaba, pues la piel enfriada sería más gruesa. Perry se preguntó: ¿y si en lugar de ser igual en todos lados, el transporte de calor fuese más eficiente en el interior que cerca de la superficie? Claramente, en ese caso la base del pellejo externo de la Tierra se mantendría caliente durante mucho más tiempo. En concreto, Perry demostró que si el interior de la Tierra fuese en parte fluido, entonces, igual que pasa con el agua cuando se la calienta en una olla honda, el calor llegaría por *convección* a la corteza superficial de una forma tan eficiente (por el propio fluido) que la estimación de la edad se podía extender hasta 3000 millones de años. Para concluir el artículo, Perry abordaba entonces los argumentos basados en la edad del Sol y la rotación de la Tierra, aunque en realidad no aportaba nada nuevo en su discusión de estas cuestiones. En lo que atañe a la cuestión del retardo impuesto por las mareas a la tasa de rotación de la Tierra, Perry llamaba la atención sobre todo a la demostración de George Darwin de que incluso una Tierra sólida podía alterar su forma. Al principio, el artículo de Perry (en la forma en que circuló antes de ser publicado) suscitó la respuesta no del propio Kelvin, sino de su autoproclamado «bulldog»: Peter Guthrie Tait. En una carta desdeñosa hasta el insulto, Tait escribió a Perry el 22 de noviembre de 1894¹³⁷:

[...] mi absoluto fracaso a la hora de comprender el objeto de su artículo. Pues me parece recordar que usted no tiene objeciones contra las matemáticas de lord Kelvin. ¿Por qué, entonces, traer las matemáticas a colación cuando resulta del todo obvio que cuanto mejor conductor sea el interior de la Tierra en comparación con la corteza, más atrás debe situarse el momento en que el conjunto estuviese a 7000 °F [3900 °C, la temperatura de fusión de las rocas aceptada por Kelvin], siendo el estado de

la corteza el actual? No creo que lord Kelvin se moleste en demostrar eso.

Parece que Tait no entendió el mensaje en absoluto. Como nadie en aquel entonces podía decir con ningún tipo de certeza cuáles eran realmente las condiciones del interior de la Tierra, lo que uno *supusiera* con el propósito de realizar los cálculos era pura conjetura. La intención de Perry no era otra que demostrar que si se partía de una suposición distinta de la de Kelvin sobre el interior de la Tierra, la de que en lo más hondo del planeta el calor se transportaba con mayor facilidad que en la corteza, entonces los cálculos basados en principios físicos se podían hacer compatibles con la dilatada edad que geólogos y biólogos requerían. El error de Kelvin fue *no darse cuenta de que los márgenes que permitían las observaciones existentes podían introducir en su estimación de la edad una incertidumbre mucho mayor de la que estaba dispuesto a aceptar.*

En su respuesta a Tait, Perry intentó ser cortés: «Dice usted que llevo razón¹³⁸, y me pregunta por mi objeto. No cabe duda de que la aseveración de lord Kelvin flaquea en cuanto se demuestra que hay otras condiciones *posibles* [la cursiva es mía] en el interior de la Tierra que arrojan muchas veces la edad que es el límite vuestro y el de él». En un lenguaje que probablemente reflejase la admiración de un antiguo asistente, añadía: «Lo que me turba es que no puedo ver de ningún modo que la razón esté de su lado, y sin embargo estoy tan acostumbrado a admirarle a usted y a lord Kelvin que se me antoja que debo ser poco menos que idiota por dudar, cuando usted y él tenían "tamaña confianza"».

No parece que Tait se hiciese eco de este tono conciliatorio, pues continuó su réplica desdeñosa: «Me gustaría tener su respuesta¹³⁹ a dos preguntas: (1) ¿En qué se basa usted para suponer que los materiales del interior de la Tierra sean mejores conductores que la corteza?». La segunda «pregunta» no era realmente una pregunta, sino una observación despectiva sobre las

insaciables expectativas de los geólogos: «(2) ¿Se imagina usted que cualquiera de los geólogos *avanzados* le agradecerá los diez mil millones en lugar de los cien millones? Lo menos que exigen es un billón, ¡y eso solo para una *parte* del periodo secundario!». (La figura 10 muestra una copia de esta nota). Pero Perry no se amilanó, e insistió: «Corresponde a lord Kelvin demostrar que la conductividad no es mayor en el interior¹⁴⁰».

Copy - 38 George Sq., Edinburgh 27/11/94

Dear Prof Perry

I should like to have your answer to two questions:-

1. What grounds leave you for supposing the inner materials of the earth to be better conductors than the shell?
2. Do you fancy that any of the advanced geologists would thank you for 10^{10} years instead of 10^9 ? Their least denial is 10^{12} ; - for part of the mere secondary period!

Yours Very
P. G. Tait

Figura 10

No hace falta decir que Perry tenía razón en su juicio. A falta de datos experimentales definitivos sobre las condiciones internas precisas de la Tierra, el hecho de que fuese capaz de demostrar que Kelvin *podía* estar equivocado por un factor considerable era más que suficiente.

Cuando por fin decidió responder, Kelvin fue mucho menos agresivo que Tait. Aunque declaró que «tengo la impresión de que no podemos suponer¹⁴¹ de ningún modo probables las enormes diferencias de conductividad y capacidad térmica a distintas profundidades que usted [Perry] utiliza en sus cálculos», también señalaba con un estilo insólitamente conciliador: «Me pareció que mi horquilla de 20 millones a 400 millones era probablemente lo bastante amplia, pero es del todo posible que debiera haber situado el límite

superior bastante más arriba, tal vez en 4000 en lugar de 400». Tal vez en ningún otro momento demostrase Kelvin tanto respeto hacia unas opiniones que contradecían las suyas. Lo más probable es que esta magnanimidad expresase su sentido de la obligación por mostrar empatía con un antiguo alumno. No obstante, se apresuró a insistir en que su estimación de la edad del Sol todavía «negaba la luz solar durante más de una veintena de millones de años, tal vez unas cuantas veintenas, del tiempo pasado¹⁴²». Como veremos más adelante en este mismo capítulo, Kelvin no tenía entonces ninguna razón para revisar su cálculo de la edad del Sol.

El reto de Perry hizo que Kelvin¹⁴³ se pasase el siguiente par de meses realizando experimentos en los que calentaba basalto, mármol, halita y cuarzo. Sus experimentos parecían demostrar, en concordancia con resultados recientes del geólogo suizo Robert Weber, que al aumentar la temperatura la conductividad no cambiaba mucho o incluso se reducía ligeramente. Por desgracia para Perry, los nuevos resultados de Weber contradecían los de sus propios experimentos, los que Perry había utilizado para defender su propuesta. Henchido de júbilo, Kelvin publicó¹⁴⁴ sus resultados en *Nature* el 7 de marzo de 1895, anunciando que «el profesor Perry y yo mismo no hemos tenido que esperar mucho [...] para descubrir que no hay fundamento para la suposición de que la conductividad de las rocas sea mayor a temperaturas más altas». Kelvin citaba además la conclusión del geólogo norteamericano Clarence King, quien (sin considerar la posibilidad de la convección en un fluido) afirmaba: «No tenemos razón alguna para extender la edad de la Tierra más allá de 24 millones de años». Kelvin declaró triunfante que «nada lo llevaba a diferir demasiado de su [refiriéndose a King] estimación de 24 millones de años».

Perry, sin embargo, no se quedó convencido. Centrándose en las condiciones internas *posibles* en lugar de intentar, como Kelvin, hacer conjeturas sobre las condiciones más *probables*, señaló que la conclusión de King todavía estaba restringida por la suposición de una Tierra sólida y homogénea. En un

artículo que apareció en *Nature* el 18 de abril de 1895, Perry resumía así sus opiniones sobre el punto muerto: «Es evidente que si en un principio tomamos cualquier ley probable de la temperatura en un equilibrio de convección y suponemos que debe haber mayor conductividad en el interior que en las rocas de la superficie, la ingeniosa prueba de *Mr. King* sobre la liquidez no nos impedirá prácticamente ninguna gran edad». La lógica de Perry era clara: su objetivo era demostrar que la Tierra podía ser más antigua que la estimación de Kelvin aunque las incertidumbres sobre la estructura interna de la Tierra le impidieran identificar el fallo preciso en el argumento de Kelvin. Quizá las mediciones de la conductividad de las rocas calentadas habían refutado una de las maneras en que el calor se podía transportar más fácilmente a mayores profundidades, pero quedaban abiertas otras posibilidades. En particular, la convección en una masa de carácter fluido era una alternativa atractiva.

La intuición de Perry resultó ser visionaria. Siguió manteniendo que el hecho de que el modelo de Kelvin no lograra producir mayores edades era una consecuencia directa de la suposición de Kelvin de una Tierra con una conductividad homogénea, y que esta limitación se podía superar con solo permitir la posibilidad de convección en el manto de la Tierra. A los geólogos del siglo XX les llevó varias décadas demostrar que Perry tenía razón. Entender que la convección era posible incluso dentro de lo que parecía ser un manto bastante sólido desempeñó un papel importante en la eventual aceptación de la idea (introducida en 1912 por el científico alemán Alfred Wegener) de la tectónica de placas y la deriva de los continentes. No solo el calor se puede transportar por el movimiento fluido sino que, durante largos periodos de tiempo, pueden desplazarse horizontalmente continentes enteros. Las condiciones precisas en la frontera entre el núcleo interior de la Tierra y la parte más externa sigue siendo un tema candente (no es un chiste) de investigación incluso en la actualidad.

Perry concluyó su último artículo¹⁴⁵ sobre el tema de la edad de la Tierra con una declaración absolutamente inequívoca:

A partir de los tres argumentos físicos [el freno físico de la rotación de la Tierra, el enfriamiento de la Tierra y la edad del Sol], los límites superiores de Kelvin son 1000, 400 y 500 millones de años, respectivamente. He mostrado que tenemos razones para creer que la edad, en los tres casos, puede estar gravemente subestimada. Debe tenerse en cuenta que si excluimos todo salvo los argumentos de la física pura, la edad *probable* de la vida en la Tierra es muy inferior a cualquiera de las estimaciones anteriores; pero si los paleontólogos tienen buenas razones para requerir un tiempo mucho más dilatado, no veo que haya nada desde el punto de vista de un físico que les niegue cuatro veces la mayor de aquellas estimaciones.

Perry no tenía ningún problema con admitir para la edad de la Tierra una edad de 4000 millones de años, una cifra muy cercada a los 4500 millones de años actualmente aceptados.

Las investigaciones de Perry abrieron la primera fisura en los cálculos aparentemente inamovibles de Kelvin al poner en entredicho los postulados de este sobre la solidez y homogeneidad de la Tierra. Había, no obstante, otra hipótesis crucial en la estimación de Kelvin de la edad de la Tierra: que no había ninguna fuente desconocida de energía interna o externa que pudiera compensar las pérdidas de calor. Hacia el fin del siglo XIX, unos acontecimientos echaron por tierra también esta premisa.

Radiactividad

En la primavera de 1896, el físico francés Henri Becquerel descubrió que la desintegración de los núcleos atómicos inestables iba acompañada de la emisión espontánea de partículas y radiación. El fenómeno pasó a conocerse como *radiactividad*¹⁴⁶. Siete años después los físicos Pierre Curie y Albert Laborde hicieron público que la desintegración de sales de radio proporcionaba una fuente de calor hasta entonces desconocida. Desde el

anuncio de Curie y Laborde, solo hicieron falta cuatro meses para que el astrónomo aficionado¹⁴⁷ William E. Wilson comenzara a especular con que esta propiedad del radio «tal vez nos proporcione una pista sobre la fuente de energía del Sol y las estrellas». En la estimación de Wilson, «3,6 gramos de radio por metro cúbico del volumen del Sol bastarían para suministrar su producción total de energía». Aunque la brevísima nota de Wilson en *Nature* tuvo relativamente poco eco en la comunidad científica, las implicaciones potenciales de una fuente de energía insospechada no escaparon a la atención de George Darwin¹⁴⁸. Este físico matemático que sin cesar buscaba la forma de liberar a la geología de la camisa de fuerza que le había puesto la cronología de Kelvin, declaró enfáticamente en septiembre de 1903: «La cantidad de energía disponible [en los materiales radiactivos] es tan grande que hace que sea imposible decir cuánto tiempo lleva existiendo el Sol o cuánto durará en el futuro». El físico y geólogo irlandés¹⁴⁹ John Joly acogió con entusiasmo esta declaración y la aplicó de inmediato al problema de la edad de la Tierra. En una carta a *Nature* publicada el 1 de octubre, Joly señaló que «una fuente de suministro de calor [los minerales radiactivos] en cada elemento de material» sería equivalente a un aumento de la transferencia de calor desde el interior de la Tierra. Eso era precisamente lo que, como Perry había mostrado, hacía falta para incrementar las estimaciones de la edad. Dicho de otro modo, en el escenario planteado por Kelvin, la Tierra se limitaba a perder el calor de sus reservas originales, pero el descubrimiento de una nueva fuente de calor interna parecía socavar los cimientos de este esquema.

Una de las figuras clave de la subsiguiente y frenética investigación sobre la radiactividad fue el joven físico nacido en Nueva Zelanda¹⁵⁰ Ernest Rutherford, quien más tarde sería conocido como «padre de la física nuclear». Por aquel entonces, Rutherford trabajaba en la Universidad McGill de Montreal (más tarde se trasladaría al Reino Unido), donde, tras numerosos experimentos, llegó a la conclusión de que los átomos de todos

los elementos radiactivos contenían enormes cantidades de energía latente que se podía liberar en forma de calor. Un periódico publicó el feliz anuncio de Rutherford de que la Tierra sobreviviría mucho más tiempo de lo que Kelvin había estimado con el titular: «El Día del Juicio Final, pospuesto». Por su parte, Kelvin mostró un enorme interés¹⁵¹ por los descubrimientos relacionados con el radio y la radiactividad, pero se mantuvo firme en su convicción de que no alterarían sus estimaciones de la edad. Negándose a admitir, al menos en un principio, que la fuente de energía de los elementos radiactivos pudiera provenir del interior, escribió: «Me atrevo a sugerir que, de algún modo, ondas etéreas podrían suministrar energía al radio mientras este cede calor a la materia ponderable de su entorno¹⁵²». En otras palabras, Kelvin proponía que los átomos simplemente recogían energía del éter (se creía que el éter impregnaba todo el espacio), solo para liberarlo de nuevo en el momento de desintegrarse. Sin embargo, demostrando una considerable valentía intelectual¹⁵³, abandonó esta idea en el congreso de 1904 de la Asociación Británica, aunque nunca publicó una retractación en un medio impreso. Lamentablemente, por alguna razón poco clara, en 1906 perdió de nuevo el contacto con el resto de la comunidad física al rechazar la idea de que la desintegración radiactiva transmutase un elemento en otro, aunque Rutherford y otros habían acumulado sólidas pruebas experimentales de este fenómeno. Durante este periodo, un antiguo colaborador de Rutherford, Frederick Soddy, perdió la paciencia. En un acre debate con Kelvin¹⁵⁴ en las páginas del *Times* de Londres, declaró irrespetuosamente: «Sería una lástima que el público se viera llevado a creer, equivocadamente, que quienes no han trabajado con cuerpos radiactivos [refiriéndose a Kelvin] tienen derecho a una opinión de tanto peso como aquellos que lo han hecho». Incluso antes de este altercado, en un libro que había publicado en 1904, Soddy no había dudado en declarar con firmeza que «las limitaciones con respecto a la historia pasada y el futuro del universo se han visto extendidas enormemente».

Rutherford fue algo más generoso. Muchos años más tarde explicó una y otra vez una anécdota relacionada con una conferencia sobre la radiactividad que había pronunciado en 1904 en la Royal Institution:

Entré en la sala, que estaba medio oscura, y al momento vi a lord Kelvin entre el público y comprendí que tendría problemas con la última parte del discurso, que trataba de la edad de la Tierra y expresaba opiniones contrarias a las suyas. Me alivió comprobar que enseguida se quedaba dormido, pero justo cuando llegaba al punto importante, vi cómo el viejo se incorporaba en su asiento, abría un ojo ¡y me dirigía una torva mirada! Entonces me vino la inspiración, y dije que lord Kelvin había limitado la edad de la Tierra *siempre y cuando no se descubrieran nuevas fuentes de calor*. Aquella profética declaración nos remite a lo que estamos discutiendo hoy, ¡el radio! ¡Ahí es nada! El viejo me dedicó una sonrisa¹⁵⁵.

Con el tiempo, la *datación radiométrica* se convirtió en una de las técnicas más fiables para determinar la edad de minerales, rocas y otros cuerpos geológicos, entre ellos la propia Tierra¹⁵⁶. Por lo general, un elemento radiactivo se desintegra en otro elemento radiactivo con una tasa que viene determinada por su *vida media*, es decir, el periodo de tiempo necesario para que la cantidad inicial del material radiactivo quede reducida a la mitad. La serie de desintegraciones continúa hasta que se alcanza un elemento estable. Midiendo y comparando las abundancias relativas de los isótopos radiactivos que aparecen en la naturaleza y de todos sus productos de desintegración, y combinando esos datos con las vidas medias conocidas, los geólogos han podido determinar la edad de la Tierra con una gran precisión. Rutherford fue uno de los pioneros de esta técnica, como bien documenta el siguiente relato: Rutherford paseaba por el campus universitario¹⁵⁷ con una pequeña roca negra en la mano cuando se encontró con su colega Frank Dawson Adams, un geólogo canadiense. «Adams», le preguntó, «¿qué edad se supone que tiene la Tierra?». Adams le respondió que distintos métodos habían arrojado una estimación de cien millones de años. Rutherford

comentó entonces tranquilamente: «Sé que este trozo de pechblenda [un mineral que contiene uranio] tiene 700 millones de años».

La mayoría de las descripciones de la controversia sobre la edad de la Tierra, si no todas, nos llevan a creer que la estimación de Kelvin, terriblemente incorrecta, fue una consecuencia directa del hecho de que ignoró la radiactividad. Si esa fuera toda la verdad, la pifia de Kelvin no habría figurado en este libro de errores, puesto que Kelvin no podía haber tomado en consideración una fuente de energía que todavía no se había descubierto. Lo cierto es que es erróneo atribuir completamente la determinación incorrecta de la edad a la radiactividad. Es cierto que las desintegraciones radiactivas dentro del volumen entero del manto de la Tierra (hasta una profundidad de unos 2900 kilómetros) producen calor con una tasa aproximadamente equivalente a la mitad de la tasa del flujo de calor a través del planeta. Pero no todo ese calor fluye fácilmente. Un examen meticuloso del problema revela que, dadas las suposiciones de Kelvin, si hubiese incluido el calentamiento radiactivo, en realidad solo debería haber considerado el calor generado en los primeros 100 kilómetros de la corteza exterior de la Tierra. La razón de ello es que Kelvin demostró que solo el calor de esas profundidades podía extraerse de manera efectiva por *conducción* en alrededor de un centenar de millones de años. Los geólogos Philip England, Peter Molnar y Frank Richter¹⁵⁸ demostraron en 2007 que cuando se toma en cuenta este hecho, al incluir la deposición de calor radiactivo, no se habría alterado de una manera significativa la estimación de Kelvin de la edad de la Tierra. El error más grave de Kelvin no fue el de haber desconocido la radiactividad (aunque, desde luego, una vez descubierta, no estaba justificado ignorarla), sino el de haber pasado por alto inicialmente, y objetado a ella más tarde, la posibilidad planteada por Perry de la convección dentro del manto de la Tierra. Esta fue la verdadera fuente de su estimación inaceptablemente baja de la edad.

¿Cómo pudo un hombre de la potencia intelectual de Kelvin estar tan seguro de que tenía razón incluso cuando estaba absolutamente equivocado? Como todos los seres humanos, Kelvin todavía tenía que utilizar el aparato que llevaba entre los oídos, y, aunque sea el de un genio, el cerebro tiene limitaciones.

Sobre la sensación de conocimiento

Como ni podemos entrevistar a Kelvin ni captar imágenes del funcionamiento de su cerebro, nunca sabremos con seguridad las razones exactas de su equivocada obstinación. Lo que sí sabemos, naturalmente, es que a las personas que pasan una buena parte de su vida profesional defendiendo ciertas proposiciones no les gusta admitir que se hayan equivocado. Pero ¿no debería Kelvin, con lo gran científico que era, haber sido distinto? ¿Acaso cambiar las teorías propias a raíz de nuevas observaciones experimentales no forma parte del modo de hacer de la ciencia? Por suerte, la psicología moderna y la neurociencia comienzan a arrojar algo de luz sobre lo que se ha dado en llamar «sensación de conocimiento», que casi con seguridad afectó a parte del pensamiento de Kelvin.

En primer lugar, conviene observar que en su aproximación a la ciencia y en su cruzada por el conocimiento, Kelvin era más afín a un ingeniero que un filósofo. Siendo, de un lado, un eficaz físico matemático, y de otro, un buen experimentalista, siempre buscó una premisa desde la que calcular o medir algo, más que una oportunidad para contemplar distintas posibilidades. Así pues, a un nivel muy básico, el error de Kelvin fue consecuencia de que creía que siempre se podía determinar lo que era *probable*, sin darse cuenta del omnipresente peligro de pasar por alto algunas posibilidades.

En un estrato algo más profundo, el error de Kelvin probablemente naciera de un rasgo psicológico bien reconocido: cuanto más comprometidos estamos con cierta opinión, menos probable es que la abandonemos, aunque nos veamos enfrentados a una gran cantidad de evidencia en contra. (¿No

recuerda esto un poco a aquello de las «armas de destrucción masiva»?) La teoría de la *disonancia cognitiva*¹⁵⁹, desarrollada originalmente por el psicólogo Leon Festinger, se ocupa precisamente de esas sensaciones de incomodidad que experimentan las personas cuando se les muestra información que no es coherente con sus propias creencias. Varios estudios demuestran que, en muchos casos, para aliviar la disonancia cognitiva, en lugar de aceptar un error de juicio, la gente tiende a reformular su forma de pensar de manera que justifique sus viejas opiniones.

La corriente mesiánica del movimiento judío hasídico¹⁶⁰ conocido como Chabad proporciona un ejemplo excelente, aunque esotérico, de este proceso de reorientación. La creencia en que el rabí Menachem Mendel Schneerson, un líder del Chabad, era el mesías judío cogió fuerza durante la década que precedió a su muerte en 1994. Después de que el rabí sufriera un ictus en 1992, muchos de los seguidores fieles del movimiento Chabad quedaron convencidos de que no moriría, sino que «se alzaría» como el Mesías. Cuando finalmente murió, docenas de sus seguidores, conmocionados por el acontecimiento, cambiaron su actitud y argumentaron (incluso durante el funeral) que su muerte era, de hecho, un *requisito* previo de su vuelta como Mesías.

Un experimento realizado en 1955¹⁶¹ por el psicólogo Jack Brehm, entonces en la Universidad de Minnesota, demostró una manifestación distinta de la disonancia cognitiva. En aquel estudio, a 225 mujeres estudiantes del primer año de universidad (los sujetos clásicos de los experimentos de psicología) se les pidió primero que ordenasen ocho artículos manufacturados según una escala de atractivo o deseabilidad entre 1,0 («no deseable en absoluto») y 8,0 («muy deseable»). En la segunda fase, se permitió a las estudiantes que eligiesen como regalo uno entre dos artículos de los ocho que les habían mostrado. Entonces se hizo una segunda ronda de puntuación de los ocho artículos. El estudio demostró que, en la segunda ronda, las estudiantes tendían a aumentar la puntuación del artículo que habían escogido y a

reducir la del que habían rechazado. Estos y otros hallazgos parecidos apoyan la idea de que nuestro cerebro intenta reducir la disonancia entre la cognición «escogí el artículo número tres» y la cognición «pero el artículo número siete también tiene algunos rasgos que lo hacen atractivo». Dicho de otro modo, las cosas nos parecen mejores después de haberlas escogido, una conclusión corroborada después por estudios de neuroimagen que muestran un aumento de la actividad en el núcleo caudado, una región del cerebro implicada en «sentirse bien».

El caso de Kelvin se ajusta como un guante a la teoría de la disonancia cognitiva. Tras repetir durante más de tres décadas sus argumentaciones sobre la edad de la Tierra, no era nada probable que Kelvin cambiase de opinión solo porque alguien sugiriera la *posibilidad* de la convección. Como se recordará, Perry no fue capaz de demostrar que la convección tuviese lugar, ni siquiera que fuese probable. Cuando una década más tarde la radiactividad apareció en escena, Kelvin probablemente estuviese aún menos inclinado a publicar una concesión de su derrota; al contrario, prefirió embarcarse en una complicada estrategia de experimentos y explicaciones con la intención de demostrar que sus antiguas estimaciones todavía podían considerarse válidas.

¿Por qué es tan difícil abandonar unas opiniones, aun a la vista de observaciones en contra que dejarían convencido a cualquier observador independiente? Tal vez se pueda hallar la respuesta en la manera como funcionan los circuitos de recompensa del cerebro. Ya en la década de 1950, los investigadores James Olds y Peter Milner¹⁶² de la Universidad McGill identificaron centros del placer en el cerebro de ratas. Lo que descubrieron fue que las ratas presionaban la palanca que activaba los electrodos colocados en aquellos puntos que inducían el placer ¡más de seis mil veces por hora! La potencia de esta estimulación del placer quedó ilustrada de una forma espectacular a mediados de la década de 1960, cuando unos experimentos mostraron que cuando se las obligaba a elegir entre obtener

comida y agua o la gratificante estimulación del placer, las ratas preferían una inanición que ellas mismas se imponían.

Durante las dos últimas décadas, los neurocientíficos han desarrollado sofisticadas técnicas de imagen que les permiten ver con todo detalle qué partes del cerebro humano se encienden como respuesta a gustos placenteros, música, sexo o a ganar una apuesta de juego. Las técnicas más utilizadas son el escáner de tomografía por emisión de positrones (TEP), en la que se inyectan trazadores radiactivos que luego se siguen en el cerebro, y la imagen por resonancia magnética funcional (IRMf), que permite un seguimiento del flujo de sangre hacia las neuronas activas. Varios estudios han demostrado que una parte importante¹⁶³ de los circuitos de recompensa está comprendida por un conjunto de neuronas que tienen su origen cerca de la base del cerebro (en una región conocida como área tegmental ventral, o ATV) y se comunican con el núcleo accumbens, una región situada debajo de la corteza frontal. Las neuronas del ATV se comunican con el núcleo accumbens mediante la emisión de un neurotransmisor químico llamado dopamina. Otras áreas del cerebro proporcionan los contenidos emocionales y relacionan la experiencia con los recuerdos, y con el desencadenamiento de respuestas. El hipocampo, por ejemplo, «toma notas» mientras la amígdala «puntuá» el placer implicado.

Entonces, ¿de qué manera se relaciona todo esto con los esfuerzos intelectuales? Para embarcarse en un proceso de pensamiento relativamente largo, y persistir en él, el cerebro necesita al menos alguna promesa de placer por el camino. Tanto si es el premio Nobel como la envidia de los vecinos, una subida de sueldo o la simple satisfacción de completar un Sudoku calificado de «diabólico», el núcleo accumbens de nuestro cerebro necesita algunas dosis de recompensa para seguir en marcha. Sin embargo, si el cerebro consigue recompensas frecuentes durante un largo periodo de tiempo, entonces, como en el caso de aquellas ratas que preferían la inanición, o de las personas adictas a las drogas, las vías neuronales que

conectan la actividad mental con la sensación de logro se van adaptando de una manera gradual. En el caso de los drogadictos, necesitan más drogas para obtener el mismo efecto. En el caso de las actividades intelectuales, puede dar lugar a una necesidad aumentada por tener razón todo el tiempo y, concomitantemente, una creciente dificultad para admitir los errores. El neurocientífico y escritor Robert Burton sugirió¹⁶⁴ específicamente que la insistencia en tener razón podía guardar un parecido psicológico con otras adicciones. De ser cierto, Kelvin sin duda encajaría con el perfil de un adicto a la sensación de tener razón. Casi medio siglo de lo que sin duda veía como una serie de batallas victoriosas con los geólogos debía haber fortalecido sus convicciones hasta el punto de que aquellos vínculos neuronales ya no podían disolverse. Con independencia de si, efectivamente, la sensación de tener razón es adictiva o no, los estudios de IRMf han demostrado que lo que se conoce como razonamiento motivado, cuando el cerebro converge en juicios que maximizan los estados de afecto positivos asociados con alcanzar objetivos, no está vinculado con la actividad neuronal¹⁶⁵ asociada a frías tareas de razonamiento. En otras palabras, el razonamiento motivado está regulado por las emociones, no por el análisis desapasionado, y su fin es minimizar las amenazas al yo. No es inconcebible que al final de su vida, la «mente emocional» de Kelvin ocasionalmente abrumara a su «mente racional».

El lector recordará que anteriormente me he referido al cálculo de Kelvin de la edad de la Tierra. No considero que esa estimación sea una pifia. ¿Cómo es eso posible? Al fin y al cabo, su estimación de menos de un millón de años era errónea en la misma magnitud que su valor para la edad de la Tierra.

Fusión

En un artículo sobre la edad de la Tierra escrito en 1893, tres años antes del descubrimiento de la radiactividad, el geólogo norteamericano Clarence King escribió: «La concordancia de resultados entre las edades del Sol y la Tierra

ciertamente refuerza la causa física y deposita el peso de la prueba sobre quienes se aferran a la edad vagamente vasta que se deriva de la geología sedimentaria¹⁶⁶». Un comentario sin duda perspicaz. Mientras la edad del Sol se estimase en solo unas pocas decenas de millones de años, cualquier estimación basada en la sedimentación tendría un techo, pues para que se produjera la sedimentación, la Tierra tenía que ser calentada por el Sol.

Conviene recordar que el cálculo de Kelvin de la edad del Sol se basaba enteramente en la liberación de energía gravitatoria en forma de calor a medida que el Sol se contrae. Esta idea, que la energía gravitatoria pudiera ser la fuente de la energía del Sol, es original del físico escocés John James Waterston, ya en 1845. Inicialmente ignorada, la hipótesis fue reavivada por Hermann von Helmholtz en 1854, y luego abrazada con entusiasmo y popularizada por Kelvin. Con el descubrimiento de la radiactividad, muchos dieron por hecho que se acabaría demostrando que la liberación radiactiva de calor era la fuente real de la energía del Sol. Pero no resultó ser así. Incluso bajo la suposición extravagante de que todo el Sol estuviera compuesto de uranio y sus productos de desintegración radiactivos, la energía generada no habría sido suficiente para explicar la luminosidad observada del Sol (siempre y cuando no se incluyan reacciones en cadena desconocidas en la época de Kelvin). La estimación de Kelvin de la edad del Sol había servido para reforzar su objeción a revisar¹⁶⁷ sus cálculos de la edad de la Tierra: mientras existiera el problema de la edad del Sol, la discrepancia con las estimaciones especulativas de la geología no quedaría plenamente resuelta. Pero no se consiguió dar respuesta a la pregunta de la edad del Sol hasta unas pocas décadas más tarde. En agosto de 1920¹⁶⁸, el astrofísico Arthur Eddington sugirió que la fuente de la energía del Sol podría ser la *fusión* de núcleos de hidrógeno para formar helio. A partir de esta idea, los físicos Hans Bethe y Carl Friedrich von Weizsäcker analizaron diversas reacciones nucleares con el propósito de explorar la viabilidad de esta hipótesis. Por fin, en la década de 1940, el astrofísico Fred Hoyle (cuyas investigaciones

pioneras estudiaremos en el capítulo 8) propuso que las reacciones de fusión de los núcleos estelares podían sintetizar los núcleos del carbono al hierro. Así pues, como ya he comentado en el capítulo anterior, Kelvin tenía razón cuando declaró en 1862: «En cuanto al futuro, podemos decir, con igual certidumbre, que los habitantes de la Tierra no podrán seguir disfrutando de la luz y el calor esenciales para su vida durante muchos millones de años *a no ser que existan en el gran almacén de la creación otras fuentes que hoy desconocemos* [la cursiva es mía]». La solución al problema de la edad del Sol necesitó nada menos que el genio combinado de Einstein, que demostró que la masa se podía convertir en energía, y de los más destacados astrofísicos del siglo XX, que identificaron las reacciones de fusión nuclear que podían conducir a esa conversión.

A pesar de que el cálculo de Kelvin de la edad de la Tierra fuera un error, sigue pareciéndome absolutamente genial. Kelvin había transformado completamente la geocronología de una vaga especulación en una ciencia de verdad, basada en las leyes de la física. Su trabajo pionero dio inicio a un diálogo vital entre geólogos y físicos, un diálogo que se mantuvo abierto hasta que se resolvió la discrepancia. Al propio tiempo, las investigaciones paralelas de Kelvin sobre la edad del Sol apuntaron claramente a la necesidad de identificar nuevas fuentes de energía.

El propio Charles Darwin era muy consciente de la importancia de eliminar el obstáculo a su teoría que suponían los cálculos de Kelvin. En su revisión final de *El origen*, Darwin escribió:

Por lo que respecta a que el lapso de tiempo no haya sido suficiente desde que nuestro planeta se consolidó para la cantidad supuesta de materia orgánica —y esta objeción, avanzada por *sir* William Thomson [Kelvin], probablemente sea una de las más graves planteadas hasta el momento—, tan solo puedo decir, en primer lugar, que no conocemos la tasa de cambio de las especies medida en años, y, en segundo lugar, que muchos filósofos todavía no están dispuestos a admitir que sabemos lo bastante de la

constitución del universo y del interior de nuestro globo para especular con seguridad sobre su duración en el pasado.

Darwin no vivió para ver cómo la idea de Perry de una Tierra convectiva, el descubrimiento de la radiactividad y la comprensión de las reacciones de fusión nuclear en el interior de las estrellas echaban por tierra todos los límites impuestos por Kelvin a la edad de nuestro planeta. Queda el hecho, sin embargo, de que fue el cálculo de Kelvin, por erróneo que fuera, lo que identificó el problema que había que resolver.

Desde nuestra perspectiva como humanos, uno de los beneficios fundamentales de que la Tierra haya disfrutado de 4500 millones de años de energía del Sol ha sido el surgimiento de la vida compleja. Pero las piezas con las que se construyen todas las formas de vida son células, y hacia la década de 1880, los científicos, usando sistemas ópticos cada vez mejores para examinar su estructura interna, acuñaron el término «cromosoma» para referirse a unos cuerpos con aspecto de pequeñas cuerdas que encontraban en el núcleo de las células. Poco tiempo después se redescubrieron las investigaciones de Mendel sobre los genes (o «factores», como él los llamaba), y los trabajos pioneros de Thomas Hunt Morgan y sus estudiantes en la Universidad de Columbia permitieron mapear las posiciones de los genes en los cromosomas. En 1944, una molécula particular, el ADN, que se encuentra en los cromosomas, comenzó a recibir atención. No pasó mucho tiempo antes de que los científicos se dieran cuenta de que todas las células reciben sus instrucciones no de las proteínas, sino de dos moléculas, los ácidos nucleicos ADN y ARN. Los biólogos identificaron a las moléculas de ADN como los directores de toda la frenética actividad de las células y como las moléculas que saben cómo hacer copias idénticas de sí mismas. Se demostró asimismo que las moléculas de ARN (ácido ribonucleico) están a cargo de transmitir las instrucciones emitidas por las moléculas del ADN al resto de la célula. Conjuntamente, estas dos moléculas contienen toda la información necesaria para que un manzano, una serpiente, una mujer o un

hombre funcionen. Los descubrimientos de las estructuras moleculares de las proteínas y del ADN son dos de las historias más fascinantes de la búsqueda del origen y funcionamiento de la vida. Pero también durante estos descubrimientos se produjeron grandes errores.

Capítulo 6

El intérprete de la vida

En el ámbito de la observación, la suerte solo favorece a las mentes que están preparadas.

Louis Pasteur

La sala de conferencias¹⁶⁹ del Laboratorio Kerckhoff en Caltech casi nunca había estado tan abarrotada como aquel día de diciembre de 1950. Corría el rumor de que el famoso químico Linus Pauling estaba a punto de revelar algo realmente asombroso, tal vez incluso la solución a uno de los grandes misterios de la vida. Cuando por fin llegó, uno de sus ayudantes de investigación traía consigo un objeto que parecía una gran escultura cubierta por una tela y atada con un cordel. La conferencia demostró una vez más el virtuoso dominio de la química que poseía Pauling y su exquisita capacidad para el espectáculo. Tras mantener a su audiencia en vilo durante un tiempo, Pauling por fin utilizó su navaja para cortar el cordel y, como el mago que saca un conejo de la chistera, desveló lo que ha dado en conocerse como *hélice alfa*: un modelo tridimensional de palillos y bolas de la principal característica estructural de muchas proteínas.

Una de las personas que poco después oyó relatar la pirotécnica conferencia de Pauling, aunque por aquel entonces se encontraba a miles de kilómetros de distancia en Ginebra (Suiza), fue James Watson, quien solo tres años más tarde descubriría (junto a Francis Crick) la estructura del ADN. Watson estaba visitando al biólogo¹⁷⁰ molecular suizo Jean Weigle, que acababa de regresar después de pasar el invierno en Caltech. Aunque Weigle no podía juzgar adecuadamente la corrección del multicolor modelo de madera de Pauling, su relato sobre la deslumbrante conferencia fue suficiente para

intrigar y envalentonar a Watson. Volveremos a esta apasionante historia más adelante en este mismo capítulo.

En septiembre de 1951, el relato de los logros científicos de Pauling había alcanzado incluso las páginas de la revista *Life*¹⁷¹, donde la fotografía de un sonriente Pauling señalando su modelo de la hélice alfa iba acompañada del titular: «Los químicos resuelven un gran misterio: Determinada la estructura de la proteína». El artículo de *Life* no era más que un breve resumen, en lenguaje popular, del que había sido un año de milagros en la larga carrera de Pauling. Baste con observar que el número de mayo de 1951 de *Proceedings of the National Academy of Sciences* contenía no menos de siete artículos de Pauling y su colaborador, el químico Robert Corey, sobre la estructura de proteínas que iban desde el colágeno (la proteína más abundante en los animales) a las cañas de las plumas. Aquel número marcaba la culminación de quince años de investigaciones vanguardistas de Pauling.

El camino hacia la hélice alfa

Pauling comenzó a pensar en las proteínas¹⁷² en la década de 1930. Sus primeros artículos sobre el tema¹⁷³ proponían una teoría para la hemoglobina (la proteína con hierro de los glóbulos rojos de la sangre) en la que sugería que cada uno de los cuatro átomos de hierro de la molécula establecía un enlace químico con una molécula de oxígeno. Mientras trabajaba en aquel asunto, Pauling fue pionero de una nueva técnica experimental. Se le ocurrió la idea de que midiendo las propiedades magnéticas de algunas proteínas se podría obtener información importante sobre la naturaleza de los enlaces formados entre los átomos de hierro y los grupos que los rodeasen. Aquel método resultó ser una magnífica herramienta para la química estructural. Pauling supo sacarle partido a las características magnéticas; por ejemplo, para determinar las tasas de varias reacciones químicas.

Más o menos al mismo tiempo, Alfred Mirsky, un destacado experto en proteínas¹⁷⁴, llegó a Pasadena para pasar un año trabajando con el grupo de Pauling. Esta casual colaboración entre los dos científicos acabó siendo el punto de partida de una búsqueda de enorme éxito. Mirsky y Pauling fueron los primeros¹⁷⁵ en proponer que una proteína nativa (es decir, una proteína no alterada, en su estado natural dentro de la célula) está compuesta por cadenas¹⁷⁶ de aminoácidos conocidos como *polipéptidos*, que se encuentran plegados de una forma regular. Muy poco tiempo después, Pauling se dio cuenta de que una cuestión clave era la naturaleza precisa de este plegamiento. Por suerte, a principios de la década de 1930 habían comenzado a surgir algunas pistas gracias a experimentos de difracción de rayos X. En la aplicación de esta potente técnica, los científicos proyectan un haz de rayos X sobre un cristal, y luego intentan reconstruir la estructura del cristal (las distancias entre los átomos y sus orientaciones mutuas) a partir de la forma en que los rayos invisibles rebotan en la muestra. Pauling tenía a su disposición los patrones de rayos X obtenidos por el físico William Astbury¹⁷⁷ a partir de pelo, lana, cuernos y uñas (unas proteínas conocidas como *alfa queratina*). Sin embargo, las fotografías de rayos X eran bastante borrosas, y no permitían una determinación fiable de la estructura. No obstante, las fotos parecían indicar que la unidad estructural se repetía a lo largo del eje del pelo cada 5,1 angstroms. (Un angstrom es una unidad de longitud equivalente a una cien millonésima de un centímetro). Dada la calidad relativamente pobre de los patrones de rayos X, Pauling decidió atacar el problema desde el otro extremo: utilizando la química estructural (las interacciones esperadas entre átomos) para predecir las dimensiones y la forma de la cadena de polipéptidos, y luego mirar cuál de las distintas configuraciones posibles era coherente con la información deducida de las imágenes de rayos X.

Pauling se sumergió en la solución¹⁷⁸ del rompecabezas del plegamiento a principios del verano de 1937, cuando por fin quedó liberado de sus

obligaciones docentes. La figura 11 muestra un dibujo esquemático¹⁷⁹ del tipo de estructura general que tenía en mente. Mediante un análisis meticuloso del enlace químico entre el átomo de carbono (designado con una «C» en la figura) y su átomo de nitrógeno adyacente (designado con «N»), Pauling llegó a la conclusión de que el carbono, el nitrógeno y los cuatro átomos vecinos (que colectivamente se conocen como grupo péptido) tenían que situarse *en el mismo plano*. Esta característica general resultó ser extremadamente importante porque restringía mucho el número de estructuras posibles, y Pauling, en consecuencia, tenía la esperanza de poder identificar la configuración correcta. Pero la ciencia raramente progresa exactamente como se espera. A pesar de varias semanas de intenso trabajo, Pauling no logró hallar la manera de plegar las cadenas de péptidos de forma que reprodujeran la repetición cada 5,1 angstroms a lo largo del eje de la fibra tal como parecían indicar los resultados de rayos X. Frustrado, abandonó el problema.

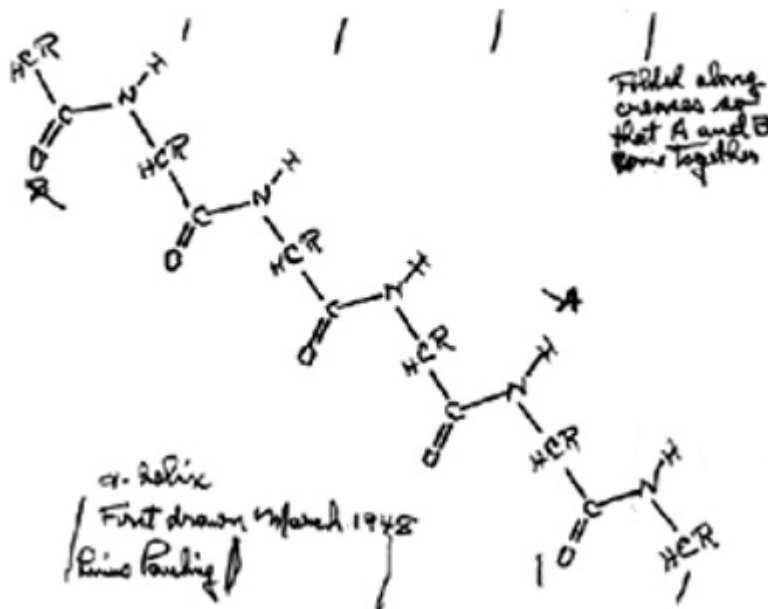


Figura 11

Cuando una hipótesis prometedora no acaba de funcionar, los científicos a menudo intentan mejorar la calidad de los datos experimentales disponibles, pues una información mejor puede dejar al descubierto pistas que antes habían quedado ocultas. Con esta esperanza, Pauling convenció a Robert Corey¹⁸⁰ para que se embarcase en un proyecto a largo plazo dirigido a determinar la estructura de algunos aminoácidos y péptidos simples (las piezas básicas de las proteínas) con la ayuda de la cristalografía. Corey se entregó con entusiasmo a estas investigaciones, y en 1948 él y sus colaboradores de Caltech habían conseguido desvelar la arquitectura precisa de una docena de estos compuestos. Tras comprender que todos los hallazgos de Corey sobre las longitudes de los enlaces químicos y los ángulos entre distintas partes de las moléculas, así como sobre la *planaridad* (la situación de los átomos en un mismo plano) del grupo péptido concordaban con exactitud con sus propias formulaciones previas, Pauling decidió reexaminar el problema de la estructura de la proteína alfa queratina. En una narración de los hechos que dictó en su (ya entonces anticuado) Dictaphone en 1982, Pauling recordaba las circunstancias:

En la primavera de 1948, estaba en Oxford, en Inglaterra, en calidad de Profesor George Eastman de aquel año y como *fellow* de Balliol College. Pillé un resfriado y durante unos tres días tuve que quedarme en cama. A los dos días ya me había cansado de leer historias de detectives y de ciencia ficción, y comencé a darle vueltas a la estructura de las proteínas¹⁸¹.

Pauling comenzó su nueva arremetida contra el rompecabezas partiendo de la suposición de que todos los aminoácidos de la alfa queratina debían ocupar una posición estructuralmente parecida con respecto a la cadena de polipéptidos. Mientras aún guardaba cama, le pidió a su esposa, Ava Helen, que le trajera un lápiz, una regla y una hoja de papel. Manteniendo los grupos péptidos sobre el plano del papel, usando líneas más gruesas o más delgadas para indicar las relaciones tridimensionales, y rotando alrededor de los dos enlaces sencillos con los átomos de carbono (conservando el ángulo

de rotación de un grupo péptido a otro), Pauling creó una *hélice*¹⁸², una estructura en forma de escalera de caracol, en la que la columna vertebral formada por el polipéptido constituía el núcleo de la hélice, y los aminoácidos se proyectaban hacia el exterior (figura 12). Para estabilizar la construcción, Pauling formó enlaces de hidrógeno entre una vuelta de la hélice y la siguiente, en paralelo al eje de la hélice. (Figura 12; un enlace de hidrógeno es un enlace químico en el que un átomo de hidrógeno de una molécula se ve atraído hacia un átomo de otra molécula). De hecho, encontró dos estructuras que podían funcionar, una de las cuales denominó hélice alfa, y la otra hélice gamma. Que Pauling lograra encontrar soluciones al problema con unas herramientas tan rudimentarias atestigua lo crucial que fueron sus descubrimientos previos sobre la planaridad del grupo péptido. (La figura 11 representa su intento de reconstruir el trozo de papel original de 1948). Sin la planaridad, el número de conformaciones posibles habría sido demasiado grande. Excitado, Pauling le pidió a su mujer que le trajese una regla de cálculo (aunque obsoleta desde hacía tiempo, era la herramienta de cálculo más habitual en aquella época), para poder calcular la distancia de repetición a lo largo del eje de la fibra. Descubrió que la estructura de la hélice alfa se repetía con 18 aminoácidos en cinco vueltas. Es decir, la hélice alfa tenía 3,6 aminoácidos por vuelta. Para su decepción, la distancia calculada entre vueltas era de 5,4 angstroms, no los 5,1 angstroms que sugerían los patrones de difracción de rayos X. La hélice gamma dejaba un hueco en su centro que era demasiado pequeño para estar ocupado por otras moléculas, así que Pauling centró su atención en la hélice alfa. Seguro como estaba de la corrección de su solución, Pauling intentó por todos los medios encontrar la manera de ajustar o bien la longitud de los enlaces o bien sus ángulos, para así reducir la distancia calculada de 5,4 a 5,1, pero no lo consiguió. Así pues, aunque estaba muy satisfecho con su hélice alfa, decidió no publicar el modelo hasta entender mejor la razón de la discrepancia en el espaciado.



Figura 12

Unas seis semanas más tarde, Pauling visitó el Laboratorio Cavendish de Cambridge, y lo que allí vio lo impresionó vivamente. «Tienen unas instalaciones cinco veces mejores¹⁸³ que las nuestras», le escribió a su ayudante en Caltech, «con capacidad para tomar casi 30 imágenes de rayos X al mismo tiempo». Preocupado por la posibilidad de que todavía hubiera algo equivocado en su modelo, y al mismo tiempo inquieto porque el grupo de Cavendish pudiera ganar la carrera y analizarlo antes que él, Pauling guardó silencio sobre la hélice alfa. Incluso durante una discusión con el famoso químico Max Perutz¹⁸⁴, en la que este le mostró entusiasmado sus últimos resultados sobre la estructura del cristal de la hemoglobina, Pauling decidió guardarse sus ideas.

El problema, sin embargo, lo tenía obsesionado. A su vuelta a Pasadena, Pauling enseguida le pidió a un profesor visitante de física, Herman Branson, que inspeccionara sus cálculos meticulosamente. A Pauling le interesaba

saber especialmente si Branson podría encontrar¹⁸⁵ la tercera estructura helicoidal que satisfaría las restricciones de unos enlaces planos en los péptidos y un máximo de enlaces de hidrógeno que confirieran estabilidad. Branson y uno de los ayudantes de investigación de Pauling, Sidney Weinbaum, repasaron con lupa los cálculos de Pauling durante más o menos un año y llegaron a la conclusión de que realmente solo había dos estructuras (la hélice alfa y la hélice gamma) que satisficieran todas las restricciones. Branson y Weinbaum también confirmaron que la hélice alfa, que era la más apretada de las dos hélices, estaba caracterizada por una distancia de 5,4 angstroms entre vueltas.

A Pauling se le presentaba ahora un dilema: ignorar la incongruencia con los datos de rayos X y publicar su modelo, o retrasar la publicación hasta que el misterio quedase resuelto. Un artículo enviado para su publicación en *Proceedings of the Royal Society of London* el 31 de marzo de 1950 le ayudó a decidirse.

Ojalá te hubiera enfurecido antes

El artículo, que llevaba el título «Configuraciones de las cadenas de polipéptidos de proteínas cristalinas¹⁸⁶», era la obra de un terceto ilustre: Lawrence Bragg, premio Nobel de Física de 1915, y dos biólogos moleculares que más tarde, en 1962, compartirían el premio Nobel de Medicina: John Kendrew y Max Perutz, todos ellos del Laboratorio Cavendish de Cambridge. Por aquel entonces, este famoso laboratorio era el centro puntero de la cristalografía de rayos X. Este método para analizar cristales era en buena medida la creación de Bragg; él y su padre, *sir* William Henry Bragg, habían resuelto conjuntamente las matemáticas que hay detrás de aquel fenómeno químico y habían desarrollado la técnica experimental.

La idea en la que se basa la cristalografía de rayos X¹⁸⁷ era la simplicidad hecha genio. Los físicos ya sabían desde principios de siglo XIX que si proyectaban luz visible sobre una rejilla finamente espaciada, la luz que la

atravesaba formaba un patrón de difracción de manchas claras y oscuras sobre una pantalla situada al otro lado. Las manchas claras marcaban los lugares donde las ondas de luz que atravesaban distintos huecos de la rejilla se combinaban aumentando su brillo, mientras que las manchas oscuras se producían allí donde las distintas ondas sufrían una interferencia destructiva (como cuando la cresta de una ola coincide con el valle de otra). Los físicos también sabían, sin embargo, que para que se formara ese patrón, los espacios entre los huecos tenían que ser del mismo orden que la longitud de onda de la luz (la distancia entre dos crestas sucesivas de la onda). Aunque era relativamente fácil fabricar rejillas lo bastante finas para la luz visible, era imposible producirlas para los rayos X, cuyas longitudes de onda son varios miles de veces menores que las de la parte visible del espectro. La primera persona que se dio cuenta de que los cristales periódicos naturales podían servir de rejilla en los experimentos de difracción de rayos X fue Max von Laue. Este físico alemán se percató de que en los cristales, las distancias entre átomos eran precisamente del orden de la supuesta longitud de onda de los rayos X. Siguiendo los pasos de Laue, Lawrence Bragg formuló la ley matemática que describe la difracción de rayos X en una estructura cristalina. Sorprendentemente, consiguió este importante resultado durante su primer año como investigador estudiante en Cambridge. El equipo formado por padre e hijo se dedicó entonces a construir el espectrómetro de rayos X que les permitió analizar la estructura de muchos cristales. Por cierto que Lawrence Bragg sigue siendo la persona más joven en recibir un premio Nobel. (¡Lo ganó con veinticinco años!).

Ante tan formidable legado, no es difícil imaginar que cuando Pauling vio el título del artículo de Bragg, Kendrew y Perutz, el corazón le dio un vuelco. Los dos primeros párrafos del artículo ciertamente daban la impresión de que tal vez el equipo de Bragg le había ganado por la mano: «Las proteínas están formadas por largas cadenas de residuos de aminoácidos [...] En este artículo se intenta adquirir tanta información como sea posible sobre la naturaleza de

la cadena a partir del estudio de rayos X de proteínas cristalinas, además de explorar los posibles tipos de cadena que sean coherentes con los datos disponibles¹⁸⁸». Pauling leyó con avidez las treinta y siete páginas y quedó aliviado al comprobar que los investigadores habían descrito unas veinte estructuras, pero la hélice alfa no era una de ellas. Además, concluían diciendo que ninguna de las estructuras examinadas constituía un modelo aceptable para la alfa queratina. Pauling no podía estar más de acuerdo con esta conclusión, sobre todo porque creía que el equipo de Bragg no había aplicado la restricción más importante a sus configuraciones y, en cambio, había impuesto una limitación que le parecía del todo innecesaria. De un lado, ninguno de los modelos de Bragg suponía la planaridad del grupo péptido, de cuya corrección Pauling estaba absolutamente convencido. De otro lado, el equipo de Cavendish parecía estar empeñado en la idea de que en cada vuelta de sus estructuras tenía que haber un *número entero* de aminoácidos. La hélice alfa de Pauling acabó con la tradición, con 3,6 aminoácidos por vuelta, y no veía nada malo en ello. A causa de su formación en cristalografía de rayos X, Bragg también observaba religiosamente la distancia aparente entre vueltas de 5,1 angstroms que sugerían los datos de Astbury. Perutz explicaría más tarde que para poner en situación a su equipo, Bragg había clavado¹⁸⁹ en el palo de una escoba unas tachuelas que representaban residuos de aminoácidos, disponiéndolas según una pauta helicoidal con una distancia axial entre vueltas sucesivas de 5,1 centímetros.

Pauling siempre había tenido una naturaleza muy competitiva. Aunque se había tranquilizado al ver que el equipo de Cambridge había pasado por alto varias cuestiones importantes, la publicación del artículo de Bragg lo puso en marcha por miedo a que se le adelantaran. En octubre de 1950 él y Corey enviaron una nota breve¹⁹⁰ en la que describían la hélice alfa y la hélice gamma para su publicación en el *Journal of the American Chemical Society*. Más o menos al mismo tiempo, otro grupo de investigación británico, esta

vez de Courtaulds Research Laboratories, obtuvo algunos resultados alentadores. Clement Bamford, Arthur Elliott y sus colaboradores habían logrado producir fibras sintéticas de polipéptidos. Para regocijo de Pauling, las fotografías de difracción de rayos X de aquellas fibras mostraban claramente que la distancia de repetición a lo largo del eje era de 5,4 angstroms, en coherencia con los hallazgos de Pauling, y no de 5,1 angstroms. Esto planteaba la posibilidad de que esta última característica de las fotografías de rayos X del pelo no fuese más que un artefacto producido por reflexiones superpuestas en lugar de una pista importante sobre su estructura. Cada vez más convencido de la verdad de su interpretación, Pauling envió un artículo firmado por él mismo, Corey y Branson que contenía una detallada explicación¹⁹¹ de las hélices alfa y gamma. Fue una feliz coincidencia que este importante artículo fuese enviado precisamente el día del cincuenta aniversario de Pauling, el 28 de febrero de 1951.

Por cierto que corre una interesante anécdota sobre el uso del término «hélice», que yo he oído explicar al químico Jack Dunitz, por aquel entonces un investigador posdoctoral que trabajaba con Pauling. Dunitz recordaba que en 1950 Pauling utilizaba siempre el término «espiral» para describir la estructura de la alfa queratina. Incluso en la comunicación breve de Pauling y Corey al *Journal of the American Chemical Society*, escribieron exclusivamente sobre espirales. Un día, me dijo Dunitz, le hizo observar a Pauling que, según creía, la palabra «espiral» se refería únicamente a la forma plana bidimensional, mientras que a la forma tridimensional había que llamarla «hélice¹⁹²». Pauling le respondió que una espiral podía ser igual de dos o de tres dimensiones, pero añadió que, bien pensado, la palabra «hélice» le gustaba más. Cuando Pauling, Corey y Branson enviaron su denso manuscrito, evitaron la palabra «espiral» en todo el artículo. Su título decía: «La estructura de las proteínas: Dos configuraciones helicoidales con enlaces de hidrógeno para la cadena de polipéptido». Pauling se sentía entonces tan seguro de su modelo que siguieron su artículo sobre la hélice

alfa con un aluvión de artículos sobre el plegamiento de las cadenas de polipéptidos.

Aquella primavera, en Inglaterra, Max Perutz fue a la biblioteca un sábado por la mañana y allí, en el último número de *Proceedings of the National Academy of Sciences*, encontró la serie de artículos de Pauling. Unos treinta y seis años más tarde describiría lo que había sentido aquella mañana (con un lenguaje un tanto técnico, aunque las emociones son claras y transparentes):

El artículo de Pauling y Corey me dejó atónito. A diferencia de las hélices de Kendrew y las mías, sus hélices estaban libres de tensiones; todos los grupos amida eran planares y todos los grupos carboxilo formaban un enlace de hidrógeno perfecto con un grupo amino cuatro residuos más adelante en la cadena. La estructura parecía ser absolutamente correcta. ¿Cómo se me podía haber escapado? ¿Por qué no había mantenido planos los grupos amida? ¿Por qué había aceptado ciegamente los 5,1 angstroms de repetición de Astbury? Por otro lado, ¿cómo podía ser correcta la hélice de Pauling y Corey, por hermosa que fuera, si tenía la repetición equivocada? Mi mente estaba perpleja. Volví a casa en bicicleta para el almuerzo, y comí inconsciente del parloteo de mis hijos, sin responder siquiera a las preguntas de mi esposa, que quería saber qué me pasaba¹⁹³.

Tras pensar un poco más en el modelo de Pauling, Perutz comprendió que la hélice alfa se parecía a una escalera de caracol en la que los residuos de aminoácidos (marcados con una «R» en la figura 12) formaban los peldaños. La altura de cada peldaño era de unos 1,5 angstroms. La teoría de Bragg de la difracción de rayos X predecía, por consiguiente, la existencia de unas señales de reflexión de rayos X que nunca se habían observado, separadas por 1,5 angstroms, debidas a planos perpendiculares al eje de la fibra. Ninguno de los modelos del grupo de Bragg habría producido esa marca, mientras que sería una señal inequívoca de la hélice alfa de Pauling.

Justo cuando estaba a punto de llegar a la conclusión de que la falta de esos reflejos en los datos de Astbury bastaba para refutar el modelo de Pauling, Perutz recordó que la particular disposición del experimento de Astbury, con las fibras orientadas de manera que sus ejes largos fuesen perpendiculares al haz de rayos X, no habría permitido detectar la señal de 1,5 angstroms. Los cálculos predecían que las condiciones óptimas para observar la reflexión habrían requerido que las fibras se inclinasen formando un ángulo de unos 31 grados.

Perutz se sintió ineludiblemente empujado a realizar la prueba definitiva de inmediato. Pedaleó de vuelta al laboratorio, cogió un pelo de caballo que guardaba en un cajón, lo insertó en el aparato con el ángulo que, según sus cálculos, era el mejor para detectar la reflexión, puso la emulsión a su alrededor (a diferencia de la cámara de placa plana de Astbury, demasiado estrecha y que, por tanto, podía haber perdido reflexiones de gran ángulo), y disparó el haz de rayos X. Las pocas horas que transcurrieron antes de que pudiera revelar la película fueron de auténtica angustia, pero al fin Perutz obtuvo la respuesta. ¡La fuerte reflexión que predecía la hélice alfa con un espacio de 1,5 angstroms destacaba sin dejar ninguna duda!

Perutz le enseñó a Bragg la radiografía a primera hora de la mañana del lunes. Bragg le preguntó qué le había dado tan de repente la idea para realizar la prueba definitiva. Perutz le contestó que estaba enfurecido consigo mismo por no haber pensado en la hélice alfa. Bragg le replicó con lo que se ha convertido en una frase inmortal: «¡Ojalá te hubiera enfurecido antes!».

La marca de la vida

No todo lo que escribió Pauling en aquella famosa serie de artículos de 1951 era correcto. Un examen minucioso de su obra completa de aquel año revela varias flaquezas. En particular, la hélice gamma acabó por abandonarse. Sin embargo, estas pequeñas carencias no desmerecen en nada el logro pionero de Pauling: la hélice alfa y su destacado papel en la estructura de las

proteínas. Las contribuciones de Pauling a nuestro conocimiento de la naturaleza de la vida fueron considerables. Fue uno de los primeros científicos¹⁹⁴ en comprender que, a pesar de su inherente complejidad, la biología es, en su núcleo, ciencia molecular ampliada con la teoría de la evolución. Ya en 1948 había escrito, con clarividencia: «Para entender todos estos grandes fenómenos biológicos necesitamos entender los átomos y las moléculas que estos forman por medio de enlaces, y no debemos conformarnos con comprender las moléculas simples [...] Debemos entender también la estructura de las moléculas gigantes de los organismos vivos¹⁹⁵».

La influencia de Pauling sobre la teoría general y la metodología de la biología molecular fue igual de impresionante. Para empezar, en su libro pionero de 1939, *The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals: An Introduction to Modern Structural Chemistry* («La naturaleza del enlace químico y la estructura de moléculas y cristales: Una introducción a la química estructural moderna»), resaltó proféticamente la importancia del enlace de hidrógeno para las biomoléculas: «Creo que a medida que los métodos de la química estructural se vayan aplicando a los problemas de la fisiología, se verá que la importancia del enlace de hidrógeno para la fisiología es mayor que la de cualquier otra característica estructural¹⁹⁶». Y así es: la estructura de muchas moléculas orgánicas, desde las proteínas a los ácidos nucleicos, confirma plenamente esta predicción.

En segundo lugar, Pauling fue uno de los pioneros de la construcción de modelos, que convirtió en un arte de la predicción basado en reglas estrictas de la química estructural. Incluso los modelos tridimensionales de colores¹⁹⁷ desarrollados en Caltech se convirtieron en objetos codiciados de la investigación macromolecular. Estos modelos, producidos para otros laboratorios por el taller de Caltech, alcanzaron en 1956 un valor de 1220 dólares para un conjunto que contenía unos seiscientos modelos de átomos.

La práctica de Pauling de utilizar los patrones de difracción de rayos X no como punto de partida sino como árbitro final entre varias conjeturas

complejas pero bien fundamentadas también resultó ser una técnica muy eficaz: Watson y Crick estaban a punto de aplicar el mismo enfoque para descubrir la estructura del ADN.

Hay otra observación destacable de Pauling sobre la genética que hizo en 1948 durante una conferencia, aunque al parecer ni siquiera él llegó a comprender en su momento todas sus implicaciones. En la primera parte de aquella conferencia, Pauling recordaba a su público:

El monje gregoriano Mendel observó que en las plantas de guisantes la herencia de los caracteres, como el hecho de que sean altas o enanas, o el carácter de tener flores púrpuras o blancas, se podía entender con relación a unidades de herencia que se transmitían de los progenitores a sus descendientes. Thomas Hunt Morgan y sus colaboradores reconocieron esas unidades en los genes que se disponen linealmente en los cromosomas¹⁹⁸.

Más tarde, hacia el final de su conferencia, añadía el siguiente comentario:

El mecanismo detallado por medio del cual un gen o una molécula de virus produce réplicas de sí mismo no se conoce todavía. En general, el uso de un gen o un virus como plantilla llevaría a la formación de una molécula con una estructura no idéntica, sino complementaria. Puede ocurrir, por supuesto, que una molécula sea a un tiempo idéntica y complementaria de la plantilla sobre la que se ha modelado. Sin embargo, este caso me parece demasiado improbable para tener una validez general, si no es de la siguiente manera. *Si la estructura que hace de plantilla (el gen o la molécula de virus) consiste en, pongamos por caso, dos partes, de modo que una es complementaria de la otra, cada una de estas partes podría servir de molde para la producción de una réplica de la otra parte, y, por consiguiente, el complejo formado por dos partes complementarias puede servir de molde para la producción de duplicados de sí mismo* [la cursiva es mía]¹⁹⁹.

Como veremos enseguida, si Pauling se hubiera acordado de su propia declaración cuatro años más tarde, cuando intentaba determinar la estructura del ADN, tal vez no hubiera cometido un terrible error.

Pauling no comenzó a dirigir su atención al ADN hasta el verano de 1951. Hasta principios de la década de 1950, la mayoría de los estudiosos de la vida suscribían el paradigma de las proteínas, según el cual eran estas moléculas, no los ácidos nucleicos, las que constituían el fundamento de la vida y desempeñaban un papel crucial en la reproducción, el desarrollo y la regulación. Las raíces de este paradigma se remontan al biólogo Thomas H. Huxley (el «bulldog de Darwin»), que creía que el protoplasma (la parte viva de la célula) era la fuente de todos los atributos de la vida. Las proteínas, que están hechas de aminoácidos unidos en una larga cadena, constituían una fracción elevada de todas las células vivas, mientras que los ácidos nucleicos, como su nombre indica, se encontraron inicialmente solo en el núcleo de las células.

Los primeros trabajos sobre la estructura y constitución de los ácidos nucleicos, debidos al bioquímico Phoebus Levene, no ayudaron a despertar el interés por estas moléculas. Más bien consiguieron todo lo contrario. Levene consiguió distinguir²⁰⁰ entre el ácido desoxirribonucleico (ADN) y el ácido ribonucleico (ARN), y descubrió algunas de sus propiedades. Pero sus resultados generaron la impresión de que se trataba de unas sustancias bastante simples y aburridas, inadecuadas para las complejas tareas del gobierno del crecimiento y la replicación. En palabras del citólogo Edmund Beecher Wilson (en 1925): «Los ácidos nucleicos del núcleo son, por lo general, notablemente uniformes [...] En este sentido contrastan considerablemente con las proteínas, las cuales, ya sean simples o compuestas, parecen exhibir una variedad inagotable²⁰¹». Esta impresión persistió a lo largo de la década de 1940. Para entonces, se sabía que el ADN estaba compuesto por cadenas no ramificadas de unas unidades llamadas *nucleótidos*. Los propios nucleótidos parecían ser también bastante sencillos, formados como estaban por tres subunidades: un grupo *fosfato* (un átomo de fósforo enlazado a cuatro átomos de oxígeno), un *azúcar* de cinco carbonos, y una *base nitrogenada* que podía ser de cuatro tipos. Las cuatro

bases eran: *citocina* y *timina*, que tenían un solo anillo; y *adenina* y *guanina*, con un anillo doble. (Véase la figura 13). Lo que todavía no se sabía, ni siquiera en 1951, era su verdadera estructura: cómo se conectaban exactamente las subunidades para formar los nucleótidos, y la naturaleza de los enlaces entre los propios nucleótidos. Sin embargo, aunque todo esto pudiera parecer bastante interesante desde el punto de vista de la química, a finales de 1951 la mayoría de los genetistas todavía creían que el único papel que desempeñaba el ADN era estructural, actuando tal vez como un andamiaje al servicio de las más sofisticadas proteínas, sin estar directamente implicado en la herencia²⁰².

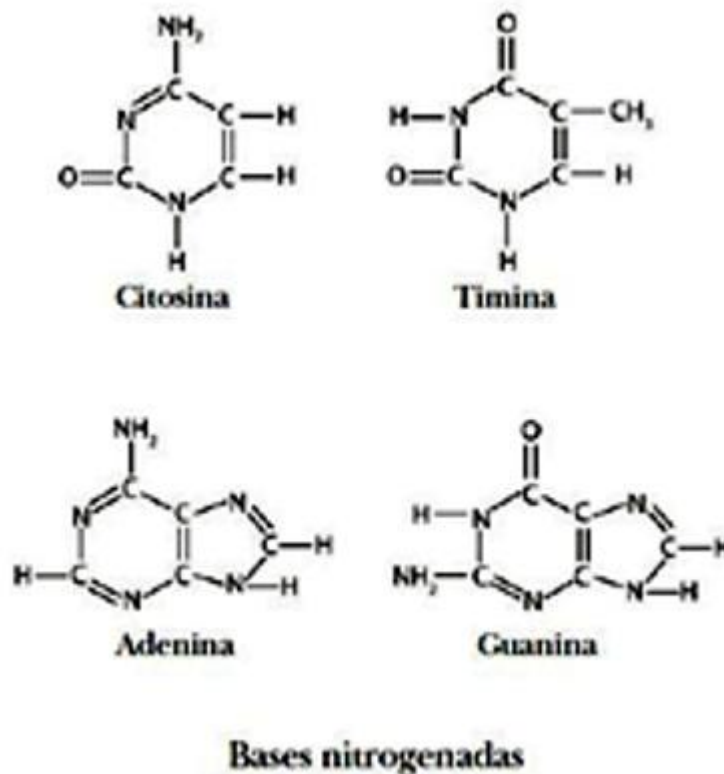


Figura 13

Este hecho era en sí mismo bastante sorprendente, dado que en un artículo publicado en 1944, los biólogos Oswald Avery, Colin MacLeod y Maclyn McCarty proporcionaron sólidas pruebas experimentales de que el material

genético de las células vivas estaba compuesto de ADN. Avery y sus colaboradores²⁰³ cultivaron grandes cantidades de una bacteria virulenta, y tras conseguir separarlas en sus constituyentes bioquímicos, llegaron a la conclusión de que los componentes responsables de convertir las bacterias no virulentas en bacterias virulentas eran las moléculas de ADN, no las proteínas o los ácidos grasos. En una carta de mayo de 1943 en la que describe estos resultados a su hermano bacteriólogo, Roy, Avery concluye diciendo: «Pues esa es la historia²⁰⁴, Roy; correcta o incorrecta, ha sido divertido y nos ha llevado un montón de trabajo». La razón de que los hallazgos de Avery no recibieran la atención que merecían²⁰⁵ podría tener algo que ver con el hecho de que, como ninguno de los tres científicos era genetista, formularon sus conclusiones con tanta cautela que muchos científicos no llegaron a comprender su verdadera importancia. Así lo enunciaban en el artículo: «Si llega a demostrarse más allá de cualquier duda razonable que la actividad transformativa del material descrito es realmente una propiedad inherente del ácido nucleico, todavía habría que explicar en términos químicos la especificidad biológica de su acción». Con todo, los buenos lectores deberían haber notado lo que decía el resumen del artículo: «Los datos obtenidos [...] indican que, dentro de los límites de los métodos, la fracción activa no contiene ninguna proteína demostrable [...] y consiste principalmente, si no enteramente, en una forma viscosa y altamente polimerizada del ácido desoxirribonucleico [ADN]».

Pauling conocía el trabajo de Avery, pero incluso él admitió más tarde, en una entrevista, que en aquella época no creía que el ADN tuviera demasiado que ver con la herencia: «Conocía la proposición de que el ADN era el material genético. Pero no la aceptaba; veré, estaba tan encantado con las proteínas que creía que estas eran probablemente el material hereditario, no el ácido nucleico». El químico Peter Pauling, hijo de Linus, también confirmó que esta había sido la actitud de su padre. En un breve artículo escrito en 1973, escribió: «Para mi padre, los ácidos nucleicos eran unas sustancias

químicas interesantes, igual que el cloruro de sodio [la sal de mesa] es una sustancia química interesante, y ambas presentan problemas estructurales interesantes²⁰⁶».

No obstante, hacia finales de 1951, un inusual artículo²⁰⁷ del bioquímico Edward Ronwin, entonces en la Universidad de California en Berkeley, intrigó a Pauling lo bastante como para empujarlo a hacer algo. El artículo, titulado «Una fórmula fosfo-tri-anhídrida para los ácidos nucleicos», apareció en noviembre de 1951. En él, Ronwin proponía un nuevo «diseño» para el ADN, en el que cada átomo de fósforo iba ligado a cinco átomos de oxígeno, mientras que Pauling, el consumado químico estructural, estaba absolutamente convencido de que tenía que estar enlazado solamente con cuatro. Molesto, Pauling se apresuró a enviar una comunicación breve al editor del *Journal of the American Chemical Society* (junto al químico Verner Schomaker) en la que comenzaba por observar que «al formular una estructura hipotética para una sustancia, hay que tener cuidado para elegir elementos estructurales que sean razonables²⁰⁸». Su conclusión era aún más desdeñosa: «La ligadura de cinco átomos de oxígeno alrededor de cada átomo de fósforo es una característica estructural tan improbable», decían, que la fórmula propuesta para el ADN «no merece ninguna consideración seria». Ronwin replicó señalando²⁰⁹ que existían otras sustancias en las que el fósforo estaba enlazado con cinco átomos de oxígeno. Pauling y Schomaker tuvieron que retirar²¹⁰ su comentario despreciativo, pero siguieron insistiendo en que las estructuras de este tipo eran extremadamente sensibles a la humedad, lo que las convertía en candidatos muy improbables para el ADN. Este intercambio de opiniones no habría tenido mayores consecuencias de no haber sido porque hizo que Pauling comenzase a pensar en cómo podría estar construido el ADN. Para avanzar, sin embargo, necesitaba fotografías de alta calidad de difracción de rayos X del ADN, pues las que estaban disponibles en publicaciones eran fotos antiguas tomadas por William Astbury y Florence Bell en 1938 y 1939. Por

desgracia, no era fácil conseguir buenas fotos de rayos X. Caltech había producido algunas imágenes nuevas a principios de la década de 1950, pero, sorprendentemente, resultaron ser de calidad inferior a las de Astbury y Bell. Mientras ponderaba sus opciones, Pauling se enteró de que Maurice Wilkins²¹¹, de King's College (Londres), había generado lo que se describía como «buenas imágenes de la fibra de ácidos nucleicos». Pauling decidió que no tenía nada que perder y escribió a Wilkins para preguntarle si estaba preparado para compartir sus imágenes. Lo que Pauling no sabía es que en Inglaterra la actividad alrededor del ADN se estaba tornando frenética.

Mientras tanto, en Inglaterra

Tres acontecimientos distintos, todos ellos en 1951²¹², fueron determinantes para la «carrera» por descubrir la estructura del ADN. Aquel año, a la edad de treinta y cinco, Francis Crick estaba trabajando en Cambridge para obtener un doctorado en biología después de aburrir la física. (Más tarde describiría su trabajo sobre la viscosidad del agua como «el problema más tedioso que uno pueda imaginar»). Su formación matemática sería crucial para los descubrimientos que realizaría. Aquel mismo año, James Watson, entonces con veintitrés años, llegó a Cambridge para aprender sobre la difracción de rayos X de la mano de Max Perutz. Watson había acabado su doctorado en la Universidad de Indiana sobre los efectos de los rayos X sobre los virus y más tarde había recibido formación sobre la química de los ácidos nucleicos en la Universidad de Copenhague. También en 1951 Rosalind Franklin, que entonces contaba treinta y un años, llegó a King's College tras finalizar tres años de investigación en París, donde se hizo competente en técnicas de difracción de rayos X.

Franklin, que provenía de una erudita familia de banqueros, había completado su doctorado en Cambridge en 1945. Cuando llegó a King's College, el físico Maurice Wilkins tenía la esperanza de que, gracias a que era una experta cristalógrafa, lo ayudaría en sus estudios sobre la estructura

molecular. Que Wilkins esperara eso de Franklin no era en absoluto sorprendente, pues por aquel entonces, según explica el propio Watson, «la investigación molecular sobre el ADN en Inglaterra era, a efectos prácticos, propiedad personal de Maurice Wilkins²¹³». Pero no era eso lo que Franklin pretendía cuando firmó para ir a King's, y tenía buenas razones para pensar como pensaba. Sir John Randall, director de la Unidad de Investigaciones Biofísicas de King's College, le había escrito una carta en la que le describía del siguiente modo el trabajo que le aguardaba: «Esto significa que, por lo que respecta a los trabajos experimentales con rayos X, por el momento solo estarán usted y Gosling [Raymond Gosling, que entonces era estudiante universitario], con la ayuda ocasional de una graduada de Syracuse, Mrs. Heller²¹⁴». Por tanto, Franklin tenía lógicamente la impresión de que sería su propia jefa por lo que respectaba a las investigaciones sobre el ADN, una actitud que claramente se daba de bruces con las expectativas de Wilkins. Franklin y Wilkins estaban destinados a chocar, y así ocurrió. Acabaron trabajando por separado aunque compartieran los mismos laboratorios.

En cambio, Watson y Crick, que compartían despacho en Cambridge, se entendieron enseguida. Watson describió a Crick como «sin duda la persona más brillante con la que he trabajado y lo más cercano a Pauling que he visto²¹⁵». Los dos hombres traían un bagaje muy distinto pero complementario, igual que sus rasgos de carácter y temperamento. Como Crick observó en una entrevista: «El interés radicaba en que su bagaje [de Watson] era en investigaciones sobre fagos, sobre las que yo solo había leído y no conocía de primera mano, mientras que yo aportaba conocimiento sobre cristalografía, que él solo conocía por lecturas y no de primera mano²¹⁶». Es entretenido leer cómo describía cada uno la personalidad del otro. Refiriéndose a la seguridad, la agudeza traviesa y el hábito de decir lo que pensaba propios de Crick, Watson escribió: «Nunca he visto a Francis Crick con ánimo humilde²¹⁷». Y añadía que Crick «hablaba más alto y rápido que nadie». Por otro lado, Crick escribió sobre Watson: «Jim era bastante más

franco que yo²¹⁸». Pese a sus distintos bagajes, algo en ellos encajó de inmediato. Crick sospechaba que se debía a que ambos tenían por naturaleza «cierta arrogancia de juventud, rudeza e impaciencia con las argumentaciones descuidadas». Su manera de pensar también se parecía bastante. En palabras de Crick: «Era la primera persona que conocía que pensaba lo mismo que yo de la biología [...] Yo había decidido que lo realmente esencial era la genética, lo que eran y hacían los genes».

Había algo más que hacía que la colaboración entre Watson y Crick fuese tan potente. Como ninguno de los dos era profesionalmente el superior del otro, se podían permitir el lujo de ser brutalmente francos al criticar las ideas del otro. Este tipo de honestidad intelectual falta a veces en las relaciones entorpecidas por la cortesía formal, por doblegarse ante un superior o por abuso de autoridad. Así es como el propio Crick describía su relación con Watson: «Si uno de nosotros sugería una nueva idea, el otro, aunque tomándolo en serio, intentaba demolerlo de una manera franca pero no hostil²¹⁹». Para Crick, «Watson estaba decidido a descubrir qué eran los genes y esperaba que resolver la estructura del ADN le ayudase a hacerlo²²⁰». Eso resultó ser absolutamente cierto.

Todavía cabe preguntarse por qué Watson y Crick estaban convencidos de que la estructura del ADN era resoluble, y no irregular y confusa. Es posible que la razón fuera una conferencia de Maurice Wilkins en un congreso de Nápoles, en la primavera de 1951, un congreso al que asistió Watson. Wilkins había conseguido extraer unas finas fibras de la sal sódica del ADN y producir con ellas unas fotografías de rayos X que eran notablemente mejores que las de Astbury y Bell. Las imágenes mostraban una forma cristalina del ADN, lo que para Watson significaba que la estructura era regular. Estas eran las mismas imágenes que Pauling le había pedido a Wilkins.

Al recibir la carta de Pauling, Wilkins, que era plenamente consciente de la capacidad de Pauling para descifrar estructuras moleculares, no sabía muy

bien qué hacer con la solicitud. Por fin le respondió cortésmente que no podía compartir sus imágenes hasta que él mismo tuviera la oportunidad de realizar algunas investigaciones adicionales. Pauling no se rindió, y decidió probar suerte con Randall, que lo rechazó con la excusa de que «no sería justo para ellos [Wilkins y sus colaboradores], ni para los esfuerzos que estaba llevando a cabo el conjunto de nuestro laboratorio, enviárselas a usted²²¹». Así que a finales de 1951, Pauling todavía no había logrado ver ninguna imagen de difracción de rayos X de una calidad razonable.

Entretanto, Watson y Crick estaban cada vez más obsesionados con el deseo de ganar a Pauling en la carrera por descifrar la estructura del ADN. El bioquímico austroamericano Erwin Chargaff, que conoció a Watson y Crick en mayo de 1952, nos ofrece una descripción del dúo cargada de humor: «Uno, de treinta y cinco años, con el aspecto de un vendedor de apuestas venido a menos, como salido de un cuadro de Hogarth [...] El otro, bastante magro para sus veintitrés años, con una sonrisa más taimada que bobalicona, decía poco, y nada importante²²²». Aún más divertida es la descripción que da Chargaff de la desmesurada ambición de los dos científicos: «Por lo que pude entender, querían, sin las trabas del menor conocimiento de la química implicada, encajar el ADN en una hélice. La principal razón parecía ser el modelo de Pauling de la hélice alfa para una proteína²²³». Efectivamente, aunque Pauling no fuera consciente de ello, Watson (en particular) y Crick (hasta cierto punto) se veían participando en una carrera con él.

No quisiera que nadie se llevase la impresión de que Pauling fue el primero en introducir modelos helicoidales, pero sin duda contribuyó mucho a que acabasen convirtiéndose en los modelos preferidos para las moléculas de importancia para la biología. Al introducir un número no entero de aminoácidos en cada vuelta de su modelo de hélice alfa, Pauling había expandido aún más los horizontes de los cristalógrafos estructurales tradicionales. En consecuencia, las investigaciones sobre la interpretación de los patrones de difracción de rayos X a partir de estructuras helicoidales

recibieron un enorme empuje, estableciendo las herramientas que finalmente permitirían descifrar el ADN. Así describía Crick la forma de pensar habitual en aquellos tiempos: «Tal como lo veo ahora, eras un excéntrico si no pensabas que el ADN era helicoidal²²⁴».

Hacia el fin de 1951, los acontecimientos comenzaron a sucederse con rapidez. El 21 de noviembre de 1951 Watson hizo un viaje a Londres para escuchar un coloquio de Rosalind Franklin. Aunque no aprendió mucho con la charla, apenas pasó una semana antes de que él y Crick produjesen su primer modelo²²⁵ de la estructura del ADN. El modelo consistía en tres hebras helicoidales sostenidas por una espina de azúcar-fosfato en su interior, mientras que las bases apuntaban hacia afuera. La principal motivación para este diseño en particular era bastante simple: como las bases eran de formas y tamaños distintos (dos tenían un solo anillo y las otras dos tenían dos anillos; véase la figura 13), Watson y Crick no veían la manera de que el ADN cristalino pudiera producir un patrón altamente regular si no era manteniendo las bases poco implicadas en la arquitectura central.

Por consejo de Kendrew, el enérgico par invitó al equipo de King's College a ver su modelo, aunque Crick más tarde admitiría que no se había sentido del todo cómodo enviando tan pronto una invitación. La respuesta fue inmediata: al día siguiente apareció en Cambridge el grupo formado por Maurice Wilkins, Rosalind Franklin, Raymond Gosling y William Seeds (otro miembro de la Unidad de Investigaciones Biofísicas).

La presentación del primer modelo de Watson y Crick resultó ser un completo desastre. Franklin no solo cuestionó todas las presuposiciones básicas, desde la estructura helicoidal a las fuerzas que supuestamente sostenían la estructura central, sino que señaló que el contenido de agua que referían²²⁶ era completamente erróneo; el ADN es una molécula bastante «sedienta», lo que invalidaba todos los cálculos de densidad de Watson. Al parecer, parte del error se debía a que Watson no entendía bien un término

cristalográfico que Franklin había usado en su conferencia de la semana anterior. Esta desafortunada confusión llevó a Crick a creer que el número de configuraciones posibles era bastante limitado.

El fiasco tuvo consecuencias importantes: a Watson y Crick prácticamente les prohibieron que continuasen sus investigaciones sobre el ADN, que supuestamente quedarían confinadas exclusivamente al King's College de Londres. Ha sido habitual suponer que los directores de los dos laboratorios, Randall y Bragg, acordaron una moratoria respecto a nuevas investigaciones sobre el ADN por parte de Watson y Crick. Sin embargo, en 2010 Alexander Gann y Jan Witkowski, del Laboratorio Cold Spring Harbor de Nueva York, descubrieron correspondencia de Francis Crick²²⁷ que desde hacía mucho tiempo estaba en paradero desconocido. Al parecer las cartas perdidas se habían mezclado con los papeles del biólogo Sydney Brenner, con quien Crick había compartido despacho entre 1956 y 1977. La correspondencia recuperada proporciona una nueva perspectiva sobre las circunstancias de la suspensión de la investigación sobre el ADN. En una carta formal fechada el 11 de diciembre de 1951, Maurice Wilkins le escribe a Crick:

Mucho me temo que la opinión general aquí [en King's College], a regañadientes y muy a nuestro pesar, es en contra de su proposición de seguir trabajando sobre a. n. [ácidos nucleicos] en Cambridge. Uno de los argumentos que se aducen es que sus ideas se derivan directamente de afirmaciones realizadas durante un coloquio y eso me parece tan convincente como su propio argumento de que su enfoque viene bastante de la nada²²⁸.

Siguiendo con su papel de mediador entre King's College y Cavendish, Wilkins añade entonces: «Creo que lo más importante es que se alcance un acuerdo de manera que en el futuro, como en el pasado, todos los miembros de nuestro laboratorio se sientan libres para discutir su trabajo e intercambiar ideas con usted y con su laboratorio. Somos dos Unidades del M. R. C. [Consejo de Investigación Médica] y dos Departamentos de Física con muchas conexiones». Wilkins sugería además que Crick le mostrase la

carta a Max Perutz, e informaba a Crick de que le enviaba copia a Randall. Aquel mismo día Wilkins le envió a Crick también una carta más personal, escrita a mano, en la que le confesaba que «tuve que disuadir a Randall de que no le escribiera a Bragg quejándose de vuestra conducta». Un borrador de respuesta escrito por Watson y Crick dos días más tarde indica que «todos estamos de acuerdo en que debemos llegar a un arreglo amistoso²²⁹». A Watson, sin embargo, una decisión administrativa no le iba a impedir al menos pensar sobre el ADN.

Entretanto, Franklin estaba haciendo progresos importantes. Primero descubrió que el ADN²³⁰ se presentaba en dos configuraciones algo distintas. Una de las formas, que denominó «A», era cristalina. La otra, la forma «B», era más extensa y contenía más agua. Una de las consecuencias de la existencia de estas dos conformaciones era que las fotos de difracción de rayos X de muestras de ADN resultaban confusas si no se producían a partir de una forma pura. Franklin dedicó los cinco primeros meses de 1952 a generar muestras puras tanto de la forma A como de la forma B, logró extraer fibras individuales de cada una de las formas, y diseñó y reconfiguró su cámara de rayos X para tomar imágenes de alta resolución. Como veremos enseguida, una de las fotografías que produjo de la forma «B», la más «húmeda», etiquetada como placa 51 (véase la figura 14), estaba a punto de convertirse en la clave para entender la estructura del ADN. Por desgracia, como Franklin decidió usar un método particular de análisis, ella y Gosling centraron sus esfuerzos primero en las imágenes de rayos X más detalladas, que correspondían a la forma A, y la pauta de rayos X más simple pero verdaderamente reveladora de la placa 51 la dejaron a un lado ¡durante casi nueve meses!

En todos sus trabajos de investigación, Franklin demostró que su forma de pensar era claramente distinta de la de Pauling. Franklin aborrecía las «conjeturas fundamentadas» y los métodos heurísticos, e insistía en basarse en los datos de rayos X para que estos la llevaran hasta la respuesta

correcta. Por ejemplo, aunque en principio no tenía nada en contra de las estructuras helicoidales, se negaba rotundamente a *suponer* su existencia como hipótesis de trabajo²³¹.

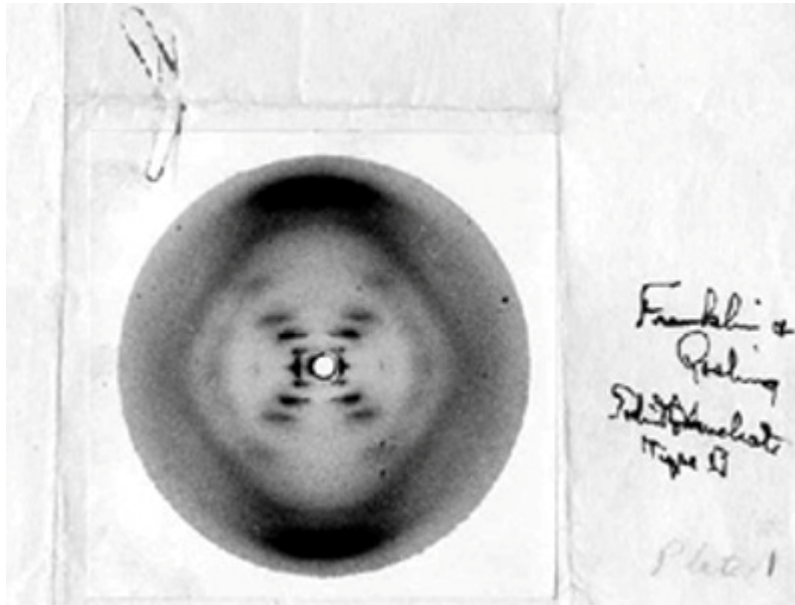


Figura 14

En cambio, Watson y Crick emularon punto por punto el enfoque y los métodos de Pauling, decididos a que una metodología formal no les frenara. En palabras de Crick: «Él [Watson] solo quería una respuesta, y no le importaba nada si la conseguía con métodos sólidos o llamativos. Lo único que le importaba era llegar lo antes posible²³²».

Sorprendentemente, ni Watson ni Crick ni Pauling sabían entonces que ya en 1951, Elwyn Beighton, del laboratorio de Astbury²³³ en la Universidad de Leeds, había producido excelentes placas de rayos X de la forma B estirando las fibras de ADN y humedeciéndolas. Sin embargo, como Astbury y Beighton al parecer pensaron que se trataba de una mezcla y no de una configuración pura (porque el patrón de rayos X era más simple que en las imágenes de Astbury-Bell), no hicieron pública la existencia de aquellas placas. Por desgracia para Astbury y Beighton, ninguno de los dos sabía el aspecto que

adquiría una hélice en una fotografía de rayos X. Fue así como el laboratorio de Leeds perdió la oportunidad de desempeñar un papel importante en la historia del ADN.

Mientras tanto, en Estados Unidos, Pauling intentaba hacer su magia de nuevo con el ADN, en un intento por replicar su hazaña con las proteínas. Las fotos de rayos X de que disponía mostraban una fuerte reflexión aproximadamente a 3,4 angstroms, pero no mucho más. Como punto de partida, Pauling volvió a examinar el artículo de Ronwin. Aunque estaba convencido de que la estructura del ADN que proponía Ronwin, con el átomo de fósforo unido a cinco átomos de oxígeno, era completamente errónea, había algo en la sugerencia de Ronwin que le llamaba la atención. Ronwin había puesto las cuatro bases en el exterior de la estructura y los fosfatos en el centro. Esto a Pauling le parecía que tenía sentido precisamente por la misma razón por la que Watson y Crick habían colocado las bases en el exterior en su primer intento. (Pauling no sabía nada de aquel modelo que tan lejos había caído de la diana). Siguiendo su línea de argumentación, Pauling se embarcó de nuevo en lo que ha dado en conocerse como su «método estocástico». La idea era utilizar principios químicos para reducir al mínimo la lista de estructuras posibles hasta quedarse solo con las más plausibles y luego construir con estas modelos tridimensionales para eliminar las configuraciones que estuviesen demasiado empaquetadas o demasiado poco. Entonces podría contrastar la mejor disposición resultante, su «mejor apuesta», con los patrones experimentales de difracción de rayos X.

Después del gran éxito que había tenido con su método en ocasiones anteriores, Pauling creyó saber exactamente qué pasos seguir. En primer lugar, tenía pocas dudas de que la molécula era helicoidal, y las fotografías de Astbury-Bell parecían ser, por lo general, congruentes con esta suposición. En segundo lugar, dos de las bases tenían dos anillos y dos tenían solo un anillo. Las diferentes construcciones y dimensiones hacían que, al menos a primera vista, resultase difícil imaginar el centro de la

hélice, que parecía ser regular, compuesto por las bases. El siguiente paso fue averiguar cuántas hebras más necesitaba la hélice. Pauling decidió abordar este problema calculando la densidad de la estructura. Sin embargo, antes de que fuese siquiera capaz de comenzar, una distracción inesperada lo frenó en seco.

La vida bajo el macarthismo

En la atmósfera de la guerra fría que siguió a la segunda guerra mundial, y en particular tras la aprobación de la Ley de Seguridad Interna de 1950, la División de Pasaportes del Departamento de Estado de Estados Unidos recibió una autoridad casi ilimitada para denegar pasaporte a cualquier persona que fuera considerada «izquierdosa». Pauling solicitó la renovación de su pasaporte en enero de 1952, pues planeaba asistir al congreso de la Real Sociedad de Londres, que se celebraba el mayo siguiente. Pauling y Corey habían sido invitados para que presentasen en aquel congreso sus trabajos sobre proteínas y la hélice alfa, y Pauling también planeaba aprovechar el viaje a Europa para visitar unas cuantas universidades en España y Francia. Pero el 14 de febrero de 1952, Ruth B. Shipley, directora²³⁴ de la División de Pasaportes, le envió a Pauling una carta que en nada se parecía a una tarjeta de San Valentín. En ella le informaba de que su pasaporte no se podía expedir porque, en opinión del departamento, su viaje «no sería en interés de Estados Unidos».

Dentro del ánimo que prevalecía entonces, y dados los muchos discursos pacifistas de Pauling, su activismo contra la guerra nuclear y su declaración de que «el mundo se encuentra hoy en una encrucijada que le lleva, o bien a un futuro glorioso para toda la humanidad, o bien a la destrucción total de la civilización», tal vez no sea del todo sorprendente que Shipley llegara a suponer que «hay buenas razones para creer que el doctor Pauling es un comunista».

Al principio, Pauling no vio en el rechazo más que una pequeña inconveniencia, y estaba convencido de que el problema se resolvería fácilmente. Para acelerar las cosas, envió de inmediato una carta al presidente Harry Truman²³⁵, adjuntando una copia de su Medalla Presidencial del Mérito de 1948, firmada por el propio Truman. Pauling escribió, frustrado: «Estoy convencido de que no se derivará ningún daño para la nación del viaje que propongo». La secretaria del presidente le respondió cortésmente que se había pedido a la División de Pasaportes que volviera a evaluar su decisión. Sin embargo, la decisión no fue revocada. En abril, ya con más urgencia, Pauling realizó una serie de acciones. En primer lugar, buscó el consejo de un abogado. En segundo lugar, envió a la Oficina de Pasaportes declaraciones juradas de lealtad y *affidávit* conforme no era comunista. Por último, consiguió reunirse en persona con Ruth Shipley. De nada sirvió. La denegación irrevocable de la solicitud fue anunciada el 28 de abril, y al día siguiente Pauling notificó a los organizadores del congreso de la Real Sociedad que no podría asistir.

Como era de esperar, las penas y tribulaciones de Pauling con el pasaporte²³⁶ escandalizaron a científicos de todo el mundo. *Sir* Robert Robinson, el premio Nobel de Química de Inglaterra, escribió una carta al *Times* de Londres expresando su «consternación». Destacados científicos norteamericanos y británicos, entre ellos los físicos Enrico Fermi y Edward Teller, el biólogo Harold Urey y el cristalógrafo John Bernal, escribieron cartas de protesta, y los bioquímicos franceses eligieron a Pauling como presidente honorario de un Congreso Internacional de Bioquímica que iba a celebrarse aquel julio en París.

La presión internacional al final hizo efecto. Cuando Pauling volvió a solicitar el pasaporte en junio, el Departamento de Estado revocó la denegación de Shipley, y se permitió que Pauling viajara el 14 de julio (el día de la Bastilla), a Francia e Inglaterra.

Aparte de su significación política, la debacle del pasaporte tuvo algunas consecuencias científicas. Corey, que asistió al congreso de la Real Sociedad, aprovechó la oportunidad para visitar el laboratorio de Franklin. Allí le mostraron las excelentes placas de rayos X que habían obtenido. Sin embargo, por lo que parece Corey no supo comprender en aquel momento las implicaciones plenas de las fotografías, pues no le comentó nada de importancia a Pauling. Se han escrito volúmenes enteros de especulaciones sobre lo que podría haber pasado si el propio Pauling hubiese conseguido el permiso para viajar y hubiese visto aquellas fotografías. Pero lo cierto es que todas esas especulaciones son bastante irrelevantes. Pauling *tuvo* la oportunidad de visitar al equipo de King's College apenas diez semanas más tarde, durante el mes que pasó en Inglaterra en el verano de 1952, pero decidió no hacerlo. La razón era sencilla: Pauling todavía estaba empeñado en convencer a todo el mundo de la corrección de su modelo de la hélice alfa de las proteínas; el ADN no era el problema principal que ocupaba su mente. Como más tarde se supo, las placas de Franklin, y en particular la 51, que pronto se haría famosa, contenían el sello claro y auténtico de una hélice de doble hebra.

Hay otra información importante sobre el ADN que Pauling llegó a conocer pero que olvidó, o al menos no interiorizó. Tiene que ver con las bases de los nucleótidos. La siguiente anécdota demuestra hasta qué punto las respuestas emocionales pueden interferir incluso con procesos que supuestamente están regidos por el más puro razonamiento científico.

El día después de la Navidad de 1947, Pauling y su familia estaban de camino a Europa para la estancia de seis meses de Pauling en Oxford. Viajaron a bordo del famoso *Queen Mary*. Por casualidad, Erwin Chargaff, que desde los años de la guerra estaba interesado en los ácidos nucleicos, iba a bordo del mismo barco, y Pauling no tardó en tropezarse con él. Por desgracia, Chargaff era, en palabras del biólogo Alex Rich²³⁷, una «persona muy intensa». Eso no iba con Pauling, que por lo general era una persona de

trato fácil y, en aquella ocasión, estaba deseando unas relajadas vacaciones. En consecuencia, Pauling no solo no le prestó demasiada atención a la animada descripción que le hizo Chargaff de sus resultados de investigación, sino que más tarde al parecer pasó por alto el importante artículo de Chargaff sobre los ácidos nucleicos. En aquel artículo, publicado en 1950²³⁸, Chargaff había descubierto una interesante relación entre la cantidad de bases en el ADN. Sus datos mostraban que, fuera cual fuese el número de moléculas de adenina (generalmente abreviada como «A») en cierta sección del ADN, el número de moléculas de timina («T») era el mismo. De manera parecida, el número de unidades de guanina («G») era igual al número de unidades de citosina («C»). Esta pista tan significativa sobre la estructura del ADN, es decir, que la cantidad de A es igual a la cantidad de T y la cantidad de G igual a la de C, escapó totalmente a la atención de Pauling. De no haber sido así, tal vez el descubrimiento de la estructura del ADN se hubiera producido de otro modo.

Tras su viaje a Inglaterra y Francia en el verano de 1952, Pauling regresó a Caltech en septiembre. Sin embargo, ni siquiera entonces estaba preparado para sumergirse de lleno otra vez en el problema del ADN. Una conversación que había mantenido con Crick en Inglaterra aquel verano le había dado una idea sobre cómo podía resolver por fin el rompecabezas de la reflexión de la proteína a 5,1 angstroms. Como a menudo pasa en la ciencia, Pauling y Crick resolvieron ese problema de forma independiente demostrando que las hélices alfa podían formar estructuras enrolladas, como una cuerda, en torno a sí mismas, y eran estas las que daban origen a aquella marca enigmática. Todo esto sonaba a punto final, y aunque Pauling no lo sabía en aquel momento, la «carrera» para resolver el ADN estaba entrando en la recta final.

La triple hélice

La visita de Pauling a Francia le proporcionó una pista adicional sobre el hecho de que, al final, probablemente fuera el ADN el material genético principal. El microbiólogo norteamericano Alfred Hershey presentó los datos en una conferencia internacional sobre virus celebrada en Royaumont, cerca de París. Hershey y su colaboradora, Martha Chase²³⁹, marcaron el ADN y la proteína del bacteriófago T2 (un virus) con fósforo y azufre radiactivos, respectivamente. Entonces dejaron que los fagos infectasen unas bacterias y pudieron demostrar que el material genético que infectaba las bacterias era muy probablemente el ADN y no la proteína. La cubierta de proteínas del virus se quedaba fuera de la célula bacteriana y no jugaba ningún papel en la infección. Pero no todo el mundo quedó convencido. De hecho, el propio Hershey señaló cautelosamente que todavía no estaba claro si su resultado tenía un significado fundamental. James Watson, por otro lado, que también estaba en Royaumont y tenía el ADN en el punto de mira, quedó bastante convencido.

Pauling finalmente volvió a ocuparse del ADN hacia finales de noviembre de 1952. Su vuelta vino espoleada por una intrigante conferencia que el biólogo Robley Williams pronunció en Caltech. Williams mostró unas imágenes²⁴⁰ de gran resolución que había obtenido con un microscopio electrónico de una sal de ácido nucleico, un pariente químico del ADN. Para Pauling, las imágenes de las hebras largas y cilíndricas, junto con las fotos de difracción de rayos X de Astbury, parecían aportar la evidencia definitiva, si es que necesitaba alguna, de una molécula helicoidal. Pauling también sabía por el trabajo del químico orgánico Alexander Todd que la espina de la molécula de ADN contenía grupos repetidos de fosfato y azúcar.

Armado con las fotos de Astbury, que mostraban fuertes reflejos con un espaciado de unos 3,4 angstroms, Pauling comenzó a realizar cálculos de la estructura del ADN el 26 de noviembre. Basándose en las mediciones de densidad de Astbury y Bell²⁴¹ y el diámetro de la hebra de Williams, estimó que la longitud de un residuo a lo largo del eje de la fibra era de 1,12

angstroms, casi exactamente un tercio del espaciado en las placas de rayos X (de 3,4 angstroms). Esto le llevó a una sorprendente conclusión: «La molécula cilíndrica está formada por *tres cadenas*, enrolladas unas con otras [...] de manera que cada cadena es una *hélice*²⁴²». Dicho de otro modo, tras haberse convencido de que una hélice de dos hebras produciría una densidad demasiado baja, Pauling optó por una estructura helicoidal de tres hebras. Esta estructura pasó a conocerse como triple hélice.

El siguiente problema que tuvo que encarar concernía a la naturaleza del núcleo mismo del diseño helicoidal de tres cadenas, la parte de la molécula más cercana al eje. La cuestión era: ¿cuál de los tres componentes conocidos de los nucleótidos (bases, azúcares o grupos fosfato) formaba el núcleo? Pauling y Corey siguieron un proceso mental de eliminación:

A causa de su naturaleza variada, el grupo purina-pirimidina [las bases] no puede empaquetarse a lo largo del eje de la hélice de una manera que permita formar enlaces adecuados entre los residuos de azúcar y los grupos fosfato [...] También es improbable que los grupos de azúcar constituyan el núcleo de la molécula [...] la forma [...] es tal que el empaquetamiento denso de estos grupos a lo largo del eje helicoidal es difícil, y no ha sido posible encontrar una forma satisfactoria de empaquetarlos... *En conclusión, el núcleo de la molécula probablemente esté formado por grupos fosfato* [la cursiva es mía]²⁴³.

La disposición tenía ahora este aspecto: los grupos fosfato se disponían a lo largo del eje de la hélice, mientras que los azúcares los rodeaban y las bases salían proyectadas radialmente hacia afuera. La molécula de tres hebras se mantenía unida gracias a los enlaces de hidrógeno entre los grupos fosfato de las distintas hebras.

Esta estructura parecía prometedora, pero Pauling todavía tenía algunos problemas. El centro de la molécula ahora parecía estar tan abarrotado con las tres cadenas de fosfatos que recordaba a esas competiciones para ver quién consigue meter más gente en una cabina telefónica. Pauling sabía que

el ion fosfato tenía forma tetraédrica, con un átomo central de fósforo rodeado por cuatro átomos de oxígeno situados en los vértices de una pirámide. A lo largo del mes de diciembre, él, Corey y el químico Verner Schomaker no cesaron de intentar apretujar, retorcer y doblar esos tetraedros para que encajasen mejor. En este proceso, Pauling seguía los mismos instintos que anteriormente le habían llevado al triunfo con la hélice alfa. Creía que si lograba encontrar una solución química estructural que en general fuese congruente con los datos de rayos X, el resto de los problemas se solucionarían solos. Por ejemplo, estaba la cuestión de cómo permitía el modelo la existencia de una sal sódica de ADN, pues estaba claro que en el núcleo no quedaba espacio para iones de sodio. Pauling no tenía una respuesta, pero suponía que se encontraría una en cuanto se resolviera la arquitectura principal. El ritmo de trabajo era frenético. Pauling llegó incluso a convocar a un pequeño grupo²⁴⁴ de científicos en su laboratorio para una presentación informal el día de Navidad. Hacia el final del mes, creía que ya tenía un modelo esencialmente correcto. Pauling y Corey enviaron para su publicación el artículo «A Proposed Structure for the Nucleic Acids» («Proposición de una estructura para los ácidos nucleicos») el último día de 1952. El artículo comenzaba diciendo: «Los ácidos nucleicos, como constituyentes de los organismos vivos, revisten una importancia comparable a las proteínas». Seguían unas pocas frases de tono algo más cauto:

Hemos formulado una estructura prometedora para los ácidos nucleicos [...] Esta es la primera estructura con una descripción precisa de los ácidos nucleicos jamás sugerida por un investigador. La estructura explica algunas de las características de las fotografías de rayos X, pero todavía no se han realizado cálculos detallados de densidad, y no puede considerarse que la corrección de la estructura haya quedado demostrada.

En otras palabras, aunque todavía quedaban algunos flecos por arreglar, Pauling quería establecer su prioridad.

En contraste con el espíritu cauteloso del artículo científico, en sus comunicaciones personales sobre el modelo propuesto, Pauling expresaba más confianza y se mostraba muy optimista. En una carta al bioquímico escocés (y más tarde premio Nobel) Alexander Todd, fechada el 19 de diciembre de 1952, Pauling escribió: «Creemos haber descubierto la estructura de los ácidos nucleicos. Mi impresión es que en un mes, más o menos, enviaremos un manuscrito con una descripción de la estructura, pero prácticamente no me queda ninguna duda sobre la corrección de la estructura que hemos descubierto [...] La estructura es realmente hermosa²⁴⁵». En una carta enviada el mismo día²⁴⁶ a Henry Allen Moe, presidente de la Fundación Guggenheim, Pauling repetía la misma impresión: «Creo que ya he descubierto la estructura de los ácidos nucleicos».

Otra persona con la que Pauling mantenía correspondencia regular era su hijo Peter, quien, por las cosas del destino, había llegado a Cambridge apenas unos meses antes para trabajar como estudiante investigador con John Kendrew. El despacho de Peter estaba en una oficina con otros cuatro compañeros. En palabras de Peter: «A mi izquierda, cerca de la ventana²⁴⁷, había un tipo bastante ruidoso llamado Francis Crick. A mi derecha estaba la mesa que de vez en cuando ocupaba Jim Watson. También estaba en la misma sala un científico visitante, Jerry Donohue, a quien conocía bien a causa de su larga asociación con Caltech, y Michael Bluhm, el ayudante de investigación de John Kendrew». En aquella época anterior al correo electrónico, Peter, con su correspondencia regular con su padre, se convirtió en la principal línea de comunicación entre Caltech y Cambridge. En consecuencia, en cuanto Linus informó a Peter de su artículo sobre la estructura del ADN, Peter le pidió una copia. Eso ocurría el 13 de enero de 1953. Peter añadió a su carta un breve comentario sobre la presión que sentían los científicos británicos: «Hoy me han contado una historia²⁴⁸. Ya sabes cómo se amenaza a los niños diciéndoles "más vale que te portes bien o vendrá el coco". Pues bien, durante más de un año, Francis [Crick] y otros

le vienen diciendo a la gente que trabaja sobre los ácidos nucleicos en King's: "más vale que trabajéis mucho o Pauling acabará interesándose por los ácidos nucleicos"».

En estas condiciones, es lógico que la noticia de Peter de que Pauling había descubierto la estructura del ADN alcanzase a Watson y a Crick como un rayo. Con el recuerdo de la anterior victoria de Pauling con la hélice alfa todavía fresco en la mente de todos en Cambridge, los dos jóvenes se preguntaron si aquello no sería un catastrófico ejemplo de *déjà vu*. El 23 de enero Peter le envió otra carta a Linus, esta vez para quejarse solamente de que «ojalá Jim Watson estuviese aquí [Watson estaba haciendo una visita corta a Milán]. Es bastante aburrido. No hay nada que hacer. No hay chicas interesantes, solo jóvenes afectadas que solo están interesadas en el sexo, de una manera indirecta²⁴⁹».

Las semanas que transcurrieron entre la solicitud de Peter de una copia del artículo de Pauling y la llegada del manuscrito el 28 de enero se les hicieron eternas a Watson y Crick. Cuando Peter por fin trajo el artículo, Watson al instante lo extrajo del bolsillo exterior de la gabardina de Peter y devoró el resumen y la introducción. Luego, tras examinar las ilustraciones durante unos minutos, no podía creer lo que veían sus ojos. La estructura de Pauling, con los fosfatos en el centro y las bases en el exterior, se parecía sorprendentemente al modelo que él y Crick habían descartado. ¡Aquel modelo era un error garrafal!

Capítulo 7

Pero ¿de quién es el ADN?

Las calamidades son de dos tipos: las desgracias nuestras y la buena fortuna de los otros.

Ambrose Bierce

Watson no llegó a la conclusión de que el modelo de Pauling fuese incorrecto solo porque tuviera tres hebras. La molécula de ácido nucleico de Pauling sencillamente no era un ácido. Es decir, no podía liberar átomos de hidrógeno de carga positiva al disolverse en el agua, que es la definición de ácido. En su modelo, los átomos de hidrógeno estaban enlazados firmemente a los grupos fosfato, haciendo que estos fuesen eléctricamente neutros, mientras que cualquier libro básico de química (¡incluido el de Pauling!) decía que los fosfatos tenían que tener carga negativa (el ácido está altamente ionizado en solución acuosa). Además, no había manera de extraer esos átomos de hidrógeno, pues eran los enlaces fundamentales que mantenían juntas las tres hebras por medio de enlaces de hidrógeno.

A Watson y Crick les costaba aceptar la enormidad de aquel error. El mejor químico del mundo había construido un modelo completamente defectuoso, y no por alguna sutil característica biológica sino por una tremenda pifia de la química más elemental. Todavía incrédulo, Watson corrió a ver al químico²⁵⁰ de Cambridge Roy Markham y a visitar el laboratorio de química orgánica para contrastar con ellos que no había ninguna duda de que el ADN, tal como se presenta en la naturaleza, era efectivamente la sal de un ácido. Para satisfacción de Watson, todos le confirmaron lo impensable: Pauling había preparado una chapuza química.

Solo quedaban dos cosas por hacer aquel día. Primero, Crick corrió a ver a Perutz y Kendrew para convencerlos de que la urgencia era extrema. Si él y

Watson no se ponían de inmediato a modelar, argumentó, no pasaría mucho tiempo antes de que Pauling descubriese su error y revisase su modelo. Crick calculó que no debían tener más de unas seis semanas para desarrollar un modelo correcto. La segunda acción de Watson y Crick fue igualmente obvia para los dos jóvenes: fueron a celebrarlo al pub Eagle²⁵¹ en Bene't Street. Watson recordaría más tarde: «Como la excitación de las últimas horas había hecho que fuera imposible trabajar más aquel día, Francis y yo nos fuimos al Eagle. En cuanto abrió sus puertas aquella noche, allí estábamos para beber y brindar por el fracaso de Pauling».

¿Cómo pudo producirse un error de tal magnitud? ¿Por qué la forma de modelar de Pauling había tenido un éxito tan espectacular con la hélice alfa y en cambio había sido un absoluto desastre con la triple hélice?

Anatomía de un error

Intentemos analizar, una a una, las causas del fallo de Pauling. Para empezar está la cuestión de cuánto tiempo y cuánto esfuerzo había dedicado realmente a pensar en el problema del ADN. Pauling comenzó a reflexionar sobre algunos aspectos de la estructura del ADN a raíz del artículo de Ronwin de noviembre de 1951. Sin embargo, no fue hasta noviembre de 1952, todo un año más tarde, cuando se puso a trabajar en serio en el problema. Aun así, a finales de diciembre de 1952, tras apenas un mes de trabajo, ¡ya había enviado un artículo para su publicación! Esto contrasta con los esfuerzos que dedicó a la estructura del polipéptido, que le mantuvo ocupado durante unos trece años y que no publicó hasta sentirse bastante seguro de su modelo. Así pues, aunque solo sea en términos del tiempo dedicado a pensar en el ADN, no hay manera de eludir la conclusión de que su modelo del ADN fue un trabajo que hizo de prisa y corriendo. Maurice Wilkins desde luego así lo creía. En una entrevista sobre la historia del descubrimiento de la estructura del ADN, señaló: «Pauling ni siquiera lo *intentó*²⁵². No es posible que él mismo le haya dedicado más de cinco minutos al problema». Volveremos a

ocuparnos más adelante de las posibles razones de esa prisa y de su aparente falta de concentración.

En segundo lugar, existía una enorme diferencia entre la calidad de los datos sobre los que Pauling construyó su modelo de las proteínas y su modelo del ADN. En el caso de la hélice alfa, el colaborador de Pauling, Robert Corey, había producido un enorme arsenal de información estructural sobre tamaños, volúmenes y posiciones angulares de los aminoácidos y los péptidos simples. Para el ADN, en cambio, Pauling trabajaba casi en el vacío. Las únicas placas de rayos X de que disponía eran de poca calidad y se habían producido a partir de una mezcla de formas A y B (sin que él lo supiera), lo que las hacía casi inútiles. Y lo que es peor, Pauling no era consciente del elevado contenido en agua de las preparaciones utilizadas para obtener las fotos de difracción de rayos X. Al pasar por alto el hecho de que más de una tercera parte del material de las muestras de ADN era agua, Pauling obtuvo una densidad errónea que lo llevó a la conclusión equivocada de las tres hebras. Por último, a diferencia del amplísimo trabajo realizado por Corey sobre las piezas con que se construyen las proteínas, no se había producido un esfuerzo equivalente para describir las bases, las subunidades de los nucleótidos.

Luego están los dos sorprendentes lapsus de memoria: uno sobre los cocientes entre bases de Chargaff y el otro sobre el principio de complementariedad del propio Pauling. El hallazgo de Chargaff de que la cantidad de base A era igual a la de T, y la cantidad de C igual a la de G, llevaba a pensar que de algún modo las bases se apareaban y producían dos hebras, no tres. Pauling afirmaría más tarde que él había llegado a conocer estos cocientes pero los había olvidado. El propio Chargaff creyó que esta era *la* razón del error de Pauling cuando dijo: «En *su* modelo estructural del ADN, Pauling *no tomó en consideración* mis resultados. La consecuencia fue que su modelo no tenía ningún sentido a la luz de los datos de la química».

El segundo fallo de memoria de Pauling fue aún más increíble. Recordemos que Pauling había dicho en 1948 que si los genes estuvieran formados por dos partes que fuesen complementarias entre sí en su estructura, la replicación sería relativamente sencilla. En ese caso, cada una de las partes podía servir de molde para la producción de la otra, y el complejo constituido por las dos partes complementarias podía servir como molde para duplicarse a sí mismo. Claramente, este principio de autocomplementariedad²⁵³ sugiere fuertemente una arquitectura basada en dos hebras, y era marcadamente incongruente con una estructura de tres hebras. Sin embargo, Pauling parecía haber olvidado completamente este principio cuando construyó su modelo del ADN.

Cuando hablé con Alex Rich y Jack Dunitz²⁵⁴, que por aquel tiempo eran posdoctorandos de Pauling, ambos estuvieron de acuerdo en que si Pauling hubiese visto la placa 51 de Rosalind Franklin de la forma B del ADN, habría comprendido de inmediato que la molécula poseía una simetría doble, lo que apuntaba a una estructura de dos hebras, no a una estructura de tres cadenas. Sin embargo, como ya hemos visto, Pauling no hizo ningún esfuerzo especial por ver las placas de Franklin.

En enero de 2011, le pregunté a James Watson cuánto se había sorprendido al ver el modelo erróneo de Pauling de la triple hélice. Watson se rio. «¿Sorprendido? Nadie habría podido escribir una novela de ficción en la que Linus hubiera cometido un error como ese. En el momento en que vi la estructura, pensé: "Esto es una locura"».

Un examen concienzudo de las muchas causas potenciales del calamitoso modelo de Pauling plantea una serie de preguntas a un nivel más profundo: ¿cómo podemos explicar la prisa, la aparente falta de esfuerzo, los olvidos y el descuido de algunas de las reglas básicas de la química?

A primera vista, la prisa es especialmente desconcertante si aceptamos el testimonio de Peter Pauling de que nunca hubo una «carrera» para resolver la estructura del ADN. En el mismo entretenido relato en el que observa que

para su padre el ADN solo era una sustancia química interesante como tantas otras, Peter añade: «La historia del descubrimiento de la estructura del ADN se ha descrito en la prensa popular como "la carrera por la doble hélice". Nada puede estar más lejos de la realidad. La única persona que cabe imaginar en la carrera era Jim Watson». Peter explica además²⁵⁵ que «Maurice Wilkins nunca ha corrido contra nadie en ningún lugar», y que a Francis Crick tan solo le gustaba «desafiar a su cerebro con problemas difíciles». Le pregunté a Alex Rich y Jack Dunitz acerca de esto, y ninguno de los dos pensó que hubiera una carrera por lo que respecta a Pauling. ¿Por qué, entonces, corrió tanto a publicar? «Porque siempre fue competitivo», sugirió Rich. Eso sin duda es cierto, pero solo puede ser una parte de la explicación, puesto que Pauling había demostrado mucha más cautela y paciencia en el caso de la hélice alfa. Irónicamente, su triunfo con la hélice alfa sin duda contribuyó a su derrota con la triple hélice, pues Pauling suponía, basándose en su éxito con la primera, que podría repetir el éxito con la segunda. En este sentido, se trata de un caso clásico de *razonamiento inductivo*: la estrategia común de hacer conjeturas probabilísticas basadas en la experiencia pasada, solo que llevada demasiado lejos.

Todo el mundo utiliza el razonamiento inductivo²⁵⁶ continuamente, y suele ayudarnos a tomar decisiones correctas a partir de datos relativamente pobres. Supongamos, por ejemplo, que nos piden que completemos esta frase: «Shakespeare fue un _____ con un talento único». La mayoría de la gente probablemente respondería «dramaturgo», y al hacerlo estaría perfectamente justificado. Aunque no hay nada ilógico en completar la frase con «cocinero» o «jugador de cartas», lo más probable es que la palabra buscada sea «dramaturgo». El razonamiento inductivo es lo que nos permite usar nuestra experiencia acumulada para resolver problemas mediante la elección de la respuesta más probable. Igual que unos jugadores de ajedrez experimentados, no solemos analizar todas las respuestas lógicas posibles, sino que optamos por la que consideramos más probable. Esta es una parte

esencial de nuestra cognición. El psicólogo Daniel Kahneman describió el proceso del siguiente modo: «No podemos vivir en un estado de duda perpetua, así que construimos la mejor historia posible y vivimos como si fuera cierta²⁵⁷». Sin embargo, como el razonamiento inductivo implica la elaboración de conjeturas probabilísticas, a veces se equivoca, y ocasionalmente puede equivocarse *mucho*. Pauling creía que podía tomar un atajo porque la experiencia pasada le había mostrado que todas sus intuiciones estructurales habían resultado ser ciertas. En el fracaso del ADN, al cometer el error fue víctima de su anterior genialidad.

Pero ¿por qué le pareció que tenía que acortar distancias? De buen seguro no por Watson y Crick (apenas sabía nada de su empeño) sino porque sabía que King's College y tal vez incluso Cavendish disponía de mejores datos de rayos X. Debió suponer que no pasaría mucho tiempo antes de que sus viejos rivales Bragg, Perutz, Kendrew o tal vez Wilkins dieran con la estructura correcta. Decidió apostar²⁵⁸, y perdió.

Pero hay muy pocas dudas de que si Pauling hubiera retrasado sustancialmente la publicación de su modelo, algunos investigadores de Cambridge o Londres habrían publicado primero su modelo correcto. Aunque Pauling no pensó en concreto en Watson y Crick, sabía que su competencia tenía la mejor mano, así que asumir un riesgo calculado quizá no fuese tanto una locura.

A título algo más especulativo, la decisión de Pauling de correr a publicar podría relacionarse con un sesgo cognitivo humano conocido como *efecto de encuadre*, que refleja una fuerte aversión a la pérdida²⁵⁹. ¿Por qué los supermercados suelen decir en su publicidad que su carne picada es «90 por ciento magro» y no «10 por ciento grasa»? Es mucho más probable que la gente la compre con la primera etiqueta que con la segunda, por mucho que digan lo mismo. De igual modo, es más probable que la gente vote por un programa electoral que prometa un 90 por ciento de empleo que por uno que resalte un 10 por ciento de desempleo. Numerosos estudios demuestran que

el grado en que percibimos la pérdida como algo devastador es mayor que el grado en que percibimos una ganancia equivalente como una gratificación. En consecuencia, la gente tiende a arriesgar cuando se le presenta un encuadre negativo. Es posible que Pauling prefiriera correr el riesgo al enfrentarse a la posibilidad de una probable pérdida.

Luego está la cuestión desconcertante de que Pauling se olvidase de las reglas de Chargaff y, lo que es más importante, de sus propias elucubraciones sobre la autocomplementariedad del sistema genético. Creo que esto último fue una fuerte manifestación del hecho de que incluso cuando por fin decidió trabajar en el ADN, Pauling no estaba del todo convencido de que esta molécula representase el secreto último de la vida: el mecanismo de la división celular y la herencia. Hay cuatro pistas que me llevan a esta conclusión: (1) El testimonio de Peter de que para su padre el ADN no era más que otra sustancia química interesante. (2) En su carta al presidente de la Fundación Guggenheim para anunciar su «descubrimiento» de la estructura del ADN, Pauling añadió esta frase más bien poco entusiasta: «Los biólogos probablemente consideren²⁶⁰ que el problema de la estructura del ácido nucleico es del todo equiparable en importancia a la estructura de las proteínas» (nótese el tono poco comprometido de la frase «Los biólogos probablemente consideren»). (3) Luego está la pregunta mordaz que la esposa de Pauling, Ava Helen, le planteó después de que se apaciguase todo el jaleo que se armó tras la publicación del modelo de Watson y Crick: «Si era un problema tan importante²⁶¹, ¿por qué no le dedicaste más esfuerzos?». (4) El propio artículo de Pauling y Corey (sobre la triple hélice) proporciona lo que tal vez sea la prueba más convincente de su falta de confianza en la importancia del ADN. Pauling y Corey discuten las implicaciones biológicas de su modelo solo de pasada. En el párrafo inicial de su artículo, mencionan sin mucho entusiasmo que existen indicios de que los ácidos nucleicos «están implicados» en los procesos del crecimiento y la división celular, y de que «participan» en la transmisión de caracteres

hereditarios. Solo en el último párrafo del manuscrito original abordan vagamente la cuestión de la codificación de información (pero no dicen nada de la copia), y señalan: «La estructura propuesta permite²⁶², por lo tanto, la construcción del máximo número de ácidos nucleicos, lo que implica la posibilidad de una alta especificidad». En mi opinión, esta falta de convicción por parte de Pauling en el papel crucial del ADN está en el meollo de que, al parecer, el tema de la herencia, y los importantes pronunciamientos de Pauling al respecto, al parecer permanecían en su mente bastante desconectados del problema de la estructura del ADN.

El olvido de las reglas de Chargaff es, a mi entender, menos misterioso. En primer lugar, el desagrado personal que sentía Pauling hacia Erwin Chargaff seguramente contribuyó de algún modo a su falta de atención a los resultados de este. En segundo lugar, conviene recordar que Pauling fue distraído continuamente mientras trabajaba sobre el ADN. Enredado en sus intentos por completar su trabajo sobre las proteínas y en sus amargas confrontaciones políticas con el macarthismo, apenas le quedaba tiempo para concentrarse. De hecho, el 27 de marzo de 1953, apenas dos meses después de que Peter recibiera el manuscrito sobre el ADN, Pauling le escribió a este una carta en la que le comentaba: «Estoy dándole los últimos toques²⁶³ a mi artículo sobre una nueva teoría del ferromagnetismo». ¡Ya estaba pensando en otra cosa! Eso no podía ayudar de ningún modo. Amplios estudios realizados por investigadores suecos²⁶⁴ demuestran que los problemas naturales de la memoria (conocidos como olvido senescente benigno) se producen con mucha más frecuencia cuando la atención se divide o tiene que dirigirse a otro lugar rápidamente. Por tanto, que Pauling no recordase las reglas de Chargaff no es demasiado sorprendente.

Por último, está la pregunta que más perplejidad provoca, la de por qué Pauling ignoró algunas reglas básicas de la química en su modelo, como las referentes a la acidez del ADN. El químico más famoso del mundo, ¿y mete la pata en una cuestión de química elemental?

Le pregunté al biólogo molecular²⁶⁵ Matthew Meselson qué pensaba de este aspecto del error. La impresión de Meselson, que entonces era estudiante de grado con Pauling, era que Pauling debía haber considerado el problema y debía haber decidido que podría resolverse de algún modo. Eso desde luego sería coherente con el estado de ánimo mental que en general mostró Pauling a lo largo de todo el episodio de la construcción del modelo del ADN. Su razonamiento debió ser algo así: disponía de un exitoso modelo para proteínas consistente en una hebra helicoidal con cadenas laterales hacia el exterior. Por consiguiente, pensó que el modelo del ADN consistiría en hebras entrelazadas, también con cadenas laterales (las bases, en este caso) hacia el exterior. Esto creaba un problema de empaquetamiento a lo largo del eje, pero el resto de las características, en la mente de Pauling, eran en cierto sentido detalles que se podrían resolver más tarde. Una vez más, su éxito anterior con la hélice alfa tuvo el efecto de cegarlo. Por desgracia, como bien sabemos, el demonio a menudo está precisamente en esos detalles.

En mi conversación con Jack Dunitz, este recordó que Pauling le había dicho en cierta ocasión algo que resumía muy bien su actitud hacia la investigación científica:

Jack, si crees que tienes una buena idea, ¡publicala! No tengas miedo a equivocarte. Los errores no dañan a la ciencia porque hay un montón de gente inteligente que enseguida identificará el error y lo corregirá. Lo único que puede pasar es que quedes como un tonto, pero eso no produce ningún daño, solo lastima el orgullo. En cambio, si resulta ser una buena idea y no la publicas, la ciencia sufrirá una pérdida.

Dunitz añadió que, efectivamente, la estructura de las tres hebras no produjo ningún daño, salvo a la reputación de Pauling, y comentó además que Pauling había hecho bastantes contribuciones importantes como para que perdonemos y olvidemos. Debo decir que estoy completamente de acuerdo con la parte de «perdonar», pero creo que *no* deberíamos olvidar.

Como he intentado mostrar aquí, es mucho lo que se puede aprender al analizar los errores de personas tan brillantes.

Visión doble

El resto de la historia del descubrimiento de la estructura del ADN se ha explicado ya muchas veces, pero la correspondencia de Francis Crick que se ha descubierto recientemente arroja una nueva luz sobre la frenética actividad que precedió a la publicación del modelo de Watson y Crick.

El error de Pauling actuó como el catalizador que convenció a Bragg de que debía permitir que Watson y Crick volvieran a trabajar en su modelo. En apenas dos semanas, Watson viajó a Londres donde Wilkins, también satisfecho con el fallo de Pauling, se tomó la libertad de mostrarles la famosa placa 51 de la forma B del ADN que había obtenido Franklin (figura 14), sin el permiso de esta. Se ha vertido mucha tinta sobre la cuestión de la naturaleza ética de este acto concreto. En mi humilde opinión, hay tres partes principales de esta historia que merecen atención. En primer lugar, al parecer no había ningún problema en el hecho de que Wilkins tuviera una copia de la foto (que le había dado Gosling), puesto que Franklin iba a dejar King's College para trabajar en Birkbeck College, y había sido informada por el director del laboratorio, *sir* John Randall, de que los resultados de todo el trabajo sobre el ADN pertenecían exclusivamente a King's. En segundo lugar, no cabe prácticamente ninguna duda (al menos para mí) de que Franklin debería haber sido consultada antes de que sus resultados *no publicados* fuesen compartidos con miembros de otro laboratorio. Por último, existe desacuerdo sobre si Watson y Crick agradecieron adecuadamente la contribución de Franklin en su artículo. Cada cual puede formarse su propio juicio. Lo que escribieron fue: «También nos ha estimulado²⁶⁶ el conocimiento de la naturaleza general de las ideas y los resultados experimentales no publicados del doctor M. H. F. Wilkins, la doctora R. E. Franklin y sus colaboradores en King's College, Londres». Sea como fuere, el

efecto que tuvo la fotografía en Watson fue dramático: la cruz oscura era la señal inequívoca²⁶⁷ de una estructura helicoidal. No es de extrañar que, como él mismo describiría más tarde, se quedara «boquiabierto» y su «pulso se acelerase²⁶⁸».

Watson y Crick pasaron las siguientes semanas intentando frenéticamente construir modelos en los que las bases formasen los peldaños de la escalera helicoidal que tenían en mente. Los primeros intentos fueron infructuosos. Pasando por alto la pista de los cocientes de Chargaff, Watson pensó, equivocadamente, que debía aparear cada base con su propia clase, formando peldaños compuestos por adenina-adenina (A-A), citosina-citosina (C-C), guanina-guanina (G-G) y timina-timina (T-T). Sin embargo, como las bases C y T tenían una longitud distinta de G y A, los peldaños resultantes tenían longitudes desiguales, lo que no cuadraba con la pauta simétrica que mostraba la placa 51. Luego estaba la cuestión del enlace entre las dos bases de cada peldaño y entre el peldaño y las «patas» de la escalera (que suponían compuestas por azúcares y fosfatos). También en esto Watson y Crick fueron por el camino equivocado, pero su compañero de despacho Jerry Donohue vino al rescate²⁶⁹. Como antiguo estudiante de Pauling, Donohue sabía todo lo que había que saber sobre los enlaces de hidrógeno, y les hizo ver a Watson y Crick que incluso muchos libros situaban en posiciones incorrectas los átomos de hidrógeno de la timina y la guanina. Al colocar estos átomos en sus posiciones correctas, se abrían nuevas posibilidades para establecer enlaces entre las bases. Al cambiar las parejas que formaban las bases (además de las parejas entre iguales), Watson de repente se dio cuenta de que un par A-T aguantado por dos enlaces de hidrógeno era idéntico a un par G-C unido de la misma forma. Los peldaños adquirieron la misma longitud. Además, este emparejamiento ofrecía una explicación natural de las reglas de Chargaff. Claramente, si A siempre se emparejaba con T, y G con C, el número de moléculas de A y T en cualquier segmento de ADN siempre será igual, y lo mismo para G y C. Otra fuente de

información valiosa llegó a sus manos por aquel entonces gracias a Max Perutz: una copia del informe de Franklin, escrito para una visita a King's College del comité de biofísica del Consejo de Investigaciones Médicas. A partir de la simetría del ADN cristalino²⁷⁰ descrito en aquel informe, Crick llegó a la conclusión de que las dos hebras de ADN eran antiparalelas: corren en direcciones opuestas.

La estructura resultante fue la celebrada doble hélice, en la que dos hebras helicoidales (las patas de la escalera) estaban hechas de azúcares y fosfatos alternados, y las bases emparejadas se unían a los azúcares formando los peldaños (figura 15). Llegado este momento, Watson y Crick estaban tan convencidos de la corrección de su modelo que estaban ansiosos por enviar una nota breve a *Nature* para anunciarlo. Aun antes de que eso ocurriera, según la hoy famosa descripción de Watson, Crick interrumpió el almuerzo de los comensales del Eagle para anunciar que él y Watson habían «descubierto el secreto de la vida». La figura 16 muestra el lugar en el Eagle donde Crick hizo su anuncio.

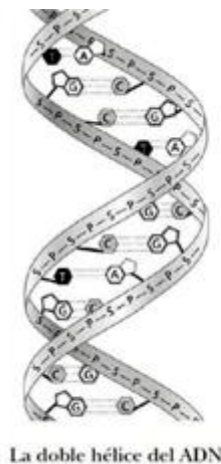


Figura 15 y Figura 16

El 17 de marzo de 1953, Crick envió una copia del artículo a Wilkins. Uno de los documentos recobrados con la correspondencia «perdida» de Crick es un

borrador de la carta que había de acompañar al manuscrito. Parte de esta decía:

Estimado Maurice:

Adjunto un borrador de nuestra nota²⁷¹. Dado que Bragg todavía no la ha visto, le ruego que no se la muestre a nadie. La razón de enviársela a usted en este momento es la de obtener su aprobación sobre dos cuestiones:

- a) la referencia número 8 a su trabajo inédito;*
- b) los agradecimientos.*

Si desea que revisemos cualquiera de estos dos puntos, háganoslo saber. Si no recibimos respuesta de usted en el plazo de un día o poco más, supondremos que no tiene ninguna objeción sobre su forma actual.

Este borrador y otro dirigido a uno de los editores de *Nature* (que al parecer nunca fue enviado) muestran que Crick y Watson tenían la impresión de que el suyo era el único manuscrito que se enviaría en aquel momento. En realidad, los dos grupos de King's también enviaron artículos a *Nature*. En un mensaje breve a Crick, escrito probablemente el mismo día, Wilkins dice: «Adjunto el borrador casi sin corregir. ¿Cómo deberíamos citar su nota?». Acompañaba la nota un borrador del manuscrito de Wilkins. El tercer artículo era de Rosalind Franklin y Raymond Gosling.

En cuanto se dio cuenta de la situación, Crick expresó la opinión de que cada uno debería ver los manuscritos de los otros: «No es razonable que se envíen varias notas conjuntamente a *Nature* sin que las hayan leído todos los implicados. Nosotros queremos ver la suya [de Franklin], y no dudo que ella querrá ver la nuestra». Wilkins estuvo de acuerdo. En una carta recién descubierta fechada «Lun.», que probablemente se refiere al lunes 23 de marzo, dice: «Os mandamos una copia de la de Rosy con el correo de

mañana», y añade: «Raymond y Rosy tienen la vuestra, así que todos habrán visto todas».

Tal vez lo más fascinante de la nueva correspondencia sea lo relacionado con Pauling. Para empezar, Crick expresa cuánto le desagrada que Franklin pudiera querer ver a Pauling en su próxima visita a Inglaterra. «No es posible», le escribe a Wilkins, «que pueda considerar la posibilidad de entregarle los datos experimentales a Pauling. Eso inevitablemente significaría que Pauling demostraría la estructura y no usted». A lo que Wilkins responde con irritación: «Si Rosy quiere ver a Pauling²⁷², ¿qué demonios puedes hacer al respecto? Si le sugiriésemos que sería bueno que no lo hiciera, solo conseguiríamos animarla a hacerlo. ¿Por qué está todo el mundo tan interesado en ver a Pauling? [...] ¡Ahora Raymond [Gosling] también quiere verlo! ¡Al infierno con todo!». Este intercambio de pareceres es una demostración perfecta del respeto que Pauling todavía inspiraba incluso en uno de los momentos más bajos de su carrera.

El número de *Nature* del 25 de abril de 1953 contenía tres artículos sobre la estructura del ADN. El primero era el auténtico hito que constituye el artículo de Watson y Crick²⁷³, en el que describen la estructura de la doble hélice. El artículo ocupa poco más de una página, ¡pero menuda página! Watson y Crick comienzan reconociendo que «Pauling y Corey ya han propuesto una estructura para el ácido nucleico. Tuvieron la amabilidad de permitirnos disponer de su manuscrito antes de su publicación». Sin embargo, a renglón seguido añaden: «En nuestra opinión, esta estructura no es satisfactoria». Entonces explican brevemente su «estructura radicalmente distinta» consistente en «dos cadenas helicoidales enrolladas una alrededor de la otra en el mismo eje», y, en particular, la «novedosa característica» de la estructura, que es «la manera en que las dos cadenas se mantienen unidas por las bases de purinas y pirimidinas».

El modelo de Watson y Crick sugirió de inmediato una solución tanto a la manera de codificar la información genética como al acertijo de cómo se las

arregla la molécula para copiarse a sí misma. Los detalles se presentaron en un segundo artículo²⁷⁴, publicado apenas cinco semanas después del primero, en el que Watson y Crick propusieron el mecanismo que subyace al código genético: «La espina de fosfato y azúcar de nuestro modelo es completamente regular, pero en la estructura cabe cualquier secuencia de pares de bases. De ello se sigue que en una molécula larga son posibles muchas permutaciones distintas, y por lo tanto parece probable que *la secuencia precisa de las bases sea el código que porta la información genética* [la cursiva es mía]». El mensaje era claro: la codificación de las instrucciones genéticas necesarias para crear, pongamos por caso, un aminoácido, está contenida en la secuencia específica de bases de los peldaños. Por ejemplo, la secuencia C-G seguida de G-C y luego de T-A codifica la formación del aminoácido arginina, mientras que G-C seguido de C-G y luego T-A codifica la alanina. El proceso de copia se hace (precisamente tal como había anticipado Pauling en 1948) «desabrochando» por su centro la escalera de la doble hélice para producir dos mitades, cada una con una de las patas y la mitad de cada uno de los peldaños. Como la secuencia de bases de una de las cadenas automáticamente determina la secuencia de bases de la otra (porque la pareja de T siempre es A y la de G siempre es C), está claro que una mitad de la molécula contiene toda la información necesaria para construir la molécula entera. Por ejemplo, si la secuencia de bases a lo largo de una cadena de ADN es TAGCA, la secuencia complementaria en la otra cadena solo puede ser ATCGT. De este modo, se pueden generar dos escaleras completas a partir de la original y, así, copiar la molécula de ADN.

En el primero de los artículos, Watson y Crick no especificaron el mecanismo de copia, pero señalaron lacónicamente: «No ha escapado a nuestra atención el hecho de que el emparejamiento específico que hemos postulado sugiere de inmediato un posible mecanismo de copia del material genético». Crick explicó más tarde²⁷⁵ que esta frase enigmáticamente económica (que

algunos historiadores de la ciencia han calificado de elusiva) fue, en realidad, un compromiso entre su propio deseo de discutir las implicaciones genéticas en el primer artículo y la preocupación de Watson porque la estructura todavía resultase ser incorrecta. Por lo tanto, la afirmación no es más que una manera de establecer prioridad. El hecho de que Watson todavía albergara dudas sobre el modelo está bien documentado en sus cartas de esa misma época.

Como ya he señalado, el primer artículo de Watson y Crick en *Nature* iba acompañado de otros dos artículos. Uno era de Wilkins, Alexander Stokes y Herbert Wilson²⁷⁶, y en él analizaban algunos de los datos cristalográficos de rayos X y presentaban pruebas de que la estructura helicoidal existe no solo en fibras aisladas sino también en sistemas biológicos intactos. En los siguientes años, Wilkins y sus colaboradores, y también Matthew Meselson, Arthur Kornberg y otros, realizaron muchas investigaciones para confirmar cada detalle del modelo de Watson y Crick y sus conclusiones.

El tercer artículo del número de *Nature* del 25 de abril de 1953 iba firmado por Franklin y Gosling²⁷⁷. Contenía la famosa fotografía de rayos X de la estructura B. Fiel a la actitud general de Franklin hacia la ciencia, el manuscrito estaba formulado con cautela:

Aunque no pretendemos ofrecer una interpretación completa del diagrama de fibra de la estructura B, podemos enunciar las siguientes conclusiones. La estructura es probablemente helicoidal. Los grupos fosfato se sitúan al exterior de la unidad estructural, en una hélice de un diámetro de unos 20 angstroms. La unidad estructural probablemente esté constituida por dos moléculas coaxiales que no mantienen el mismo espaciado respecto al eje de la fibra [...] Por consiguiente, nuestras ideas generales no son incongruentes con el modelo propuesto por Watson y Crick en la comunicación precedente. Pocos estarían en desacuerdo con la afirmación de que las excelentes fotografías de difracción de rayos X de Franklin proporcionaron información crucial acerca de la estructura general y las dimensiones específicas del ADN.

Tristemente, Rosalind Franklin murió de cáncer en 1958 con treinta y siete años. Es posible que la enfermedad tuviera su origen en una sobreexposición a los mismos rayos X que le ayudaron a desvelar la estructura del ADN. Cuatro años más tarde, Watson, Crick y Wilkins compartieron el premio Nobel de Fisiología o Medicina por el descubrimiento de la estructura molecular del ADN y su importancia para la transferencia de información en la materia viva. Dado que el premio Nobel no se concede póstumamente ni puede ser compartido por más de tres personas (en una categoría dada y un año determinado), nunca sabremos lo que habría pasado si Franklin hubiera vivido hasta 1962.

En 2009 la famosa fotografía 51 se convirtió en el título de una exitosa obra de teatro de Anna Ziegler²⁷⁸. Como el título implica, el relato dramatizado en esta obra se centra en Rosalind Franklin y su inestable relación con Maurice Wilkins. Cuando se le solicitó un comentario sobre la obra, Watson remarcó que el personaje de Maurice Wilkins «hablaba demasiado» y que el actor que hacía el papel de Crick no le hacía justicia al verdadero porque la obra le daba un aire de «vendedor de coches usados».

A nadie le gusta admitir la derrota, y los científicos no son ninguna excepción. En una carta que Pauling escribió a Peter el 27 de marzo de 1953, observó por primera vez, como «de pasada»:

Podría ser bueno para ti ponerte en contacto con *Miss* Franklin, si crees que es un buen plan, y disponer las cosas para que nosotros también la veamos. Si la gente de King's College (*Miss* Franklin ha dejado King's College y está con Bernal en Birkbeck) expresan interés en que visite su espacio, tal vez eso se podría programar en el mismo día. No tengo intención, sin embargo, de dirigirme a ellos sobre la cuestión²⁷⁹.

Más adelante, después de un párrafo en el que describe sus planes de viaje, Pauling continúa:

He recibido una carta de Watson y Crick en la que describen su estructura brevemente, y adjuntan una copia de su carta a *Nature*. La estructura me

parece muy interesante, y no tengo ningún argumento fuerte en su contra. Pero tampoco creo que sean fuertes sus argumentos contra nuestra estructura.

Más adelante en la carta, Pauling reconoce que el contenido de agua de la molécula podría ser muy importante: «Argumentamos [...] a favor de la asignación de tres residuos de nucleótido [...] Sin embargo, si el espécimen de ácido nucleico razonablemente seco contenía alrededor del 30 por ciento de agua [...] solo habría dos residuos de esta longitud». Y concluye: «Creo que las fotografías de Wilkins podrían dirimir la cuestión de una forma definitiva».

Le he preguntado a Alex Rich si Pauling realmente creía que podía aferrarse a su modelo de la triple hélice, y que la doble hélice era incierta. La respuesta de Rich fue bastante categórica: «Por supuesto que Pauling sabía que la doble hélice era el modelo correcto», dijo. «Toda esa palabrería sobre si era incierto no era más que una bravata». El hecho es que Pauling llegó a Cambridge la primera semana de abril (la figura 17 lo muestra en 1953), y después de ver el modelo de alambre de Watson y Crick y la placa de rayos X de Franklin, y de escuchar la explicación de Crick, reconoció con elegancia que la estructura parecía ser correcta. Un par de días más tarde, Pauling y Bragg partieron para asistir a la Conferencia Solvay en Bruselas (Bélgica). En aquel congreso de los principales investigadores del mundo, Bragg primero anunció la doble hélice. Con gran estilo, Pauling admitió durante la discusión posterior: «Aunque solo hace dos meses²⁸⁰ que el profesor Corey y yo publicamos nuestra propuesta de estructura para el ácido nucleico, creo que debemos admitir que probablemente sea errónea».

Uno podría ciertamente decirme que no hay nada especialmente «genial» en el error de Pauling; al fin y al cabo, su modelo ponía fuera lo que iba dentro y tenía un número equivocado de cadenas. Pero fue el método de Pauling, su manera de pensar y su anterior e increíble éxito con las complejas moléculas de proteínas, lo que sirvió de inspiración y fue fuente de información para

Watson y Crick. En un breve artículo publicado el 21 de marzo de 1999, Watson escribió sobre Pauling: «El fracaso se cierce incómodamente²⁸¹ sobre la grandeza. Lo que importa ahora son sus perfecciones, no sus antiguas imperfecciones. Recuerdo sobre todo al Pauling de hace cincuenta años, cuando proclamó que detrás de la vida no había fuerzas vitales, solo enlaces químicos. Sin aquel mensaje, tal vez Crick y yo nunca habiéramos alcanzado el éxito».



Figura 17

El descubrimiento de la estructura del ADN abrió de par en par las puertas a un abanico inacabable de investigaciones que hasta la fecha culminaron en abril de 2004 con la finalización formal del Proyecto Genoma Humano, la descodificación del ADN completo de un humano (aunque el análisis de todos los datos se prolongará durante muchos años). A lo largo del camino se produjeron muchas sorpresas. Por ejemplo, antes del año 2000, los biólogos

creían que el genoma humano contenía unos cien mil genes codificadores de proteínas. Los hallazgos del Consorcio Internacional para la Secuenciación del Genoma Humano publicados en octubre de 2004 redujeron la estimación a menos de veinticinco mil, ¡no mucho más que el número de genes del simple nematodo *C. elegans*! Una tecnología de secuenciación más rápida y más barata ha ayudado recientemente a los científicos a esbozar una nueva imagen de los orígenes de los humanos. La imagen que se comienza a vislumbrar²⁸² gracias al análisis genético de la punta del dedo meñique de una niña de hace cuarenta mil años, es que los humanos modernos no emigraron simplemente de África, sino que probablemente se encontraron con al menos dos grupos de humanos más antiguos, y hoy extintos, y dejaron descendientes con ellos.

El descubrimiento de la estructura y función del ADN también ha arrojado luz sobre la evolución al clarificar la naturaleza de las variaciones hereditarias sobre las que actúa la selección natural. La proclamación de Pauling de que los procesos de la vida son la consecuencia de las leyes de la química y la física se hizo verificable a través de la comprensión de las fuerzas que modelan y pueden hacer que varíen los patrones de ADN. (La figura 18, una fotografía de algunos de los participantes de la Conferencia de Pasadena sobre la Estructura de las Proteínas que se celebró en septiembre de 1953, muestra a muchos de los protagonistas del descubrimiento de la hélice alfa y la doble hélice).

No podemos siquiera imaginar qué oportunidades nos ofrecerá en el futuro lejano nuestra comprensión del ADN y nuestra capacidad de modificar la molécula. Las posibilidades varían desde un alargamiento significativo de la esperanza de vida de los humanos hasta la creación de nuevas formas de vida. El descifrado de la estructura del ADN ya ha conducido a un mejor conocimiento de las bases genéticas de las enfermedades que ha revolucionado la búsqueda de tratamientos. La era del genoma ha permitido logros antes inimaginables en la ciencia forense. Por ejemplo, tras la muerte

en 2001 de cinco personas a causa de cartas envenenadas con ántrax, la Oficina Federal de Investigación de Estados Unidos (FBI) decidió secuenciar el genoma microbiano completo de la cepa utilizada en los ataques (5,2 millones de pares de bases). Aquel esfuerzo acabó conduciendo a los investigadores hasta un laboratorio del ejército como la fuente más probable de la cepa. Al mismo tiempo, tras desvelarse la estructura del ADN y de las proteínas, la cuestión del origen de la vida se ha convertido en una pregunta aún más fascinante y potencialmente con respuesta. Pero las indagaciones han penetrado en un nivel mucho más fundamental que el puramente biológico: ¿de dónde provienen las piezas fundamentales de la vida, esas moléculas que pueden llevar información y replicarse? Y del lado de la física, volviendo a unos orígenes aún más antiguos, ¿cómo apareció en el universo el átomo de hidrógeno que era crucial para el enlace de hidrógeno de Pauling? ¿Y qué decir de los elementos más pesados que son esenciales para la vida, como el carbono, el oxígeno, el nitrógeno y el fósforo?



Figura 18

El físico de origen ruso George Gamow participó en los primeros intentos por entender de qué modo las cuatro bases del ADN podían controlar la síntesis de proteínas a partir de aminoácidos. A Gamow le enseñaron una copia²⁸³ del artículo de Watson y Crick sobre las implicaciones genéticas de su modelo mientras estaba de visita en el Laboratorio de Radiación de Berkeley. Excitado, comenzó a pensar en él tan pronto como regresó a su departamento de la Universidad George Washington, y no tardó en enviar una carta a Watson y Crick. Comenzaba excusándose («Apreciados doctores Watson y Crick, soy un físico, no un biólogo») pero enseguida fue al grano: ¿sería posible resolver la relación entre las cuatro letras correspondientes a las bases del ADN y los veinte aminoácidos de las proteínas como un problema de puro criptoanálisis numérico? Aunque las soluciones matemáticas de Gamow al final resultaron ser erróneas, ayudaron a enmarcar las preguntas de la biología en el lenguaje de la información.

Unos cinco años antes, Gamow estaba implicado en la resolución de un problema todavía más fundamental: el origen cósmico del hidrógeno y el helio. Su solución fue realmente brillante. Sin embargo, no explicaba la existencia de todos los elementos más pesados que el helio. Esta formidable tarea recayó en otro astrofísico y cosmólogo: Fred Hoyle. De un lado, Hoyle se ocupó de la evolución del universo como un todo, y por otro lado, de la aparición de la vida en su interior. Fue a un tiempo uno de los científicos más distinguidos del siglo XX, y uno de los más controvertidos.

Capítulo 8

B de Big Bang

La filosofía que tan importante es para cada uno de nosotros no es una cuestión técnica; es nuestro sentido, más o menos torpe, de lo que honesta y profundamente significa la vida. Solo en parte nos viene de los libros; es nuestra forma individual de ver y sentir el empuje y la presión total del cosmos.

William James

El 28 de marzo de 1949, a las seis y media de la tarde, el astrofísico Fred Hoyle ofreció una de sus acreditadas conferencias radiofónicas en el espacio de la BBC *The Third Programme*, un programa cultural en el que participaron intelectuales de la talla del filósofo Bertrand Russell y el dramaturgo Samuel Beckett. En cierto momento, mientras intentaba dibujar los contrastes entre su propia teoría, la creación continua de materia en el universo, y la teoría contraria, que afirmaba que el universo había tenido un comienzo claro y definido, Hoyle expresó una opinión controvertida:

Llegamos así a la cuestión²⁸⁴ de contrastar las teorías previas frente las observaciones. Estas teorías se basaban en la hipótesis de que *toda la materia del universo se creó en una gran explosión [big bang] en un momento concreto del pasado remoto* [la cursiva es mía]. Pero ahora resulta que en uno u otro aspecto, todas esas teorías entran en conflicto con lo que requieren las observaciones.

Esta conferencia marca el nacimiento del término «*big bang*», que desde entonces ha quedado inextricablemente unido al acontecimiento inicial del

que brotó nuestro universo. En contra de la creencia popular, Hoyle no usó el término de forma peyorativa; solo intentaba crear una imagen mental para sus oyentes. Irónicamente, quien acuñó y popularizó el término *big bang* fue un científico que siempre se opuso a la idea en la que se basa este modelo. El término ha resistido incluso un referéndum público²⁸⁵. En 1993 la revista *Sky & Telescope* solicitó sugerencias de sus lectores para un nombre más adecuado, en un acto que generalmente se ha visto como un intento de corrección política de proporciones cósmicas. Pero cuando los tres jueces (entre ellos Carl Sagan, el célebre astrónomo y divulgador de la ciencia) revisaron las 13 099 sugerencias, no hallaron ninguna que mereciera ser el sustituto. El título de este capítulo («B de *Big Bang*») remeda el título de una serie de ciencia ficción de la televisión británica, *A de Andrómeda*, escrito por Hoyle y el productor de televisión John Elliot. Los siete episodios de la serie se emitieron en 1961, con la actriz Julie Christie en el papel protagonista.

Fred Hoyle nació el 24 de junio de 1915 en Gilstead, un pueblo cercano a la ciudad de Bingley, en West Yorkshire (Inglaterra)²⁸⁶. Su padre fue un comerciante de lana y tejidos que fue reclutado para el Cuerpo de Ametralladoras y enviado a Francia durante la primera guerra mundial. Su madre estudió música, y durante algún tiempo tocó el piano en un cine local, como acompañamiento para películas mudas. Fred Hoyle, que en un principio quería ser químico, estudió matemáticas en Cambridge y demostró tales dotes que en 1939 fue elegido miembro de St. John's College de Cambridge. En 1958 obtuvo la prestigiosa cátedra de Profesor Plumiano de Astronomía y Filosofía Experimental de Cambridge. Como curiosidad, George Darwin, el hijo de Charles Darwin, había ocupado esta cátedra entre 1883 y 1912.

Desde muy temprano, Hoyle dio signos de gustarle la independencia y, ocasionalmente, la disensión. Más tarde recordaría: «Entre los cinco y los nueve años estuve constantemente en guerra con el sistema educativo [...] Cuando me enteré por mi madre de que existía un lugar llamado colegio al que había que asistir tanto sí como no, un lugar en el que uno se veía

obligado a pensar sobre cuestiones prescritas por un "profesor", y no sobre las que uno mismo decidía, me quedé horrorizado²⁸⁷». Su desdén por las convenciones le acompañó hasta los años de universidad. En 1939 decidió renunciar²⁸⁸ a un título de doctor por el «pragmático motivo», en sus palabras, ¡de no tener que pagar más impuestos!

No es de extrañar que este pensador independiente, motivado por la curiosidad, madurase hasta convertirse en un científico brillante. Por sus contribuciones a la astrofísica y la cosmología, Hoyle probablemente fuese la figura más destacada durante al menos un cuarto de siglo, pero al mismo tiempo, nunca rehuyó la controversia. «Para conseguir algo realmente valioso²⁸⁹ en la investigación», escribió, «es necesario ir en contra de las opiniones de nuestros colegas. Para lograrlo sin convertirse en un chiflado se necesita un fino juicio, sobre todo en lo referente a cuestiones a largo plazo que no se pueden dirimir en poco tiempo». Pronto descubriremos que Hoyle siguió su propio consejo demasiado a rajatabla.

Aun sin contar con la segunda guerra mundial, 1939 fue un año crítico para Hoyle. Ocurrió que uno detrás de otro, sus dos directores de investigación dejaron Cambridge para ocupar puestos en otros lugares. Su tercer director fue al gran físico Paul Dirac, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, la revolucionaria teoría del micromundo subatómico. Tras la abundancia de ideas novedosas de la década de 1920, la ciencia de finales de los años 1930 palidecía en comparación. Hoyle escribió más tarde que un día de 1939 Dirac le había dicho: «En 1926 era posible²⁹⁰ que gente no excesivamente buena resolviera problemas importantes; hoy la gente que es realmente buena no puede encontrar problemas importantes que solucionar». Hoyle se tomó la advertencia al pie de la letra, abandonó la física nuclear teórica y dirigió sus intereses hacia las estrellas.

De los muchos logros de Hoyle, quiero centrarme solamente en unas pocas de sus contribuciones a un tema concreto: la astrofísica nuclear. El trabajo de Hoyle en esta área se ha convertido en uno de los principales pilares

sobre los que descansa nuestro actual conocimiento de las estrellas y de su evolución. A lo largo de su trayectoria, resolvió el misterio de cómo se forman en el universo los átomos de carbono, el sostén de la complejidad y la vida tal como las conocemos. Sin embargo, para valorar los logros de Hoyle en su justa medida, primero tenemos que entender el telón de fondo contra el cual produjo su obra maestra.

Prólogo a la historia de la materia

En una de las paredes de casi todas las aulas de ciencias de Estados Unidos se puede ver una tabla periódica de los elementos (figura 19). Del mismo modo que nuestro lenguaje está formado por palabras construidas a partir de las letras del alfabeto, toda la materia común del cosmos está compuesta por aquellos elementos. Son elementos aquellas sustancias que no pueden descomponerse o modificarse por medios químicos. Suele atribuirse a Dmitri Mendeléyev, un químico ruso ²⁹¹, el crédito por haberse percatado (a mediados del siglo XIX) de las regularidades que subyacen a la tabla periódica y por haber sabido predecir las características de elementos que todavía tenían que descubrirse para completar la tabla. En muchos sentidos, la tabla periódica es una representación simbólica del progreso realizado desde los famosos cuatro constituyente básicos de la materia para Empédocles y Platón: fuego, aire, agua y tierra.

Si se me permite un paréntesis fascinante, la reproducción más pequeña de la tabla periódica ²⁹² se grabó en 2011 en un pelo humano de Martyn Poliakoff, de la Universidad de Nottingham, en el Reino Unido. El grabado se realizó en el centro de nanotecnología de la universidad. (El pelo le fue devuelto a Poliakoff como regalo de cumpleaños).

La tabla periódica contiene en la actualidad 118 elementos (el último, el ununoctium, fue identificado en 2002), de los cuales 94 se encuentran de manera natural en la Tierra. Si se piensa en ello por un momento, se verá que este es un número bastante elevado de piezas básicas de construcción,

y, por consiguiente, era solo cuestión de tiempo que alguien se preguntase de dónde habían venido todos estos elementos. O, de otro modo, si estas entidades bastante complejas podían tener orígenes más simples.

Tabla Periódica de elementos

1A	2A	3B	4B	5B	6B	7B	8B	1B	2B	3A	4A	5A	6A	7A	8A		
1 H 1.00794 hidrógeno	2 He 4.002602 helio	3 Li 6.941 litio	4 Be 9.012182 berilio	5 B 10.811 boro	6 C 12.0107 carbono	7 N 14.0067 nitrógeno	8 O 15.9994 oxígeno	9 F 18.9984032 flúor	10 Ne 20.1797 neón	11 Na 22.98976928 sodio	12 Mg 24.30466 magnesio	13 Al 26.9815386 aluminio	14 Si 28.0855 silicio	15 P 30.973762 fosforo	16 S 32.065 azufre	17 Cl 35.453 cloro	18 Ar 39.948 argón
19 K 39.0983 potasio	20 Ca 40.078 calcio	21 Sc 44.955912 escandio	22 Ti 47.867 titanio	23 V 50.9415 vanadio	24 Cr 51.9961 cromo	25 Mn 54.938045 manganeso	26 Fe 55.845 hierro	27 Co 58.933195 cobalto	28 Ni 58.6934 níquel	29 Cu 63.546 cobre	30 Zn 65.38 zinc	31 Ga 69.723 galio	32 Ge 72.64 germanio	33 As 74.92160 arsénico	34 Se 78.96 selenio	35 Br 79.904 bromo	36 Kr 83.798 cripton
37 Rb 85.4678 rubidio	38 Sr 87.62 estroncio	39 Y 88.90585 itrio	40 Zr 91.224 zirconio	41 Nb 92.90638 niobio	42 Mo 95.96 molibdeno	43 Tc [98] tecnecio	44 Ru 101.07 rutenio	45 Rh 102.90550 rodio	46 Pd 106.42 paladio	47 Ag 107.8682 plata	48 Cd 112.411 cadmio	49 In 114.818 estaño	50 Sn 118.710 estaño	51 Sb 121.760 antimonio	52 Te 127.46 teluro	53 I 126.90447 yodo	54 Xe 131.29 xenón
55 Cs 132.90545196 cesio	56 Ba 137.327 bario	57-71 Lantánidos	72 Hf 178.49 hafnio	73 Ta 180.94790 tantalio	74 W 183.84 wolframio	75 Re 186.207 renio	76 Os 190.23 osmio	77 Ir 192.222 iridio	78 Pt 195.084 platino	79 Au 196.966569 oro	80 Hg 200.59 mercurio	81 Tl 204.3803 talio	82 Pb 207.2 plomo	83 Bi 208.98040 bismuto	84 Po [209] polonio	85 At [210] astato	86 Rn [222] radón
87 Fr [223] francio	88 Ra [226] radio	89-103 Actínidos	104 Rf [261] rutherfordio	105 Db [262] dubnio	106 Sg [263] seaborgio	107 Bh [264] bohrio	108 Hs [265] hassium	109 Mt [266] meitnerio	110 Ds [267] darmstadtio	111 Rg [268] roentgenio	112 Cn [269] copernicio	113 Nh [270] nihonio	114 Fl [271] florcio	115 Uup [272] unilencio	116 Lv [273] livermorio	117 Uus [274] ununseptio	118 Uuo [276] ununoctio
57 La 138.90547 lantano	58 Ce 140.116 cerio	59 Pr 140.90766 praseodimio	60 Nd 144.242 neodimio	61 Pm [145] prometio	62 Sm 150.36 samario	63 Eu 151.964 europio	64 Gd 157.25 gadolinio	65 Tb 158.92535 terbio	66 Dy 162.50 dysprosio	67 Ho 164.93032 holmio	68 Er 167.259 erbio	69 Tm 168.93421 tulio	70 Yb 173.054 ytterbio	71 Lu 174.9668 lutecio	72-103 Actínidos	104 No [259] nobelio	105 Lr [262] lawrencio

Figura 19

En realidad hubo alguien que se planteó estas preguntas antes aun de la publicación de la tabla periódica. En dos artículos publicados en 1815 y 1816, el químico inglés William Prout²⁹³ propuso la hipótesis de que los átomos de todos los elementos eran en realidad condensaciones de distintos números de átomos de hidrógeno. El astrofísico Arthur Eddington combinó la idea general de la hipótesis de Prout con algunos resultados experimentales sobre núcleos que había obtenido el físico Francis Aston y formuló su propia conjetura. Eddington propuso en 1920²⁹⁴ que cuatro átomos de hidrógeno podían de algún modo combinarse para formar un átomo de helio. La pequeña diferencia entre la masa total de cuatro átomos de hidrógeno y la masa de un átomo de helio supuestamente se liberaba en forma de energía, de acuerdo con la famosa equivalencia de Einstein entre masa y energía, $E = mc^2$ (« E » denota energía, « m » es masa y « c » es la velocidad de la luz). Eddington estimaba que de este modo el Sol podría brillar durante miles de millones de años convirtiendo tan solo una pequeña fracción de su masa de hidrógeno en helio. Menos conocido es el hecho de que el físico francés Jean-Baptiste Perrin²⁹⁵ expresó más o menos al mismo tiempo unas ideas muy parecidas. Unos pocos años más tarde, Eddington especuló además que las estrellas como el Sol podían ser «laboratorios» naturales en los que de algún modo, mediante reacciones nucleares, unos elementos se transformaban en otros. Cuando algunos físicos del Laboratorio Cavendish objetaron que la temperatura interna del Sol era insuficiente para que dos protones superaran su mutua repulsión electrostática, Eddington respondió con el famoso consejo de «pues a ver si encuentran un lugar más caliente²⁹⁶». La hipótesis de Eddington y Perrin señala el nacimiento del concepto de *nucleosíntesis* nuclear en la astrofísica: la idea de que al menos algunos elementos se pueden sintetizar en el ígneo interior de las estrellas. Como ya se habrá inferido de lo anterior, Eddington fue uno de los mayores defensores de la teoría de la relatividad de Einstein (sobre todo de la relatividad general). En

una ocasión, el físico Ludwick Silberstein²⁹⁷ se acercó a Eddington para decirle que la gente creía que en todo el mundo solo había tres científicos que entendieran la teoría de la relatividad general, y que Eddington era uno de ellos. Como este tardaba en responderle, Silberstein le animó diciendo: «No sea tan modesto», a lo que Eddington replicó: «Al contrario. Solo me estaba preguntando quién era el tercero». La figura 20 muestra a Eddington con Einstein en Cambridge.

Para continuar con la historia de la formación de los elementos, conviene que recordemos algunas de las propiedades básicas de los átomos. Lo que sigue es una brevísima puesta al día. Toda la materia común está compuesta por átomos, y todos los átomos tienen en su centro un núcleo (el radio atómico es más de 10 000 veces mayor que el radio nuclear), alrededor del cual se desplazan los electrones en nubes orbitales. El núcleo está constituido por protones y neutrones, que tienen una masa muy parecida (un neutrón es ligeramente más pesado que un protón), y cada uno de ellos tiene unas 1840 veces más masa que un electrón. Aunque confinados en el núcleo los neutrones son estables, un neutrón libre es inestable y con una vida media de unos quince minutos se desintegra en un protón, un electrón y una partícula prácticamente invisible, muy ligera y eléctricamente neutra llamada antineutrino. En los núcleos inestables, los neutrones pueden desintegrarse del mismo modo.

El átomo más simple y ligero que existe es el átomo de hidrógeno. Está formado por un núcleo que contiene un solo protón. Un único electrón da vueltas alrededor de este protón en órbitas cuya probabilidad puede calcularse usando la mecánica cuántica. El hidrógeno también es el elemento más abundante del universo, donde constituye alrededor del 74 por ciento de toda la materia común (la conocida como *bariónica*). La materia bariónica es la sustancia de la que están hechas las estrellas, los planetas y los seres humanos. Si nos movemos de izquierda a derecha por la tabla periódica

(figura 19), en cada paso el número de protones del núcleo aumenta en uno, y lo mismo el número de electrones en órbita.

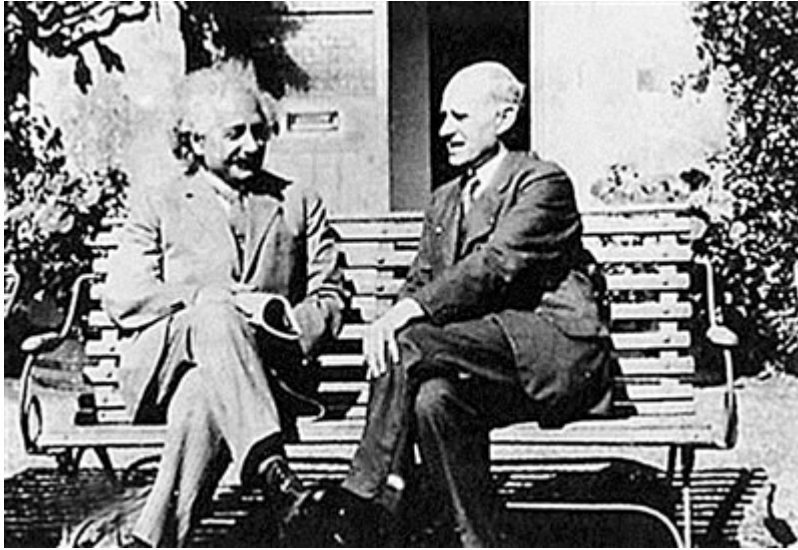


Figura 20

Como el número de protones es igual al número de electrones (y llevan cargas eléctricas opuestas y de igual magnitud), los átomos son eléctricamente neutros en su estado no alterado.

El elemento que sigue al hidrógeno en la tabla periódica es el helio, que tiene dos protones en su núcleo. Pero el núcleo de helio también contiene dos neutrones (que no tienen carga eléctrica). El helio es el segundo elemento más abundante: constituye alrededor del 24 por ciento de la materia común. Los átomos del mismo elemento químico tienen el mismo número de protones, y este se conoce como *número atómico* del elemento. El hidrógeno tiene el número 1, el helio es el 2, el hierro el 26 y el uranio el 92. El número total de protones y neutrones del núcleo se llama *masa atómica*. El hidrógeno tiene masa atómica 1; el helio, 4; el carbono (que tiene seis protones y seis neutrones), 12. Los núcleos del mismo elemento químico pueden tener distinto número de neutrones, y se conocen como *isótopos* de ese elemento. Por ejemplo, el neón (que tiene 10 protones) puede tener

isótopos con diez, once o doce neutrones en el núcleo. La notación común de los distintos isótopos es ^{20}Ne , ^{21}Ne y ^{22}Ne . De modo parecido, el hidrógeno (un protón, o ^1H) también tiene en la naturaleza un isótopo comúnmente conocido como deuterio (un protón y un neutrón en el núcleo, o ^2H) y un isótopo llamado tritio (un protón y dos neutrones, o ^3H).

Volviendo al problema central de la síntesis de los distintos elementos, los físicos de la primera mitad del siglo XX se enfrentaron a una serie de preguntas relacionadas con la tabla periódica. La primera y más importante es cómo se formaron todos esos elementos. Pero también por qué algunos elementos, como el oro y el uranio, son extraordinariamente raros (¡de ahí su precio!) mientras que otros, como el hierro o el oxígeno, son mucho más frecuentes. (El oxígeno es unas cien millones de veces más común que el oro). O, también, por qué las estrellas están compuestas mayoritariamente por hidrógeno y helio.

Desde su nacimiento, las ideas sobre el proceso de formación de los elementos han ido ligadas íntimamente a las ideas sobre las enormes *fuentes de energía* de las estrellas. Recuérdese que Helmholtz y Kelvin habían propuesto que la energía del Sol proviene de la lenta contracción y consiguiente liberación de energía gravitacional. Sin embargo, como Kelvin había demostrado claramente, esta reserva solo podía sustentar la radiación del Sol durante un tiempo limitado, no más de unas pocas decenas de millones de años. Este límite chocaba inquietantemente con los indicios geológicos y astrofísicos que apuntaban cada vez con mayor precisión a edades de miles de millones de años tanto para la Tierra como para el Sol. Eddington era plenamente consciente de esta evidente discrepancia. En la conferencia que pronunció durante el congreso de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia en Cardiff (Gales) el 24 de agosto de 1920, hizo esta profética declaración:

Solo la inercia de la tradición mantiene viva la hipótesis de la contracción; o, más que viva, como un cadáver sin enterrar. Pero si decidimos dar sepultura

al cuerpo, reconozcamos con franqueza la posición en que quedamos. Una estrella está alimentándose de alguna vasta reserva de energía por medios que desconocemos. *Esta reserva difícilmente puede ser otra que la energía subatómica, la cual, como se sabe, existe en abundancia en toda la materia* [la cursiva es mía]²⁹⁸.

Pese a su entusiasmo con la idea de que las estrellas pudieran extraer su energía de la fusión de cuatro núcleos de hidrógeno para formar un núcleo de helio, Eddington no disponía de un mecanismo específico mediante el cual pudiera llevarse a cabo este proceso. En concreto, había que resolver el problema de la repulsión electrostática mutua, antes comentado. El obstáculo es el siguiente: dos protones (los núcleos de dos átomos de hidrógeno) se repelen entre sí electrostáticamente porque ambos poseen carga eléctrica positiva. Esta fuerza de Coulomb (por el físico francés Charles-Augustin de Coulomb) tiene un largo alcance, y por eso es la fuerza dominante entre protones a distancias superiores al tamaño del núcleo atómico. Sin embargo, dentro del núcleo le puede la potente atracción de la fuerza nuclear²⁹⁹, que vence a la repulsión eléctrica. En consecuencia, para que los protones del núcleo de las estrellas puedan fusionarse tal como imaginaba Eddington, necesitan tener energías cinéticas lo bastante elevadas asociadas a sus movimientos al azar como para superar la «barrera de Coulomb» y poder interactuar a través de la atracción de la fuerza nuclear. La única pega de la hipótesis de Eddington era que la temperatura calculada para el centro del Sol no era lo bastante alta como para impartir a los protones la energía necesaria. En la física clásica, eso habría sido una sentencia de muerte para su teoría; las partículas con una energía insuficiente para superar una barrera no pueden saltarla. Por suerte, la mecánica cuántica, que es la teoría que describe el comportamiento de las partículas subatómicas y la luz, vino al rescate. En la mecánica cuántica, las partículas se comportan como ondas, y todos los procesos son inherentemente probabilísticos. Las ondas no ocupan un lugar preciso como

las partículas, sino que están dispersas. Del mismo modo que cuando una ola del mar choca contra un rompeolas, una parte puede saltar al otro lado, existe cierta probabilidad, aunque pequeña, de que unos protones con energía insuficiente para superar la barrera de Coulomb puedan, no obstante, interactuar. Usando este efecto de «túnel» de la mecánica cuántica para atravesar barreras³⁰⁰, el físico George Gamow y, de manera independiente, los equipos de Robert Atkinson y Fritz Houtermans, por un lado, y Edward Condon y Ronald Gurney, por otro, demostraron a finales de los años 1920 que en las condiciones dominantes en el interior de las estrellas, los protones podían fusionarse.

Los físicos Carl Friedrich von Weizsäcker, en Alemania, y Hans Bethe y Charles Critchfield, en Estados Unidos, fueron los primeros en elaborar la red de reacciones nucleares precisas por la que cuatro núcleos de hidrógeno se pueden unir para formar un núcleo de helio. En un extraordinario artículo³⁰¹ publicado en 1939, Bethe discute dos vías posibles con producción de energía por medio de las cuales el hidrógeno se puede convertir en helio. En una de ellas, la conocida como cadena protón-protón (p-p), primero se combinan dos protones formando deuterio, el isótopo de hidrógeno con un protón y un neutrón en el núcleo; luego la captura de un nuevo protón transforma el deuterio en un isótopo de helio³⁰². El segundo mecanismo, conocido como ciclo de carbono-nitrógeno (CN), es una reacción cíclica en la que actúan como catalizadores núcleos de carbono y nitrógeno. El resultado neto sigue siendo la fusión de cuatro protones para formar un núcleo de helio, acompañada de la liberación de energía. Aunque al principio Bethe pensó que el ciclo CN era el principal modo por el que el Sol producía energía, experimentos realizados en el Laboratorio Kellogg de Radiación, en Caltech, demostraron más tarde que la cadena p-p era la principal responsable de alimentar al Sol, y que el ciclo CN solo comenzaba a dominar la producción de energía en estrellas más masivas.

Como ya se habrá observado, y como su nombre indica, el ciclo CN requiere la presencia de átomos de carbono y nitrógeno como agentes catalizadores. Pero la teoría de Bethe no llegaba a demostrar de qué modo se formaban esos átomos de carbono y nitrógeno. Bethe tuvo en cuenta la posibilidad de que el carbono se sintetizase por la fusión de tres átomos de helio. (Un núcleo de helio tiene dos protones y uno de neutrones). Sin embargo, tras finalizar sus cálculos, afirmó: «No hay manera de que puedan³⁰³ producirse permanentemente en el interior de las estrellas núcleos más pesados que el helio en las condiciones actuales», es decir, con densidades y temperaturas como las que se encuentran en la mayoría de las estrellas del tipo de nuestro Sol. Bethe concluyó: «Debemos suponer que los elementos más pesados [que el helio] se fabricaron *antes* de que las estrellas alcanzaran su actual estado de temperatura y densidad».

La declaración de Bethe planteaba un gran enigma, pues astrónomos y geólogos de la época habían llegado a la conclusión de que los distintos elementos químicos tenían que tener, en su mayor parte, un origen común. En particular, el hecho de que átomos como el carbono, el nitrógeno, el oxígeno y el hierro parecieran tener aproximadamente las mismas abundancias relativas en toda la galaxia de la Vía Láctea apuntaba claramente a la existencia de un proceso universal de formación. En consecuencia, si aceptaban la sentencia de Bethe, los físicos tenían que pensar en alguna síntesis común que hubiera podido actuar antes de que las estrellas actuales alcanzasen su equilibrio.

Justo cuando la teoría parecía dirigirse a una vía muerta, el versátil George Gamow (a quien sus colegas conocían como Geo) y su estudiante de doctorado Ralph Alpher propusieron lo que parecía una idea brillante: Tal vez los elementos se habían formado en el extremadamente caliente y denso estado inicial del universo, el *big bang*. La idea era genial en su claridad. En la densa bola de fuego de los orígenes, según argumentaban Gamow y Alpher, la materia consistía en un gas de neutrones muy comprimido.

Llamaban a esta sustancia primordial *ylem* (del griego clásico *yle* y el latín medieval *hylem*, que significan «materias»). A medida que estos neutrones comenzaron a desintegrarse en protones y electrones, en teoría se podían ir produciendo todos los núcleos más pesados mediante la sucesiva captura de un nuevo neutrón del mar de neutrones (y la posterior desintegración de esos neutrones en protones, electrones y antineutrinos). Los átomos iban escalando de este modo la tabla periódica, subiendo un escalón con cada sucesiva captura de un neutrón. Se suponía que el proceso entero estaba controlado por la probabilidad de que un núcleo determinado capturase otro neutrón, pero también por la expansión del universo (descubierta a finales de los años 1920, como veremos en el siguiente capítulo). La expansión cósmica determinaba la reducción global de la densidad de la materia con el tiempo, y, por consiguiente, la disminución progresiva de las tasas de las reacciones nucleares. Alpher llevó a cabo la mayoría de los cálculos, y los resultados se publicaron en el número³⁰⁴ del 1 de abril de 1948 de *Physical Review*. (El día de las bromas del primero de abril era la fecha favorita de Gamow para publicar). El siempre caprichoso Geo cayó en la cuenta de que si podía añadir a Hans Bethe (que no tenía nada que ver con los cálculos) como coautor del artículo, los tres nombres (Alpher, Bethe, Gamow) se corresponderían con las tres primeras letras del alfabeto: alfa, beta y gamma. Bethe aceptó que se incluyera su nombre, y hoy aquella publicación se suele conocer como el «artículo alfabético»³⁰⁵. Más tarde aquel mismo año, Alpher colaboró con el físico Robert Herman para predecir la temperatura de la radiación residual del *big bang*, hoy conocida como *radiación del fondo cósmico de microondas*. (Geo, que nunca abandonó su sempiterno interés por los juegos de palabras, bromeó en su libro *La creación del universo* que Robert Herman «obstinadamente se niega a cambiar su nombre³⁰⁶ por Delter» para que se corresponda con delta, la cuarta letra del alfabeto griego).

Por ingenioso que fuera el planteamiento de Alpher y Gamow, pronto se vio claro que si bien la nucleosíntesis en el calor del *big bang* sin duda podía explicar las abundancias relativas de los isótopos de hidrógeno y helio (y algo de litio y trazas de berilio y boro), tropezaba con obstáculos insuperables a la hora de producir elementos más pesados. El reto no es difícil de entender si utilizamos una simple metáfora mecánica: es muy difícil subir una escalera cuando faltan algunos de los peldaños. *En la naturaleza, no hay isótopos estables con masa atómica de 5 o 8*. Es decir, el helio solo tiene isótopos estables con masas atómicas de 3 y 4; el litio tiene isótopos estables con masas atómicas de 6 y 7; el único isótopo realmente estable del berilio tiene una masa atómica de 9 (la masa atómica 10 es inestable aunque tiene una vida media larga), y así sucesivamente. Faltan las masas atómicas 5 y 8. En consecuencia, el helio (masa atómica, 4) no puede capturar otro neutrón para producir un núcleo que tenga una vida media suficiente para dar continuidad al esquema de la captura de neutrones. El litio tiene una dificultad parecida a causa del vacío para la masa atómica 8. Así pues, los agujeros en las masas frustraron el progreso por la vía que habían abierto Gamow y Alpher. Incluso el gran físico Enrico Fermi³⁰⁷, que examinó el problema con cierto detenimiento con un colaborador, llegó decepcionado a la conclusión de que la síntesis en el *big bang* era «incapaz de explicar el modo en que se han formado los elementos».

La conclusión de Fermi de que el carbono y los elementos más pesados no se podían haber producido en el *big bang*, unida a la declaración de Bethe de que estos elementos no se podían haber producido en estrellas como el Sol, crearon un desconcertante misterio: ¿dónde y cómo se sintetizaron los elementos pesados? Aquí es donde Fred Hoyle entró en escena.

Y dijo Dios: Sea Hoyle

A finales del otoño de 1944, el trabajo de Hoyle con el radar naval durante la guerra le llevo a Estados Unidos, donde aprovechó la oportunidad para

conocer a uno de los astrónomos más influyentes de la época, Walter Baade, en el Observatorio de Monte Wilson de California. Por aquel entonces, este observatorio poseía el telescopio más grande del mundo. De Baade, Hoyle aprendió lo extraordinariamente densos y calientes que pueden llegar a ser los núcleos de las estrellas masivas durante los últimos estadios de su vida. Al examinar aquellas condiciones extremas, cayó en la cuenta de que a temperaturas cercanas a los mil millones de grados, los protones y los núcleos de helio podían penetrar fácilmente las barreras de Coulomb de otros núcleos, lo que tenía como consecuencia una frecuencia tan alta de reacciones nucleares e intercambios en todos los sentidos que el conjunto entero de partículas podía alcanzar un estado conocido como *equilibrio estadístico*.

En un equilibrio nuclear estadístico, aunque se siguen produciendo reacciones nucleares, cada reacción y su inversa se producen con la misma tasa, de manera que no se produce ningún cambio neto en las abundancias de los elementos. En consecuencia, pensó Hoyle, podía utilizar los potentes métodos de la rama de la física conocida como mecánica estadística para estimar las abundancias relativas de los diversos elementos químicos. Sin embargo, para llevar a cabo realmente los cálculos, necesitaba saber las masas de todos los núcleos implicados, y esa información no estaba disponible para él durante los años de la guerra. Hoyle tuvo que esperar hasta la primavera de 1945 para obtener una tabla de las masas de manos del físico nuclear Otto Frisch. El resultado de los cálculos que realizó fue un artículo publicado en 1946 que hizo época³⁰⁸, en el que Hoyle delineaba el marco de una teoría de la formación de los elementos, del carbono hacia arriba, en el interior de las estrellas. La idea era alucinante: el carbono, el oxígeno y el hierro no habían existido siempre (en el sentido de haberse formado en el *big bang*), sino que estos átomos, todos los cuales son esenciales para la vida, se forjaron en el interior de los hornos nucleares de estrellas. Pensemos en esto por un momento: los átomos individuales que

actualmente forman las dos hebras de nuestro ADN se podrían haber originado hace miles de millones de años en el núcleo de distintas estrellas. Nuestro sistema solar al completo se constituyó hace unos 4500 millones de años a partir de una mezcla de ingredientes cocidos en el interior de generaciones anteriores de estrellas. La astrónoma Margaret Burbidge, que habría de colaborar con Hoyle una década más tarde, ofreció una maravillosa descripción de su experiencia de escuchar a Hoyle en una reunión de la Real Sociedad Astronómica (RAS)³⁰⁹ en 1946: «Me senté en el auditorio de la RAS llena de asombro, experimentando ese maravilloso sentimiento de que se levanta un velo de ignorancia a medida que una luz brillante ilumina un gran descubrimiento».

Al analizar las consecuencias de su embrionaria teoría, a Hoyle le complació descubrir un marcado pico en las abundancias de los elementos que rodean al hierro en la tabla periódica, tal como parecían indicar las observaciones. Esta coherencia con el «pico de hierro», como habría de conocerse, le indicaba a Hoyle que debía andar por el buen camino. Sin embargo, aquellos peldaños que faltaban en la escalera (la ausencia de núcleos estables con masas atómicas de 5 y 8) seguía entorpeciendo cualquier intento de construir una red detallada (y no un simple esqueleto) de reacciones nucleares que produjera todos los elementos.

Para esquivar el problema de los agujeros de masa, Hoyle decidió en 1949 volver a examinar la posibilidad (anteriormente abortada por Bethe) de fusionar tres núcleos de helio para crear el núcleo de carbono, y asignó este problema a uno de sus estudiantes de doctorado. Como los núcleos de helio también se conocen como partículas alfa, la reacción se suele conocer como proceso *triple alfa* (3 α). Pero resulta que aquel estudiante decidió abandonar³¹⁰ sus estudios de doctorado antes de completarlos (fue el único estudiante de Hoyle que lo hizo), pero olvidó cancelar su matrícula formal. Las reglas de la etiqueta académica establecidas para tales casos por la Universidad de Cambridge eran claras: Hoyle no tenía permiso para tocar

quiera aquel problema hasta que el estudiante o un investigador independiente publicase los resultados. Al final, dos astrofísicos publicaron los resultados, aunque el trabajo de uno de ellos pasó casi desapercibido.

El astrónomo estonio-irlandés Ernst Öpik propuso en 1951³¹¹ que en los núcleos en contracción de las estrellas evolucionadas (las propias estrellas se expanden hasta convertirse en gigantes rojas), la temperatura podía alcanzar varios cientos de millones de grados. A esas temperaturas, argumentaba Öpik, la mayor parte del helio se fusionaría formando carbono. Pero como el artículo de Öpik se publicó en la relativamente poco conocida *Proceedings of the Royal Irish Academy*, no fueron muchos los astrónomos que llegaron a enterarse.

El astrofísico Edwin Salpeter, que entonces comenzaba su carrera en la Universidad de Cornell, tampoco se había enterado. En el verano de 1951, Salpeter fue invitado a visitar el Laboratorio Kellogg de Radiación, en Caltech, donde el entusiasta astrofísico nuclear Willy Fowler y su grupo estaban profundamente comprometidos en el estudio de las reacciones nucleares que se consideraban importantes para los astrofísicos. Partiendo de la misma idea que Öpik, Salpeter examinó el proceso triple alfa³¹² en el ardiente infierno del núcleo de las gigantes rojas, justamente el problema que había abandonado el estudiante de doctorado de Hoyle. Salpeter reconoció de inmediato que difícilmente se podía esperar que tres núcleos de helio chocasen simultáneamente. Era más probable que dos de ellos quedasen unidos el tiempo suficiente para ser golpeados por un tercero. Salpeter enseguida se dio cuenta de que tal vez el carbono se producía mediante un proceso de baja probabilidad en dos pasos. En el primer paso, dos partículas alfas se combinaban formando un isótopo de berilio altamente inestable (^8Be), mientras que en el segundo, el berilio capturaba una tercera partícula alfa, formando un átomo de carbono. Pero todavía quedaba un problema grave: los datos experimentales mostraban que este isótopo particular del berilio se desintegraba de nuevo en dos partículas alfa con una

fugacísima vida media de tan solo unos 10^{-16} segundos (0,00... 1 en la posición dieciséis). La cuestión era si a una temperatura de más de cien millones de grados Kelvin, la tasa de la reacción podía llegar a ser tan alta que algunos de estos núcleos efímeros de berilio se pudieran fusionar con un tercer núcleo de helio antes de desintegrarse.

Al leer el artículo de Salpeter, la primera reacción de Hoyle fue de rabia consigo mismo por haber permitido que un cálculo tan importante se le colase entre los dedos a causa del contratiempo con el estudiante de doctorado. Sin embargo, tras examinar con detenimiento la red entera de reacciones nucleares, Hoyle estimó que bajo las suposiciones de Salpeter, todo el carbono se transformaría en oxígeno casi a medida que se fuera produciendo, al fusionarse con un nuevo núcleo de helio. Unos treinta años más tarde describió el momento en que comprendió esto: «Mala suerte para el viejo Ed³¹³, pensé». (Ed Salpeter era, en realidad, nueve años más joven que Hoyle). Pero ¿auguraba esto el fracaso de todo el esquema? Este era precisamente el tipo de situaciones en las que Hoyle ponía de manifiesto su increíble intuición física y la claridad de su pensamiento. Comenzó con lo obvio: «Tiene que haber alguna manera de sintetizar ^{12}C ». A fin de cuentas, el carbono no solo era relativamente abundante en el universo, sino crucial para la vida. Tras evaluar todas las reacciones potenciales en su cabeza, Hoyle llegó a la conclusión de que «Nada era mejor que 3α ». Entonces, ¿cómo se podía impedir que el carbono se perdiera hacia el oxígeno? En la mente de Hoyle, solo había una manera: « *3α tenía que ir mucho más rápido³¹⁴ de lo que se había calculado [la cursiva es mía]*». En otras palabras, el berilio y el helio tenían que poder fusionarse con tanta facilidad y tan deprisa que la tasa de producción de carbono fuese mucho mayor que la tasa de destrucción. Pero ¿qué podía acelerar sustancialmente la tasa de síntesis de carbono? Los físicos nucleares sabían de una cosa: un «estado resonante» en el núcleo de carbono. Los estados resonantes son valores de la energía a la cual la probabilidad de una reacción alcanza un pico. Hoyle

comprendió que si el núcleo de carbono tuviese un nivel de energía que concordase perfectamente con la energía equivalente de las masas combinadas del núcleo de berilio y una partícula alfa (más su energía cinética de movimiento), entonces la tasa de la fusión de berilio con una alfa aumentaría considerablemente. Es decir, la probabilidad de que el núcleo inestable de berilio absorbiera otro núcleo de helio (partícula alfa) para formar carbono se vería muy incrementada. Pero Hoyle no se limitó a señalar que una resonancia podía ser útil, sino que calculó *con precisión* el nivel de energía del núcleo de carbono necesario para obtener el efecto deseado. Los físicos nucleares miden las energías de los núcleos en unas unidades llamadas MeV (un MeV es un millón de electronvoltios). Hoyle calculó que para que la producción de carbono³¹⁵ concordase con la abundancia cósmica observada, se necesitaba un estado resonante en el ^{12}C de unos 7,68 MeV por encima del nivel más bajo de energía (el estado fundamental). Además, usando la simetría conocida de los núcleos de ^8Be y ^4He , predijo las propiedades mecánicocuánticas de este estado resonante.

Todo esto era impresionante, pero había un «pequeño» problema: ¿no se conocía ese estado! La mera idea de que Hoyle utilizase observaciones astrofísicas generales para realizar una predicción extremadamente precisa de física nuclear (mucho más precisa, de hecho, de lo que podía calcularse desde la física nuclear) era poco menos que ridícula, pero a Hoyle le sobraba desparpajo.

Todo esto ocurría en enero de 1953, mientras Hoyle pasaba un sabático de unos cuantos meses en Caltech. Armado con esta nueva predicción de un nivel de energía desconocido para el núcleo de carbono, Hoyle se fue derecho a la oficina de Willy Fowler en el Laboratorio Kellogg para ver si este y su grupo estarían dispuestos a realizar experimentos para verificar la predicción. Lo que ocurrió en aquella reunión³¹⁶ ya es leyenda. Fowler recordaría: «Allí estaba aquel hombre pequeño y gracioso que creía que debíamos parar todo el importante trabajo que teníamos entre manos para

buscar aquel estado, y nosotros más o menos nos lo quitamos de encima. Déjenos en paz, joven, no nos moleste³¹⁷».

El propio Hoyle recordaría la reunión bajo una luz más positiva:

Para mi sorpresa, Willy no se rio cuando le expliqué la dificultad. No consigo recordar si convocó allí y entonces al clan de Kellogg [el grupo de físicos nucleares que incluía, entre otros, a Ward Whaling, William Wenzel, Noel Dunbar, Charles Barnes y Ralph Pixley], o si fue unas horas después, o al cabo de uno o dos días... Fue entonces cuando el consenso general decidió que debería realizarse un nuevo experimento³¹⁸.

En una entrevista realizada en 2001, ni Ward Whaling ni Noel Dunbar recordaban los detalles concretos de la reunión, pero Charles Barnes recordaba que apenas se cabía en el despacho más bien pequeño de Willy y que «a medida que Fred presentaba sus ideas, estaba claro que los asistentes eran visiblemente escépticos. Incluso Willy parecía ser algo escéptico». Pasara lo que pasase en aquella reunión, el resultado neto fue que el «clan de Kellogg» acordó llevar a cabo el experimento, y se decidió que Ward Whaling y sus colaboradores³¹⁹ eran el grupo que tenía el dispositivo experimental más adecuado para realizar las mediciones necesarias.

Whaling, Dunbar y sus colaboradores decidieron abordar el problema bombardeando núcleos de nitrógeno (^{14}N) con deuterio (^2H). Esta reacción nuclear produce núcleos de carbono (^{12}C) y partículas alfa (^4He). Examinando meticulosamente la energía de las partículas alfa emitidas (y recordando que la energía total se conserva), podían detectar no solo partículas que salían con alta energía (y que, por tanto, dejaban el carbono en su estado fundamental de baja energía), sino también partículas que emergían con una energía menor, y que indicaban que alguna energía se había quedado en el núcleo de carbono. Los resultados eran claros. A las dos semanas, el grupo ya había encontrado una resonancia en el carbono a 7,68 MeV (con un error posible de 0,03 MeV), ¡una concordancia increíble con la

predicción de Hoyle! En el artículo de poco más de una página³²⁰ en el que describieron los resultados, los físicos nucleares comenzaron con una observación: «Hoyle explica la formación original de los elementos más pesados que el helio por este proceso» (fusión de berilio y helio). Y acaban con un reconocimiento: «Estamos en deuda con el profesor Hoyle por hacernos notar la significación astrofísica de este nivel».

A pesar de su espectacular éxito de predicción³²¹, Hoyle se dio cuenta de que no era momento de dormirse en los laureles. Para que el carbono sobreviviera, los núcleos tenían que obedecer otro importante requisito: el carbono tenía que ser incapaz de capturar rápidamente una cuarta partícula alfa que lo transformaría en oxígeno. En otras palabras, había que estar seguro de que no existía ningún estado resonante en el núcleo de oxígeno que acelerase la tasa de reacción del carbono con una partícula alfa. Para completar su triunfo con la teoría de la producción de carbono, Hoyle demostró que esa reacción no se produce: la energía del nivel respectivo en el oxígeno es inferior en aproximadamente un 1 por ciento al valor que la habría hecho resonante.

Uno podría haber pensado que con tal bombazo entre sus manos, Hoyle correría a anunciarlo al mundo. En realidad, pasó más de medio año³²² desde la confirmación de su predicción hasta que Hoyle lo hizo público con brevedad en un congreso de la Sociedad Americana de Física en Albuquerque. Incluso en años posteriores, Hoyle nunca le dio demasiada importancia a aquel notable logro. En 1986 comentó:

En cierto sentido, aquello no fue más que un pequeño detalle. Pero como los físicos lo vieron como una predicción insólita y de éxito, tuvo un efecto desproporcionado sobre su conversión de la visión que entonces sostenían de que todos los elementos se habían sintetizado en los primeros momentos de un universo caliente, a la visión más mundana de que los elementos se sintetizan en las estrellas³²³.

Otros no pensaron que esto fuese «un pequeño detalle». Cuando el bullicioso George Gamow decidió resumir cómo veía el papel de Hoyle en la teoría de la formación de los elementos, lo hizo con un ingenioso relato que tituló «Nuevo Génesis»:

En el principio creó Dios la radiación y el ylem. Y el ylem estaba sin forma y sin número, y los nucleones corrían enloquecidos sobre la faz del abismo. Y dijo Dios: Sea la masa dos; y fue la masa dos. Y vio Dios el deuterio y vio que era bueno. Y dijo Dios: Sea la masa tres. Y vio Dios el tritio y el tralfio [el mote que daba Gamow al isótopo de helio ^3He] y vio que eran buenos. Y siguió Dios llamando un número tras otro hasta que llegó a los elementos transuránicos. Pero cuando miró Su obra, vio que no era buena. Con la excitación de la cuenta, olvidó llamar a la masa cinco, y así, de manera natural, no podían formarse elementos más pesados. Dios quedó muy decepcionado, y en un principio quiso contraer de nuevo el universo y comenzar todo desde el inicio. Pero eso habría sido demasiado fácil. Y así, siendo omnipotente, Dios decidió corregir Su error de una manera imposible. Y dijo Dios: Sea Hoyle. Y fue Hoyle. Y Dios miró a Hoyle [...] y le dijo que hiciera los elementos pesados como le pluguere. Y Hoyle decidió hacer los elementos pesados en las estrellas, y esparcirlos con las explosiones de las supernovas. Pero al hacerlo tenía que obtener la misma curva de abundancia que hubiera resultado de la nucleosíntesis en el ylem, si Dios no hubiese olvidado llamar a la masa cinco. Y así, con la ayuda de Dios, hizo Hoyle elementos pesados, pero de tan complicado modo que hoy ni Hoyle, ni Dios ni nadie puede averiguar exactamente cómo fueron hechos³²⁴.

Nótese, por cierto, que de acuerdo con este «Nuevo Génesis», ¡hasta Dios cometió un error genial!

La Real Academia de las Ciencias de Suecia tampoco pensó que la predicción de Hoyle fuese un detalle menor. En 1997 decidió conceder el prestigioso premio Crafoord (otorgado en disciplinas que complementan a aquellas en las que se concede el premio Nobel) a Hoyle y Salpeter «por su contribución

pionera al estudio de procesos nucleares en estrellas y de la evolución estelar». Al anunciar el premio, la academia observó: «Tal vez su [de Hoyle] contribución más importante dentro de este campo sea el artículo en el que demostró que la existencia de carbono en la naturaleza implicaba la existencia de cierto estado excitado en los núcleos de carbono por encima del estado fundamental. Esta predicción fue más tarde verificada experimentalmente³²⁵».

Hoyle siguió a su predicción del nivel del carbono con un artículo en el que sentaba las bases de la teoría de la nucleosíntesis estelar: la idea de que la mayoría de los elementos químicos y sus isótopos se sintetizaron a partir de hidrógeno y helio por medio de reacciones nucleares en el interior de estrellas masivas. En este artículo, publicado en 1954³²⁶, Hoyle explicó de qué modo las abundancias de los elementos pesados que observamos en la actualidad son el resultado directo de la *evolución estelar*. Las estrellas pasan la vida en continua lucha con la gravedad. En ausencia de una fuerza opuesta, la gravedad llevaría al colapso de las estrellas hacia su centro. Al «encender» reacciones químicas en su núcleo, las estrellas crean temperaturas muy elevadas, y las altas presiones asociadas sostienen a las estrellas en contra de su propio peso. Hoyle describió de qué manera, una vez consumido el combustible del núcleo (primero el hidrógeno se fusiona en helio, luego el helio en carbono, luego el carbono en oxígeno y así sucesivamente), la contracción gravitatoria hace que la temperatura del núcleo aumente hasta la «ignición» de la siguiente reacción nuclear. De este modo, razonaba Hoyle, en cada episodio de quema del núcleo, se sintetizaban nuevos elementos hasta llegar al hierro. Como en cada paso el núcleo es de menor tamaño que el anterior, la estrella desarrolla una estructura como la de una cebolla, en la que cada capa está compuesta del principal producto, las «cenizas», si así se prefiere, de la reacción nuclear precedente (figura 21). Como el hierro es el núcleo más estable, en el momento en que se forma un núcleo de hierro ya no queda más energía

disponible para la fusión de núcleos en otros más pesados. Sin una fuente de calor interno para combatir la gravedad, el núcleo de la estrella se colapsa, desencadenando una espectacular explosión. Estas explosiones de supernova expulsan con fuerza todos los elementos forjados hacia el espacio interestelar, donde enriquecen el gas a partir del cual se formarán generaciones posteriores de estrellas y planetas. Las temperaturas alcanzadas durante las explosiones son tan elevadas que se forman elementos más pesados que el hierro por medio de los neutrones que bombardean el material estelar.

Estructura interna de una estrella pre-supernova



Figura 21

El escenario planteado por Hoyle sigue siendo aún hoy la imagen que a grandes trazos representa la evolución de las estrellas. Sorprendentemente, este artículo clave para entender el desarrollo de la teoría de la nucleosíntesis estelar recibió en su tiempo relativamente poca atención, tal

vez porque se publicó en una revista nueva de astrofísica que aún era poco conocida en la comunidad de físicos nucleares.

Willy Fowler también quedó impresionado con la predicción de Hoyle del nivel resonante del carbono. De hecho, pasó su siguiente sabático en Cambridge para trabajar con Hoyle. La colaboración entre estos dos hombres y el equipo de astrónomos formado por el matrimonio de Geoffrey y Margaret Burbidge condujo a uno de los trabajos más conocidos de la astrofísica. El hito que marcó el artículo de 1957³²⁷ de Burbidge, Burbidge, Fowler y Hoyle (que suele conocerse como B²FH) ofrecía una teoría general de la síntesis de todos los elementos más pesados que el boro en las estrellas. En cierto modo, cuando Joni Mitchell cantaba «We are stardust» («Somos polvo de estrellas»), se limitaba a hacer una glosa concisa y lírica del artículo de Hoyle de 1954 y del B²FH. En apoyo de sus cálculos teóricos, los cuatro investigadores utilizaron amplios datos astronómicos sobre las abundancias de elementos pesados en estrellas y meteoritos y los combinaron con datos nucleares cruciales de experimentos y de la prueba de la bomba de hidrógeno en el Atolón Eniwetok en el Pacífico del 1 de noviembre de 1952. Describieron no menos de ocho procesos nucleares que sintetizan elementos en estrellas e identificaron los distintos ambientes astrofísicos en los que tienen lugar estos procesos. B²FH señaló correctamente que las observaciones que indican que «hay auténticas diferencias entre estrellas en su composición química» proporcionan un fuerte argumento a favor de la teoría de la nucleosíntesis estelar y en contra de que todos los elementos se hayan sintetizado en el *big bang*.

El artículo fue un genuino *tour de force*. Extenso, de 108 páginas, comenzaba con un toque romántico: dos citas contradictorias de Shakespeare sobre la cuestión de si las estrellas gobiernan el destino de la humanidad. La primera, de *El rey Lear*, dice: «Son las estrellas, las estrellas sobre nosotros rigen nuestro estado». A esta le siguen las palabras «pero quizá» precediendo a la segunda cita, de *Julio César*: «La culpa, querido

Bruto, no es de nuestras estrellas, sino de nosotros mismos». El artículo acababa con una llamada a los observadores para que hicieran todos los esfuerzos posibles para determinar las abundancias relativas de distintos isótopos en las estrellas, pues estas se podrían utilizar para poner a prueba los distintos esquemas de reacciones nucleares. La figura 22 muestra una fotografía tomada en el Instituto de Astronomía Teórica, en Cambridge, en 1967. Fred Hoyle está en el centro de la segunda fila, con Margaret Burbidge a su izquierda. Willy Fowler está en el centro de la primera fila, con Geoff Burbidge a su derecha.

Pero hay una cosa que el artículo B²FH no alcanzó a hacer. Por mucho que lo intentaron, Hoyle y sus colaboradores no consiguieron explicar la abundancia de los elementos más ligeros formándolos en el interior de las estrellas. El deuterio, el litio, el berilio y el boro eran demasiado frágiles: el calor del interior de las estrellas bastaba para que estos elementos quedasen destruidos por reacciones nucleares, en lugar de ser creados. El helio, el segundo elemento más abundante del cosmos, también resultó ser problemático. Esto puede resultar chocante, habida cuenta de que claramente las estrellas están formadas por helio. A fin de cuentas, ¿no es la fusión de cuatro hidrógenos para formar helio la principal fuente de energía de la mayoría de las estrellas como el Sol? La dificultad no estaba en la síntesis de helio en general, sino en la síntesis de cantidades suficientes de este elemento. Cálculos meticulosos habían mostrado que la nucleosíntesis en las estrellas predecía para el helio una abundancia cósmica de solo entre un 1 y un 4 por ciento, mientras que el valor observado era del 24 por ciento. Esto dejaba al *big bang* como la única fuente para los elementos ligeros, tal como habían sugerido Gamow y Alpher.

Como el lector ya habrá notado, la historia de la génesis de los elementos, la «historia de la materia», como la llamaba Hoyle, contiene una suerte de «compromiso cósmico». Gamow quería que todos los elementos se hubieran creado a los pocos minutos del *big bang* («en menos tiempo del necesario

para cocinar un plato de pato con patatas asadas»). Hoyle quería que todos los elementos se forjasen en el interior de estrellas durante el largo proceso de la evolución estelar. La naturaleza se inclinó por un toma y daca: los elementos ligeros como el deuterio, el helio y el litio se habían sintetizado en el *big bang*, pero todos los elementos más pesados, y en particular los esenciales para la vida, se cocieron en el interior de estrellas.



Figura 22

Hoyle tuvo la oportunidad de presentar su visión de la historia de la materia incluso en el Vaticano. Pocos meses antes de que el artículo B^2FH apareciera impreso, la Academia Pontificia de las Ciencias y el Observatorio Vaticano organizaron una reunión científica sobre «poblaciones estelares» en el Vaticano. Entre las dos docenas de invitados se encontraban algunos de los científicos más destacados de la astronomía y la astrofísica de su tiempo.

Tanto Fowler como Hoyle presentaron sus resultados³²⁸ sobre la síntesis de los elementos, y a Hoyle se le pidió además que hiciera un resumen de la reunión³²⁹ desde un punto de vista físico. El astrónomo holandés Jan Oort lo resumió desde una perspectiva astronómica. Durante la inauguración de la reunión, el 20 de mayo de 1957, los participantes conocieron al papa Pío XII. La figura 23 muestra a Hoyle dándole la mano al Papa. Willy Fowler (que en la foto nos da la espalda) se encuentra a la derecha de Hoyle, y Walter Baade (de cara a nosotros) está a la derecha del Papa.



Figura 23

El resto, como se suele decir, ya es historia. El programa experimental y teórico del Laboratorio Kellogg se convirtió, bajo el dinámico liderazgo de Willy Fowler, en el nodo de referencia para la astrofísica nuclear. Fowler recibió el premio Nobel de Física en 1983 (junto al astrofísico Subramanyan Chandrasekhar). Muchas personas, incluido el propio Fowler, creían que el premio se debería haber compartido con Hoyle³³⁰. En 2008, Geoffrey

Burbidge llegó incluso a decir: «La teoría de la nucleosíntesis estelar³³¹ debe atribuirse únicamente a Fred Hoyle, como demuestran sus artículos de 1946 y 1954 y el trabajo de colaboración de B²FH. Al escribir el B²FH, todos incorporamos los trabajos previos de Hoyle».

Entonces, ¿por qué no se le concedió el premio Nobel a Hoyle? Hay varias opiniones. Basándose en correspondencia privada, Geoff Burbidge llegó a la conclusión de que una de las razones principales de la exclusión fue la percepción (que insistía en que no estaba justificada) de que Fowler había sido el líder de B²FH. El propio Hoyle creía, al parecer, que se le había denegado el premio a causa de sus críticas al comité Nobel cuando este decidió conceder el premio por el descubrimiento de los púlsares a Antony Hewish y no a su estudiante de doctorado Jocelyn Bell, que fue quien en realidad había hecho el descubrimiento. Otros creían que la insistencia de Hoyle en ideas poco o nada ortodoxas sobre el *big bang*, que discutiremos a conciencia en el próximo capítulo, podrían haber tenido algo que ver con el hecho de que no recibiera el premio.

¿Cuáles eran esas ideas discrepantes? ¿Cuál era el contexto de la oposición de Hoyle al *big bang*?

Durante los años de la segunda guerra mundial, Hoyle acabó trabajando en el Centro de Señales del Almirantazgo en Witley, en el condado de Surrey. Allí trabó amistad con dos de sus compañeros más jóvenes, Hermann Bondi y Thomas «Tommy» Gold, ambos judíos de origen austriaco que habían escapado a Inglaterra tras el ascenso del nazismo. Irónicamente, antes de trabajar para la marina en Witley, el gobierno británico los había tenido encerrados como extranjeros enemigos a causa de sus raíces austriacas.

Así es como Gold describe su primera impresión de Hoyle: «Me pareció tan extraño; no parecía que escuchara nunca cuando la gente le hablaba, y su fuerte acento del norte de Inglaterra quedaba bastante fuera de lugar». Pero muy pronto cambió de opinión:

También descubrí que no había sabido interpretar la aparente actitud de Hoyle de no escuchar. De hecho, escuchaba con sumo cuidado y tenía una memoria extraordinariamente buena, como descubriría más tarde, pues a menudo recordaba mejor que yo mismo lo que yo le había dicho. Creo que se daba aquel aire no para decir «No estoy escuchando», sino más bien: «No trate de influir en mí; voy a formarme mi propia opinión³³²».

En los ratos libres que les dejaba el centro de investigación sobre radares de la marina, el trío formado por Hoyle, Bondi y Gold comenzó a discutir sobre astrofísica, y aquellas conversaciones de colaboración³³³ prosiguieron después de la guerra. En 1945 los tres regresaron a Cambridge, y hasta 1949 pasaron cada día varias horas juntos en la residencia de Bondi. Fue durante ese periodo cuando comenzaron a pensar en la *cosmología*, el estudio de todo el universo observable, tratado como una unidad. La Real Sociedad Astronómica le pidió a Bondi que escribiera lo que entonces se llamaba una nota, pero que en realidad era un artículo de revisión que agrupaba un extenso campo de conocimiento. Hoyle sugirió el tema de la cosmología³³⁴, pues desde su punto de vista «la cuestión ha estado en desuso durante mucho tiempo». Para ponerse al día sobre el tema, Bondi se sumergió en la literatura existente, que incluía un extenso artículo de 1933 titulado «Cosmología relativista», del físico Howard Percy Robertson. Hoyle, que ya había leído el artículo anteriormente, decidió releerlo con mayor atención. Ambos se dieron cuenta de que aquel ensayo casi enciclopédico hacía revisión, de forma más bien desapasionada, de diversas posibilidades de evolución cósmica sin ofrecer una opinión. Con su típico estilo inconformista, Hoyle inmediatamente comenzó a pensar: «¿De verdad ha lanzado [Robertson] una red lo bastante amplia? ¿Hay alguna otra posibilidad?». Al propio tiempo, Gold se estaba abriendo camino a ideas más filosóficas sobre el universo. Estas fueron las semillas de la teoría de la *cosmología del estado estacionario*, que fue propuesta en 1948. Como pronto descubriremos, la teoría fue un serio competidor del *big bang* durante más

de quince años antes de convertirse en el centro de una controversia a menudo agria.

Capítulo 9

¿Lo mismo para toda la eternidad?

Las ideas audaces, las expectativas injustificadas y el pensamiento especulativo son los únicos medios de que disponemos para interpretar la naturaleza [...] Quienes no están dispuestos a exponer sus ideas al riesgo de la refutación no participan en el juego científico.

Karl Popper

Los trabajos de Hoyle que más han perdurado son los que realizó en los ámbitos de la astrofísica y la evolución estelar. Sin embargo, la mayoría de quienes lo recuerdan por sus libros de divulgación y sus prominentes programas radiofónicos lo conocen como cosmólogo y como uno de los que concibieron la idea de un universo estacionario. Pero ¿qué significa realmente ser cosmólogo?

La pregunta «¿a qué distancia se encuentra el planeta más cercano a la Tierra?» no es una pregunta de la cosmología moderna. Incluso preguntas a una escala mucho mayor, como «¿cuál es la distancia de la Vía Láctea a la galaxia más cercana?», no se consideran preguntas de la cosmología. La cosmología se ocupa de las propiedades medias de nuestro universo observable, las que se obtienen cuando se promedia hasta el alcance de nuestros más potentes telescopios. Aunque las galaxias tienden a residir en pequeños grupos o en grandes cúmulos, ambos sostenidos por la fuerza de la gravedad, cuando muestreamos un volumen lo bastante grande, el universo se nos aparece homogéneo e isotrópico. Dicho de otro modo, no existe ninguna posición privilegiada en el universo, y todo tiene el mismo

aspecto en todas las direcciones. Estadísticamente hablando, cualquier cubo cósmico de quinientos millones de años luz de lado o mayor tendrá un aspecto muy parecido en cuanto a su contenido, con independencia del lugar que ocupe en el universo. (Un año luz es la distancia que recorre la luz en un año, unos 10 billones de kilómetros). Esta homogeneidad a gran escala se va haciendo más exacta a medida que aumentamos la escala, hasta llegar al «horizonte» de nuestros telescopios. La cosmología se ocupa precisamente de aquellas preguntas que nos darían la misma respuesta con independencia de la galaxia en la que estemos o de la dirección en que apuntemos el telescopio.

Einstein había introducido en 1917 la suposición de la homogeneidad e isotropía del universo a gran escala, pero esta conjetura simplificadora fue elevada al estatus de principio fundamental en un artículo publicado en 1933 por el astrofísico Edward Arthur Milne. A este principio Milne lo llamaba «principio extendido de la relatividad», y requería que «no solo las leyes de la naturaleza³³⁵ sino también los sucesos que ocurren en la naturaleza, deben aparecer del mismo modo a todos los observadores, estén donde estén». Hoy la estipulación de la homogeneidad y la isotropía se conoce como principio cosmológico (un nombre acuñado por el astrónomo alemán Erwin Finlay-Freundlich), y la evidencia directa más poderosa de su validez proviene de observaciones del «relumbramiento de la creación»: la radiación cósmica del fondo de microondas. Esta radiación es un vestigio de la primigenia bola de fuego, caliente, densa y opaca. Proviene de todas las direcciones y es isotrópica hasta más de una parte en diez mil. (En palabras del astrónomo Bob Kirshner, «más suave que el culo de un bebé»). Las prospecciones de galaxias a gran escala también indican un alto grado de homogeneidad. En todas las prospecciones que comprenden una sección lo bastante grande del cosmos para constituir una «buena muestra», hasta las estructuras más conspicuas se empequeñecen y suavizan.

Como el principio cosmológico ha resultado ser tan eficaz cuando se aplica a distintas posiciones del espacio, era natural preguntarse si se podía ampliar para aplicarlo también al *tiempo*. Es decir, ¿se puede decir que el universo es invariable en su apariencia a gran escala así como en sus leyes físicas? Esta es la gran pregunta que plantearon Hoyle, Bondi y Gold en 1948. Un extremo divertido es que para plantearse esa pregunta el ilustre trío podría haberse inspirado en una película de terror británica titulada *Dead of Night*. (La figura 24 muestra el cartel original del filme). Así es como el propio Hoyle describía la secuencia de acontecimientos:

En cierto sentido, se podría decir que la teoría del estado estacionario comenzó la noche en que Bondi, Gold y yo asistimos a una de las salas de cine de Cambridge [...] [la película *Dead of Night*] era una secuencia de cuatro historias de fantasmas, aparentemente inconexas tal como las relataban los distintos protagonistas de la película, pero con la interesante propiedad de que el final de la cuarta historia conectaba inesperadamente con el principio de la primera, estableciendo así la posibilidad de un ciclo sin fin³³⁶.



Figura 24

Cuando los tres colegas regresaron a Trinity College, Gold preguntó de repente: «¿Y si el universo fuese así?», con lo que quería decir que el universo podía estar eternamente describiendo un círculo sobre sí mismo, sin un principio ni un fin. La idea era sin duda interesante, salvo por el hecho de que a primera vista parecía entrar en contradicción con el descubrimiento del sacerdote y cosmólogo belga Georges Lemaître y el astrónomo Edwin Hubble de que el universo se estaba expandiendo. La expansión cósmica parecía apuntar más bien a una evolución lineal, con un inicio denso y caliente (el *big bang*) y una dirección clara para la flecha del tiempo. Hoyle, Bondi y Gold eran plenamente conscientes de estos hallazgos, y el descubrimiento de Hubble y lo que podía implicar ya habían aparecido con frecuencia en las discusiones del trío. En una entrevista en 1978, Gold recordaba aquellos intensos análisis:

Lo que ocurrió fue que hubo un periodo en el que Hoyle y yo nos reuníamos un buen rato en las habitaciones de Bondi en la residencia y discutíamos, como Hoyle siempre insistía en hacer, sobre lo que realmente significaba lo de Hubble. [...] Todas esas galaxias desplazándose, separándose, ¿y después solo quedaría un espacio terriblemente vacío? ¿Había sido muy denso en el pasado?³³⁷

Todas aquellas reflexiones les habían llevado a un resultado inesperado: Hoyle, Bondi y Gold comenzaron a pensar seriamente sobre el problema de si la expansión cósmica observada se podía encajar de algún modo en el contexto de una teoría de un universo inmutable.

Pero antes de sumergirnos en este fascinante tema, volvamos por un momento a los años 1920. El descubrimiento de la expansión del universo no es solo uno de los descubrimientos astronómicos más extraordinarios del siglo XX, sino que además desempeña un papel tan crucial tanto en el error de Hoyle como en el de Einstein que merece la pena hacer un paréntesis para revisar la historia de este hito. La historia es especialmente pertinente

porque un nuevo e inesperado giro en la crónica de los acontecimientos creó una gran convulsión en la comunidad de astrónomos e historiadores de la ciencia en 2011.

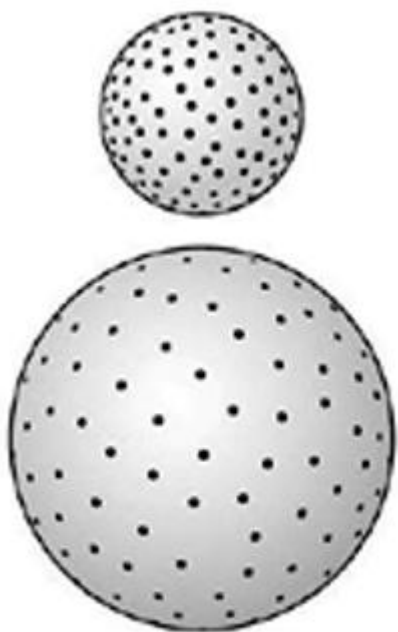
La expansión cósmica: Perdida (en la traducción)³³⁸ y encontrada

Cuando los cosmólogos dicen que nuestro universo se expande, basan esta aserción fundamentalmente en los indicios que se derivan del movimiento aparente de las galaxias. Hay un ejemplo muy simplificado pero usado muy a menudo que puede ayudar a visualizar el concepto.

Imaginemos un mundo bidimensional que solo existe sobre la superficie de una esfera de goma (figura 25). Las galaxias de este mundo son simplemente unas motas pequeñas y redondas (como las que se obtienen con una perforadora de papel) pegadas sobre su superficie. Para los habitantes de este mundo, no existe ni el interior de la esfera ni el espacio exterior; su universo entero se limita a la superficie. Es importante comprender que este mundo no tiene un centro; ninguna de las motas de la superficie es diferente de ninguna de las otras motas. (Recordemos que el centro de la propia esfera no forma parte de este mundo). Este universo tampoco tiene límites o márgenes. Si un punto se desplazase en cualquier dirección sobre la superficie esférica, nunca llegaría a un margen.

Pues bien, ¿qué pasaría si esta esfera se inflase? Con independencia de la mota de la superficie en la que vivamos, observaremos que todas las otras motas se alejan de nosotros. Además, las motas más distantes se alejarán más deprisa: una mota que esté el doble de lejos que otra se moverá el doble de rápido (puesto que recorrerá el doble de distancia durante el mismo periodo de tiempo). En otras palabras, la velocidad de la recesión será proporcional a la distancia. La teoría de la relatividad general de Einstein nos dice que la urdimbre del espacio-tiempo (la combinación de espacio y tiempo en un único continuo) de nuestro universo se comporta de tal manera que podemos darle la vuelta a este ejemplo simplificado: el descubrimiento de

que todas las galaxias distantes se alejan de nosotros, unido al hecho de que la velocidad de la recesión es proporcional a la distancia, implica que el espacio de nuestro universo se está estirando. (Volveremos a ocuparnos de esta cuestión en el capítulo 10). Nótese que la expansión del universo no se puede comparar con la explosión de una granada de mano. En este caso, la explosión se produce dentro de un espacio existente, y tiene un centro bien definido (y un margen). En el universo, en cambio, el movimiento de recesión surge del hecho de que el propio espacio se está estirando. Ninguna galaxia es diferente de ninguna otra; desde cualquier dirección vemos todas las otras galaxias alejándose en todas las direcciones.



Modelo de universo
en expansión
Figura 25

La figura clave con la que suele asociarse el descubrimiento de la expansión cósmica es el astrónomo Edwin Hubble, el mismo que da nombre al Telescopio Espacial Hubble. Es común atribuir a Hubble la medición (con la colaboración de su ayudante, Milton Humason) de las distancias y velocidades de recesión de unas pocas docenas de galaxias, y el haber establecido, en un artículo publicado en 1929³³⁹, la ley que lleva su nombre y que dice que las galaxias se alejan de nosotros a velocidades proporcionales a su distancia. A partir de la «ley de Hubble», Hubble y Humason derivaron una tasa global de expansión en la

actualidad que sugiere que con cada 3,26 millones de años luz de distancia, la velocidad de recesión de las galaxias aumenta en unos 500 kilómetros por segundo.

Como la horquilla de distancia de las observaciones originales de Hubble era relativamente limitada, inferir a partir de ellas una expansión universal habría sido un auténtico acto de fe de no ser por algunas ideas teóricas que

sustentaban la idea, algunas de las cuales habían precedido incluso a las observaciones. De hecho, ya en 1922, el matemático ruso Aleksandr Friedmann³⁴⁰ demostró que la relatividad general permitía un universo en expansión, lleno de materia y sin límites. Aunque pocos tomaron nota de los resultados de Friedmann (aparte del propio Einstein, que reconoció su corrección matemática pero los desechó, pues creía que «difícilmente se les puede atribuir significado físico»), la idea de un universo dinámico comenzaba a ganar influencia durante la década de 1920. En consecuencia, la interpretación de las observaciones de Hubble en el contexto de un universo en expansión se hizo popular bastante rápido.

Los físicos a veces tienden a ignorar la historia de su disciplina. Al fin y al cabo, a quién le importa quién descubrió qué siempre y cuando los descubrimientos se divulguen. Solo los regímenes totalitarios han tenido la obsesión de insistir en que todas las ideas buenas eran propias. En un antiguo chiste sobre la Unión Soviética, un visitante importante es llevado al museo de la ciencia de Moscú. En la primera sala, ve una pintura gigante de un hombre ruso del que nunca había oído hablar. Cuando pregunta quién es aquella persona, le dicen: «Este es tal y cual, el inventor de la radio». En la segunda sala hay otro retrato gigante de un extraño absoluto. «El inventor del teléfono», le informa su anfitrión. Y así continúa durante una docena de salas más. En la última sala hay un cuadro que en comparación empequeñece al resto de las pinturas. «¿Y este quién es?», pregunta el asombrado visitante. El anfitrión sonríe y responde: «Este es el hombre que inventó a todos los hombres de las salas anteriores».

En unos pocos casos, sin embargo, los descubrimientos son de tal magnitud que puede ser muy útil entender bien el camino que llevó a aquellas ideas, y la atribución correcta. No hay duda de que el descubrimiento de la expansión del universo cae en esta categoría, si no por otra razón, por el hecho de que la expansión sugiere que nuestro universo tuvo un principio.

Durante 2011 estalló un apasionado debate³⁴¹ sobre quién merece el crédito por el descubrimiento de la expansión cósmica. En concreto, unos pocos artículos plantearon la sospecha de que durante los años 1920 se aplicasen algunas prácticas deshonestas de censura para garantizar que Edwin Hubble tuviera la prioridad del descubrimiento.

He aquí, muy brevemente, el contexto y los hechos más relevantes de este debate.

En febrero de 1922, el astrónomo Vesto Slipher³⁴² había medido las velocidades radiales (velocidades a lo largo de nuestra línea de visión) de cuarenta y una galaxias. En un libro publicado en 1923, Arthur Eddington reprodujo esas velocidades³⁴³ y comentó: «La gran preponderancia de velocidades positivas [de recesión] es sorprendente, pero la falta de observaciones de las nebulosas meridionales es desafortunada, e impide una conclusión final». (A las galaxias se las conocía antiguamente como nebulosas [del latín «niebla» o «nube»] por su aspecto borroso). En 1927 Georges Lemaître publicó (en francés) un notable artículo³⁴⁴ cuyo título decía (en su traducción): «Un universo homogéneo de masa constante y de razón creciente explica la velocidad radial de las nebulosas extragalácticas». Por desgracia, fue publicado en una revista de poca circulación, los *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*. En él, Lemaître primero descubre soluciones dinámicas (de expansión) para las ecuaciones de la relatividad general de Einstein, a partir de las cuales deriva el fundamento teórico de lo que hoy se conoce como ley de Hubble: el hecho de que la velocidad de recesión sea directamente proporcional a la distancia. Pero Lemaître no se limitó a hacer unos cálculos teóricos, sino que, utilizando las velocidades de las galaxias medidas por Slipher, además de distancias aproximadas determinadas a partir de mediciones de brillo realizadas por Hubble³⁴⁵ en 1926, descubrió la existencia de una provisoria «ley de Hubble» y determinó la tasa de expansión del universo. Para el valor numérico de esa tasa, que hoy conocemos como constante de Hubble, Lemaître obtuvo 625 (en las

unidades comunes de kilómetros por segundo por cada 3,26 millones de años luz de distancia). Dos años más tarde, Edwin Hubble obtuvo un valor³⁴⁶ de aproximadamente 500 para esa misma cantidad. (Hoy sabemos que ambos valores se equivocaban de un orden de magnitud). De hecho, Hubble utilizó esencialmente las mismas velocidades de recesión (las determinadas por Slipher) sin mencionar en ningún momento en su artículo que eran de este autor. Hubble usó mejores distancias, basadas en parte en mejores indicadores de distancias estelares. Lemaître era plenamente consciente del hecho de que las distancias que había usado eran solo aproximadas. Llegó a la conclusión de que las estimaciones de distancias disponibles entonces parecían insuficientes para evaluar la validez de la relación lineal que había descubierto.

Basándome solamente en lo que he descubierto³⁴⁷ hasta el momento, creo que la mayoría de la gente estaría de acuerdo en que lo justo sería atribuir el descubrimiento del universo en expansión y de la provisional existencia de la ley de Hubble a Lemaître, y la confirmación detallada de esa ley a Hubble y Humason. Las observaciones posteriores y realmente meticulosas de Hubble y Humason extendieron las mediciones de velocidades de Slipher a distancias mayores y más precisas. Y aquí es donde la trama se enreda.

La traducción inglesa del artículo de Lemaître³⁴⁸ de 1927 se publicó en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* de Inglaterra en marzo de 1931. Sin embargo, se eliminaron algunos párrafos de la versión original en francés; en concreto, el párrafo que describía la ley de Hubble y en el que Lemaître usaba las cuarenta y dos galaxias de las que tenía distancias y velocidades (aproximadas) para derivar un valor de 625 para la constante de Hubble. También faltaba un párrafo en el que Lemaître discutía los posibles errores en las estimaciones de las distancias, y dos notas a pie de página, en una de las cuales hacía hincapié en la interpretación de la proporcionalidad entre la velocidad y la distancia como resultado de una expansión relativista. En la misma nota, Lemaître calculaba también dos valores posibles para la

constante de Hubble: 575 y 670, dependiendo de cómo se agrupasen los datos.


¿Quién tradujo el artículo? ¿Y por qué se eliminaron esos párrafos de la versión inglesa? Varios detectives aficionados de la historia de la ciencia sugirieron en 2011 que alguien había censurado deliberadamente del artículo de Lemaître las partes relacionadas con la ley de Hubble y la determinación de la constante de Hubble. El astrónomo canadiense Sidney van den Bergh³⁴⁹ especuló que quien realizó aquella «corrección selectiva» lo hizo para impedir que el artículo de Lemaître socavara la pretensión de prioridad de Edwin Hubble. «Escoger una parte en medio de una ecuación es algo que debió hacerse a propósito», observó. El matemático sudafricano David Block fue incluso algo más lejos³⁵⁰. Sugirió que el propio Edwin Hubble podría haber tenido algo que ver con esta cósmica «censura» para asegurarse de que el crédito por el descubrimiento de la expansión del universo fuese a él y al Observatorio de Monte Wilson, donde había realizado las observaciones.

Siendo el caso que durante más de dos décadas he trabajado con el homónimo de Hubble, el Telescopio Espacial Hubble, me interesé lo bastante por esta historia policiaca como para intentar evaluar los hechos más meticulosamente. Comencé por examinar las circunstancias que rodearon la traducción del artículo de Lemaître.

Para empezar, obtuve una copia³⁵¹ de la carta original enviada por el editor de *Monthly Notices* de aquella época, el astrónomo William Marshall Smart, a Georges Lemaître. En esa carta (figura 26), Smart le pregunta a Lemaître si permitiría que su artículo de 1927 se reimprimiese en *Monthly Notices*, puesto que el Real Consejo Astronómico consideraba que el artículo no era tan conocido como merecía su importancia. El párrafo más importante de la carta dice así:

Brevemente, si la Soc. Scientifique de Bruxelles [en los anales de la cual se publicó el artículo original] está dispuesta a darnos su permiso, nos gustaría que el artículo se tradujese al inglés. Además, si usted tiene adiciones, etc.,

sobre el asunto, estaríamos encantados de imprimirlas. Imagino que si hubiera adiciones se podría inserir una nota que indique que §§1-n son sustancialmente del artículo de Bruselas + el resto es nuevo (o algo más elegante). Personalmente, y también en nombre de la Sociedad, confío en que pueda hacer esto.



 HENRY
 COMBES
 ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY,
 BURLINGTON HOUSE,
 LONDON W.1.
 17 February 1931

Dear Dr. Leppähi,
 At the R.A.S. Council meeting last Friday it was resolved to ask you if you would allow your paper "in liaison française..." in the *Bulletin de la Soc. Sci. de Bruxelles* to be reprinted in the *Monthly Notices*.

It has been felt that it has not been translated so widely - or sent so well known - as its importance warrants - especially in English speaking countries. The request of the Council is almost universal in the Society's annual meetings you have much to be desired, and appreciate the honor of giving your paper a greater publicity amongst English speaking Scientists.

Briefly, you of the *Soc. Scientifique de Bruxelles* are also willing to give its permission - we shall prefer the paper translated into English. Also, if you have any further

additions etc. note might, we would find them interesting. Suppose that if the translation is not suitable we will be glad to see if you will be able to retranslate it from the Brussels paper + the remainder as new (or something more elegant). (Normally, and also in behalf of the Society, I hope that you will be able to do this.)

By the way, you would be glad to become a Fellow, and I will be glad to see you at the next meeting of the Society. The annual subscription of the Society is £2-0-0 with an entrance fee of the same amount.

With kind regards,
 Sincerely yours
 W. Smart.

Figuras 26a y 26b

Mi reacción inmediata fue que el texto de la carta de Smart era completamente inocente, y ciertamente no sugería ningún intento de edición³⁵² o censura. Pero aunque estaba bastante convencido de la corrección de esta interpretación no conspiratoria de la carta de Smart, los dos misterios principales (quién tradujo el artículo y quién eliminó los párrafos) seguían sin resolverse. En un intento por aclarar estas dudas de una vez por todas, decidí explorar el asunto más a fondo examinando todas

las actas del consejo y toda la correspondencia que ha sobrevivido del año 1931 en la Biblioteca de la Real Sociedad de Londres³⁵³. Tras inspeccionar cientos de documentos irrelevantes y casi darme por vencido, descubrí dos «pistolas humeantes». Primero, en las actas del consejo del 13 de febrero de 1931, se informa de lo siguiente: «Sobre la moción del Dr. Jackson, se resuelve que se le pregunte al Abbé Lemaître si permitiría que su artículo "Un Univers Homogène de Masse Constante et de Rayon Croissant", o una traducción al inglés del mismo, se publique en *Monthly Notices*». Esta es, naturalmente, la decisión que se menciona en la carta de Smart a Lemaître. (Si se me permite un divertido paréntesis, las mismas actas también informan de que «Se ha discutido una moción de *sir* Arthur Eddington para que se permita fumar durante las reuniones del Consejo. Se resuelve que se permita fumar a partir de las tres y media de la tarde»). En segundo lugar, hallé la respuesta de Lemaître³⁵⁴ a la carta de Smart (figura 27), datada el 9 de marzo de 1931. La carta dice así:

Estimado Dr. Smart

*Agradezco enormemente el honor que supone para mí y para mi sociedad que mi artículo de 1927 sea publicado por la Real Sociedad Astronómica. Le envío una traducción del artículo. No me ha parecido apropiado reproducir la discusión provisional sobre las velocidades radiales que claramente no presenta ningún interés real [muy posiblemente Lemaître quería traducir la palabra francesa *actuel*, que significa «actual»], así como la nota geométrica, que se podría sustituir por una breve bibliografía de artículos antiguos y nuevos sobre el tema [la cursiva es mía]. Adjunto un texto en francés que indica los pasaje omitidos en la traducción. He hecho una traducción tan exacta como he podido, pero le estaría muy agradecido si alguno de los suyos fuese tan amable de leerla y corregir mi inglés, que me temo que es bastante rudimentario. No he cambiado ninguna*

fórmula, ni siquiera he modificado la sugerencia final, que no está confirmada por mis trabajos recientes. No he vuelto a escribir la tabla, que puede imprimirse a partir del texto francés.

Por lo que respecta a añadidos sobre el tema, acabo de obtener las ecuaciones de la expansión del universo por un nuevo método que pone de manifiesto la influencia de las condensaciones y las causas posibles de la expansión. Me gustaría presentarlas a su sociedad en un artículo aparte.

Me gustaría enormemente ser miembro de su sociedad y agradecería ser presentado por el Prof. Eddington y usted mismo.

Si el Prof. Eddington tiene ya una separata de su artículo de mayo en M. N. me gustaría recibirla.

Le agradeceré que salude de mi parte al Prof. Eddington.

Louvain, le 9 mars 1931

Dear Dr. Smart

I highly appreciate the honour for me and for our society to have my 1927 paper reprinted by the Royal Astronomical Society. I send you a translation of the paper. I did not find advisable to reprint the provisional discussion of radial velocities which is clearly of no actual interest, and also the geometrical note, which could be replaced by a small bibliography of ancient and new papers on the subject. I join a French text with indication of the passages omitted in the translation. I made this translation as exact as I can, but I would be very glad if some of yours would be kind enough to read it and correct my English which I am afraid is rather rough. No formula is changed, and even the final suggestion which is not confirmed by recent work of mine has not be modified. I did not write again the table which may be printed from the French text.

As regards to addition on the subject, I just obtained the equations of the expanding universe by a new method which makes clear the influence of the condensations and the possible causes of the expansion. I would be very glad to have them presented to your society as a separate paper.

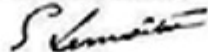
I would like very much to become a fellow of your society and would appreciate to be presented by Prof. Eddington and you.

If Prof. Eddington has yet a reprint of his May paper in M.N. I would be very glad to receive it.

Will you kind enough to present my best regards to professor Eddington

and believe

Yours sincerely



70 rue de Namur
Louvain

Figura 27

Esto acaba de una vez por todas con las especulaciones sobre quién tradujo el artículo y quién borró los párrafos: ¡fue el propio Lemaître!

La carta de Lemaître también nos abre una fascinante ventana a la psicología científica de los investigadores (por lo menos de algunos) de la década de 1920. Lemaître no estaba para nada obsesionado con establecer prioridad para su descubrimiento original. Dado que los resultados de Hubble ya se habían publicado en 1929, no le veía sentido a repetir en 1931 sus hallazgos anteriores, más provisionales, sino que prefirió mirar hacia el futuro y publicar su nuevo artículo, «El universo en expansión³⁵⁵», y así lo hizo. La petición de Lemaître de unirse a la Real Sociedad Astronómica también llegó

a ser aceptada. Lemaître fue elegido oficialmente como asociado el 12 de mayo de 1939.

El universo estacionario

Volviendo a la provocadora pregunta de Gold, «¿Y si el universo fuese así?», refiriéndose al argumento circular de la película *Dead of Night*, sus colegas no consideraron la posibilidad apetecible, al menos en un principio. Hoyle enseguida cortó a Gold, burlándose: «¡Bah!, lo refutaremos antes de la cena». Pero esa «predicción» resultó ser incorrecta. En palabras de Bondi, «Aquella noche la cena fue bastante tarde³⁵⁶, y no tardamos mucho en decir todos que era una solución perfectamente posible». O sea que un universo inmutable, sin principio ni fin, comenzó a parecerles cada vez más atractivo. A partir de entonces, sin embargo, Hoyle adoptó un enfoque del problema algo distinto que sus compañeros científicos.

La actitud de Bondi y Gold se basaba en un concepto filosófico atractivo. Si el universo está evolucionando y cambiando, argumentaron, no hay ninguna razón clara para creer que las leyes de la naturaleza tengan una validez permanente. Al fin y al cabo, esas leyes se establecieron a partir de experimentos realizados aquí y ahora. Además, Bondi y Gold presentían que el principio cosmológico, tal como se había enunciado originalmente, presentaba otra dificultad. Suponía que unos observadores situados en distintas galaxias de cualquier lugar del universo discernirían la misma imagen a gran escala del cosmos. Pero si el universo está evolucionando continuamente en el tiempo, entonces los distintos observadores compararían sus notas al mismo tiempo, lo que implicaba la necesidad de definir con precisión lo que significaba «al mismo tiempo». Para esquivar todos estos obstáculos, Bondi y Gold propusieron su Principio Cosmológico Perfecto³⁵⁷, que añadía al principio original el requisito de que no exista un tiempo preferido en el cosmos, que el universo tenga el mismo aspecto desde cualquier punto *en todos los tiempos*.

Aunque Hoyle decidió tomar un camino distinto, el intuitivo principio de Bondi y Gold le pareció convincente, sobre todo porque de paso resolvía otro problema inferido a partir de las observaciones del universo en expansión. La determinación de Hubble de la tasa de expansión (que más adelante se vería que era incorrecta) implicaba un escenario de pesadilla en el que el universo solo tenía 1200 millones de años de edad, ¡mucho menos que la edad estimada de la Tierra! Así que, a pesar del enorme prestigio de Hubble («exagerado en los años 1930 y 1940», a decir de Bondi), Hoyle, Bondi y Gold pensaron que había que encontrar otra solución. Pero a diferencia de Bondi y Gold, Hoyle adoptó un enfoque más matemático³⁵⁸ y menos filosófico. En concreto, desarrolló su teoría en el marco de la relatividad general de Einstein. Partió del hecho observado de que el universo se estaba expandiendo. Esto enseguida planteaba una cuestión: si las galaxias están alejándose continuamente unas de otras, ¿significa eso que el espacio está cada vez más vacío? Hoyle respondió con un no categórico. En su lugar, propuso que la materia se creaba continuamente por todo el espacio, de manera que constantemente se formaban nuevas galaxias y cúmulos de galaxias con una tasa que compensa de manera exacta la dilución causada por la expansión cósmica. De este modo, razonaba Hoyle, el universo se mantiene en un estado estacionario. En una ocasión hizo un agudo comentario: «Las cosas son como son porque fueron del modo que fueron». La diferencia entre un universo estacionario y un universo en evolución (*big bang*) se muestra de manera esquemática en la figura 28, donde de nuevo he usado la analogía de la esfera que se va inflando. En ambos casos, comenzamos (arriba) con una muestra del universo en la que las galaxias vienen representadas por pequeñas motas. En el escenario evolutivo (a la izquierda), al pasar un tiempo las galaxias se han alejado unas de otras (abajo a la izquierda), reduciendo la densidad global de materia. En el escenario del estado estacionario, en cambio, se han creado nuevas galaxias de modo que la densidad media se mantiene igual (abajo a la derecha).

La idea de que la materia se crea de manera continua de la nada puede parecer una locura a primera vista. Sin embargo, como Hoyle se apresuró a señalar, tampoco sabía nadie de dónde había salido la materia en la cosmología del *big bang*. La única diferencia era, a su entender, que en el escenario del *big bang* toda la materia se creaba en una sola explosión inicial, mientras que en el modelo del estado estacionario la materia se creaba a una tasa constante durante un tiempo infinito, y todavía se crea en la actualidad con la misma tasa. Hoyle defendía que el concepto de creación continua de la materia (cuando se pone en el contexto de una teoría específica) era mucho más atractivo que la creación del universo en el pasado remoto, puesto que esta última implicaba que los efectos observables habían surgido por «causas desconocidas para la ciencia³⁵⁹». Para alcanzar un estadio estacionario, Hoyle añadió a las ecuaciones de la relatividad general de Einstein un término que representaba un «campo de creación», cuyo efecto era crear materia de manera espontánea. ¿Qué tipo de materia? Hoyle no lo sabía con seguridad, pero conjeturó: «La creación de neutrones parece ser la posibilidad más probable. Cabría esperar que las consiguientes desintegraciones aportaran el hidrógeno que necesitan los astrofísicos. Además, la neutralidad eléctrica del universo quedaría garantizada³⁶⁰». La tasa con la que supuestamente se materializaban nuevos átomos a partir del espacio vacío era demasiado pequeña para ser directamente observable. Hoyle la describió en una ocasión como «aproximadamente de un átomo por siglo en un volumen igual al Empire State Building».

La virtud clave del escenario del estado estacionario era que, como era de esperar para toda buena teoría científica, era falsable. He aquí cómo el filósofo de la ciencia Karl Popper expresaba su opinión sobre lo que constituye un sistema teórico de la ciencia natural:

No requiero de un sistema científico que pueda ser identificado, de una vez y para siempre, en un sentido positivo; pero requiero que su forma lógica sea tal que pueda ser identificado, por medio de pruebas empíricas, en un

sentido negativo: *tiene que ser posible que un sistema científico empírico sea refutado por la experiencia*³⁶¹.

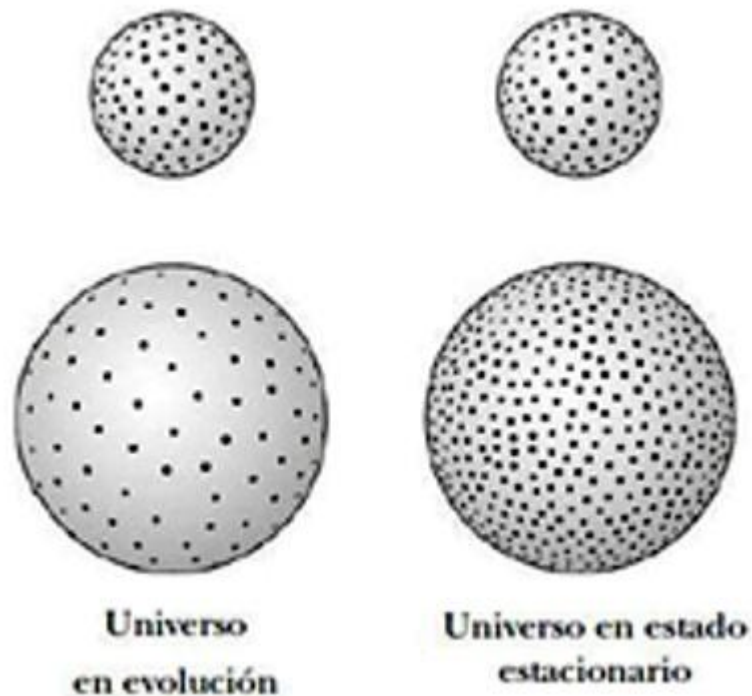


Figura 28

El modelo del estado estacionario predecía que las galaxias que están a miles de millones de años luz de distancia fuesen, estadísticamente hablando, parecidas a las galaxias cercanas, aunque a las primeras las vemos tal como eran hace miles de millones de años a causa del tiempo que tarda su luz en alcanzarnos. Bondi solía retar a los proponentes del modelo del universo en evolución (*big bang*) diciendo: «Si el universo ha estado alguna vez en un estado distinto del que tiene ahora, mostradme los restos fósiles de cómo era hace mucho tiempo». En otras palabras, si, pongamos por caso, se descubriera que las galaxias extremadamente remotas tuvieran (por término medio) un aspecto muy distinto de las galaxias cercanas a la Vía Láctea, nuestro universo no podría estar en estado estacionario.

Evolución

Cuando Hoyle y, por separado, Bondi y Gold, publicaron sus artículos sobre el estado estacionario, plantearon a la comunidad científica una elección entre dos formas muy distintas de ver el mundo. De un lado estaba el modelo del *big bang*, que suponía que el universo había tenido un principio en forma de un estado denso y caliente (que Lemaître llamaba «átomo primigenio»), Además de Lemaître, George Gamow fue posiblemente el más firme defensor de este escenario. Como ya vimos en el capítulo anterior, Gamow incluso creyó (equivocadamente) que todos los elementos químicos se habían forjado en aquella explosión cósmica inicial.

Contra el *big bang* se alzaba el modelo del estado estacionario, con su pasado infinito y su escenario cósmico inmutable a pesar de la expansión global. Sin embargo, los telescopios de finales de los años 1940 no eran lo bastante potentes como para detectar una tendencia evolutiva del tipo de la que implicaba el modelo del *big bang*. Cuando Hoyle conoció a Edwin Hubble, en agosto de 1948, le alegró saber por este último que el que supuestamente habría de convertirse en el mayor telescopio del mundo (el telescopio de 500 centímetros de Monte Palomar, en California) estaba siendo sometido a las últimas pruebas. Hubble confiaba en comenzar a observar galaxias remotas en poco tiempo. Lamentablemente, ni siquiera el gran espejo del telescopio de Monte Palomar podía captar la luz suficiente de galaxias normales y muy lejanas para discriminar sin ambigüedad entre las dos teorías rivales.

En octubre de 1948, Hoyle, Bondi y Gold asistieron a una pequeña reunión de la Real Sociedad Astronómica en Edimburgo. Los tres fueron invitados a presentar sus ideas sobre el universo en estado estacionario. Hoyle aprovechó la oportunidad para proponer por primera vez una posible conexión entre un cosmos que no cambia y se sostiene a sí mismo y la vida: Se diría que la astrofísica moderna nos aparta inexorablemente de un universo de espacio y tiempo finitos, en cuyo futuro no nos aguarda más que

un agotamiento general o muerte térmica, a favor de un universo en el que tanto el espacio como el tiempo son infinitos. Cabe pensar que las posibilidades para la evolución física, y quizá incluso de la vida, tampoco tengan límite alguno. Estas son las cuestiones que se le plantean en la actualidad al astrónomo. Esperamos que en una generación podamos dirimirlas con razonable certeza³⁶².

Paradójicamente, aunque años después Hoyle criticaría la selección natural (defendiendo el papel de la panspermia, de la vida como fenómeno cósmico), se puede rastrear el origen de su pensamiento hasta Darwin. Recordemos que a Darwin le preocupaba la estimación que había hecho Kelvin de la edad de la Tierra porque temía que una edad tan limitada fuese insuficiente para que actuase la evolución. Hoyle alude aquí a una ventaja de la teoría del estado estacionario: un universo que siempre ha existido y que existirá para siempre ofrece una cantidad de tiempo infinita para que surja y evolucione la vida. Retornaremos a esta cuestión más adelante, cuando comentemos las posibles razones de la obstinación con la que Hoyle se aferró a la idea del estado estacionario.

Después de las presentaciones de Gold, Bondi y Hoyle, el presidente de la Real Sociedad Astronómica, el astrónomo William Greaves, abrió la discusión con una observación un tanto sarcástica: «La cosmología es un departamento de la astronomía, aunque a veces sospecho que sus adeptos creen que es la única parte; en cualquier caso, todos estamos de acuerdo en que es la más importante³⁶³». Hete aquí que uno de los asistentes era Max Born, uno de los físicos más distinguidos del siglo XX. Cuando se le preguntó su opinión sobre el estado estacionario, dijo:

¡Me impresiona el carácter de los cosmólogos! Tras los descubrimientos iniciales de los físicos atómicos, los físicos no paran de encontrar nuevas partículas a intervalos regulares; así que en la cosmología seguiremos descubriendo nuevas teorías sobre la estructura y evolución del mundo [...] Me llena de gratitud oír estas presentaciones, pero soy escéptico³⁶⁴.

Los primeros signos de problemas para el modelo del estado estacionario no vinieron de los telescopios ópticos sino de la radioastronomía. El universo es esencialmente transparente a las ondas de radio, y, por consiguiente, las antenas de los radiotelescopios podían captar señales incluso de galaxias distantes (pero «activas» en el intervalo espectral de la radio) que a duras penas se podían detectar ópticamente. En la década de 1950, científicos británicos y australianos dieron un buen uso a la experiencia ganada durante la segunda guerra mundial desarrollando un sólido programa de radioastronomía. Uno de los pioneros de este empeño fue un físico del Laboratorio Cavendish de Cambridge: Martin Ryle.

A diferencia de Hoyle, Ryle era de buena cuna (su padre fue médico del rey Jorge VI) y había recibido lo mejor que puede ofrecer una educación privada. Después de algunas radioobservaciones pioneras del Sol a finales de los años 1940, Ryle y su grupo se embarcaron en un ambicioso programa para detectar fuentes de radio más allá del sistema solar. Tras algunas impresionantes mejoras en las técnicas de observación que les permitieron descartar la radiación de fondo de la Vía Láctea, Ryle y sus colegas descubrieron varias docenas de «radio estrellas» distribuidas más o menos isotrópicamente por el firmamento. Sin embargo, como la mayoría de las fuentes no correspondían a un objeto visible, no había manera de determinar su distancia de manera precisa. Ryle era de la opinión de que se trataba de estrellas peculiares dentro de nuestra galaxia, y estaba dispuesto a defender su opinión a capa y espada en una pequeña reunión de entusiastas de la radioastronomía.

Esta reunión, que recibió el nombre de Conferencia Massey (por su anfitrión, el físico atómico Massey), tuvo lugar en University College de Londres en marzo de 1951. A ella asistieron tanto Hoyle como Gold, que no escondieron su escepticismo. En cierto momento, Gold se levantó y desafió las conclusiones de Ryle. Sostuvo que, como las fuentes de radio discretas estaban distribuidas de manera uniforme en todas direcciones, y no

concentradas en el plano de la Vía Láctea, debían estar fuera de nuestra galaxia, a una distancia mucho mayor. Y argumentó que la única alternativa era que las fuentes estuviesen tan cerca que todas se encontrasen dentro del relativamente pequeño grosor del disco galáctico (distancias de menos de cien años luz). Al parecer de Gold, la hipótesis de Ryle de que las fuentes estaban dispersas por toda la Vía Láctea no se sostenía. Hoyle apoyó plenamente la hipótesis de Gold, lo que provocó un comentario sarcástico de Ryle: «Creo que los teóricos no han entendido bien los datos experimentales». Hoyle respondió señalando que de la media docena de fuentes que se habían identificado ópticamente, cinco correspondían a galaxias externas. Años más tarde, comentó que Ryle había utilizado la palabra «teórico» de un modo que implicaba una «especie inferior y detestable³⁶⁵».

Esta fue solo una de las muchas confrontaciones entre los teóricos del estado estacionario y Ryle, pero dejó heridas emocionales tanto en Hoyle como en Ryle. En este caso particular, Gold y Hoyle acabaron teniendo la razón.

Más o menos un año después de la Conferencia Massey, el astrónomo Walter Baade determinó que la distancia a una fuente de radio de la constelación del Cisne era de cientos de millones de años luz, confirmando así lo que Hoyle sospechaba. La ironía es que fue precisamente la gran distancia a las fuentes de radio lo que más tarde se convertiría en la piedra angular de la argumentación de Ryle a favor de un universo en evolución y lo que llevó a la ruina a la teoría del estado estacionario. (La teoría del estado estacionario nunca tuvo demasiado eco en Estados Unidos, pero en 1952, tras una conferencia del Astrónomo Real, *sir* Harold Spencer Jones, consiguió suscitar algunos titulares. Dos de estos, uno en el *New York Times* y el otro en *Christian Science Monitor*, se muestran en la figura 29³⁶⁶).

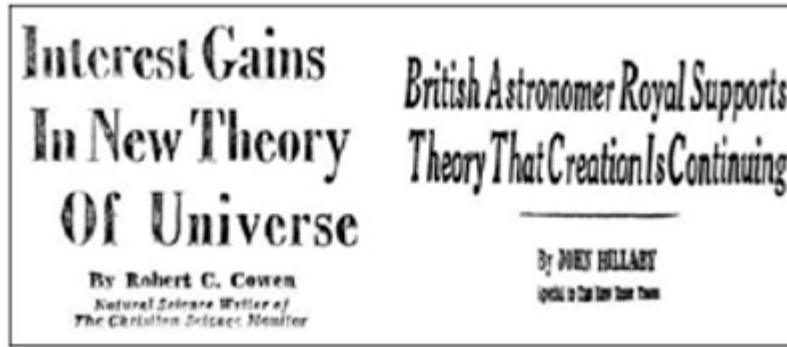


Figura 29

Ryle tuvo que sufrir todavía otro bochorno temporal en su campaña contra la cosmología del estado estacionario, aunque la secuencia de los acontecimientos comenzó con lo que parecía una victoria. Los modelos del *big bang* y del estado estacionario hacían predicciones distintas sobre el universo distante. Cuando observamos galaxias que se encuentran a miles de millones de kilómetros de distancia, lo que vemos es una imagen de cómo *eran* esas galaxias hace miles de millones de años. En un universo en continua evolución (el modelo del *big bang*), esto significa que observamos esa parte concreta del universo cuando era más joven y, por tanto, diferente. En el modelo del estado estacionario, en cambio, el universo siempre ha existido en el mismo estado. En consecuencia, cabe esperar que las partes remotas del universo tengan exactamente el mismo aspecto que nuestro entorno cósmico inmediato. Ryle se aferró a la oportunidad que le brindaba esta predicción contrastable y comenzó a recopilar una gran muestra de fuentes de radio, y a contar cuántas había a distintos intervalos de intensidad. Como no tenía manera de saber las distancias reales a la mayoría de las fuentes (se hallaban fuera del alcance de los telescopios ópticos), Ryle hizo la más simple de las suposiciones: que las fuentes de radio más débiles eran, por término medio, más distantes que las fuentes con una señal fuerte. Lo que encontró fue que había muchísimas más fuentes débiles que fuertes. Dicho de otro modo, parecía que la densidad de fuentes

a distancias de miles de millones de años luz (que, por tanto, representaban el universo de hace miles de millones de años) era mucho mayor que la densidad actual en nuestro entorno. Eso claramente entraba en contradicción con un universo inmutable, y en cambio se podía ver como algo coherente con un cosmos que evoluciona desde un *big bang*; bastaba con suponer (correctamente, como hoy sabemos) que las galaxias eran más propensas a emitir señales de radio intensas en su juventud que en la actualidad, en su edad proveya.

Ryle presentó sus resultados el 6 de mayo de 1955, aprovechando que pronunciaba la prestigiosa Conferencia Halley (así nombrada en honor al famoso astrónomo del siglo XVII Edmond Halley). Sin llegar a mencionar nunca a Hoyle por su nombre, refiriéndose únicamente a «Bondi y compañía» como los padres del modelo del estado estacionario, el veredicto de Ryle no dejaba lugar a equívocos: «Si aceptamos la conclusión de que la mayoría de las estrellas de radio son externas a la galaxia, y esta es una conclusión que parece difícil de eludir, no parece que haya manera de explicar las observaciones dentro de la teoría del estado estacionario».

Ryle siguió con su ataque una semana más tarde, cuando, en la reunión del 13 de mayo de la RAS, él y su estudiante John Shakeshaft³⁶⁷ tuvieron el placer de terminar diciendo: «Debemos concluir que las regiones remotas del universo difieren de las de nuestra vecindad, un resultado que no es compatible con las teorías cosmológicas del estado estacionario pero que se podría explicar dentro de las teorías evolutivas».

Enfrentados a este grave desafío, Gold y Bondi, que asistían a la reunión de la RAS, se descubrieron actuando a la defensiva. Gold decidió recordar hábilmente al público que Ryle ya se había equivocado antes, y dijo que estaba «feliz de ver que ya hay acuerdo en cuanto a que muchas de estas fuentes probablemente sean extragalácticas³⁶⁸», como él mismo había sugerido cuatro años antes, cuando «*Mr. Ryle* [...] consideró que aquella sugerencia debía atribuirse a que no habíamos entendido bien los datos».

Luego añadió que, a juzgar por la información presentada, era «muy prematuro considerar que la gran mayoría de las fuentes débiles eran extremadamente lejanas». Advirtió que si las fuentes no eran todas iguales, sino que había un amplio abanico de intensidades entre las señales de radio intrínsecas, el recuento de Ryle de las fuentes débiles podía representar una mezcla confusa de fuentes lejanas y fuentes cercanas. Bondi también se mostró escéptico³⁶⁹ de la interpretación de los resultados de Ryle. A su entender, las incertidumbres que todavía existían en los recuentos no permitían inferencias concluyentes. Para reforzar su mensaje, recordó a la audiencia que los intentos anteriores dirigidos a determinar la geometría del universo a partir de recuentos de galaxias habían conducido a conclusiones dispares.

No hace falta decir que Hoyle no estaba de acuerdo con la interpretación de Ryle. Sin embargo, en lugar de enzarzarse en largas discusiones, decidió aguardar la llegada de mejores observaciones para volver a la superficie y refutar el hallazgo de Ryle. Para sorpresa de muchos astrónomos, esos resultados contradictorios acabaron por aparecer. Radioastrónomos australianos demostraron en 1957 que la prospección previa de Ryle contenía errores importantes: el mapa de fuentes de radio que había producido Ryle era tan borroso que a menudo se contaba como la mezcla de dos fuentes de radio. Las consecuencias estaban claras para los astrónomos australianos: «Las deducciones de interés cosmológico derivadas del análisis carecen de fundamento».

Hoyle ni se molestó en regocijarse. El año 1957 vio la publicación del celebrado B^2FH , y estaba mucho más absorto en la síntesis de los elementos que en la cosmología del estado estacionario. No obstante, no se le escapaba el hecho de que la síntesis de la mayoría de los núcleos en los centros de las estrellas (y no en el *big bang*) se podía ver como un apoyo (al menos parcial) de la tesis del estado estacionario. También aquel mismo año, Hoyle fue elegido miembro de la Real Sociedad, un honor que lo situó a la par de

Ryle en cuanto a su estatus académico. Pero Ryle no se rindió. Él y su equipo continuaron introduciendo mejoras significativas tanto a su instrumental como a la reducción y análisis de los datos. Sus esfuerzos desembocaron en la producción de la tercera generación del catálogo Cambridge de fuentes de radio (conocido como *Catálogo 3C*).

A principios de los años 1960, el grupo de Ryle tuvo a su disposición incluso un observatorio de radioastronomía completamente nuevo, financiado por la compañía de electrónica Mullard. Las rencillas intelectuales entre Ryle y Hoyle no cesaron, y culminaron en un incidente particularmente desagradable. Hoyle describiría más tarde esta traumática experiencia en su obra autobiográfica *Home Is Where the Wind Blows*. Todo comenzó a principios de 1961 con una llamada telefónica en apariencia inocente de la compañía Mullard. La persona del otro lado de la línea invitó a Hoyle y a su esposa a asistir a una conferencia de prensa en la que se esperaba que Ryle presentara nuevos resultados supuestamente de gran interés para Hoyle. Cuando llegaron a las oficinas centrales de Mullard en Londres, la esposa de Hoyle, Barbara, fue acompañada hasta un asiento en primera fila; a Hoyle lo llevaron a una silla en el escenario, de cara al público. No le cabía ninguna duda de que el anuncio estaría relacionado con el recuento de fuentes de radio según su intensidad, pero no podía creer que le hubieran invitado si los resultados contradecían la teoría del estado estacionario. En sus propias palabras:

¿Estaba siendo insensible al pensar que los nuevos resultados que Ryle estaba a punto de anunciar serían adversos a mi posición? Pero si fuesen adversos, ¿por qué iban a invitarme tan descaradamente? Lo cual seguramente significaba que Ryle iba a anunciar resultados en consonancia con la teoría del estado estacionario, para acabar con una elegante disculpa por sus desorientadores informes previos. Así que me puse a componer en mi cabeza una respuesta igualmente elegante³⁷⁰.

Lamentablemente, ocurrió justamente lo que a Hoyle le parecía impensable. Cuando Ryle apareció, en lugar de hacer una declaración breve, tal como había anunciado, se lanzó a una conferencia técnica, repleta de argot, sobre los resultados de su cuarta y más amplia prospección. Acabó declarando con toda seguridad que los resultados mostraban ahora sin ambigüedad una mayor densidad de fuentes de radio en el pasado, demostrando de este modo que la teoría del estado estacionario era errónea. Al estupefacto Hoyle solo le pidieron que comentara los resultados. Incrédulo y humillado, apenas pudo murmurar unas pocas frases y escapó del evento en cuanto pudo. El frenesí mediático que se produjo en los días siguientes repugnó a Hoyle hasta el punto que durante una semana no contestó al teléfono e incluso estuvo ausente del siguiente congreso de la RAS, el 10 de febrero. El propio Ryle se dio cuenta de que la conferencia de prensa había cruzado la línea de la decencia y llamó a Hoyle para pedirle disculpas, añadiendo que cuando aceptó participar en el evento de Mullard, «no tenía ni idea de lo malo que sería».

Sin embargo, en el frente puramente científico, a pesar de estas perturbadoras faltas de etiqueta, los argumentos de Ryle resultaban cada vez más convincentes, y a mediados de los años 1960, la gran mayoría de la comunidad astronómica coincidía en pensar que los proponentes de la teoría del estado estacionario habían perdido la batalla. (La figura 30 muestra, de izquierda a derecha, a Gold, Bondi y Hoyle en un congreso en la década de 1960). El descubrimiento de galaxias extremadamente activas³⁷¹, en las que la acreción de masa hacia agujeros negros centrales y supermasivos libera la radiación suficiente para superar la de la galaxia entera, afianzó la evidencia en contra de un universo en estado estacionario. Estos objetos, conocidos como *cuásares*, eran lo bastante luminosos como para poder observarse con telescopios ópticos. Su observación permitió a los astrónomos utilizar la ley de Hubble para determinar la distancia a estas fuentes y mostrar de una manera convincente que los cuásares eran, en efecto, más comunes en el

pasado que en el presente. No había manera de eludir la conclusión de que el universo estaba evolucionando y que en el pasado había sido más denso. Fue entonces cuando se abrió definitivamente la veda y ya no dejaron de producirse desafíos al modelo del estado estacionario. En particular, en 1964 los científicos Arno Penzias y Robert Wilson realizaron un descubrimiento que para todos, salvo sus más férreos defensores, significó el último clavo en el ataúd de la teoría del estado estacionario.



Figura 30

Penzias y Wilson estaban trabajando en los laboratorios de Bell Telephone en Nueva Jersey con una antena construida para satélites de comunicaciones. Para su fastidio, captaban un ruido de fondo de radio que parecía ser ubicuo, una radiación de microondas que parecía venir de todas las direcciones. Tras fracasar en sus intentos por explicar este perturbador «siseo» como un artefacto de sus instrumentos, Penzias y Wilson por fin anunciaron la detección de un exceso de temperatura intergaláctica de unos 3 Kelvin (3 grados por encima del cero absoluto). Ignorantes del contexto, en un principio Penzias y Wilson no se dieron cuenta de lo que habían descubierto. Sin embargo, Robert Dicke, de la Universidad de Princeton, reconoció de inmediato la señal. Dickie estaba trabajando en la construcción de un radiómetro con el que buscar vestigios de la radiación del *big bang*, que

anteriormente habían predicho Alpher, Hermann y Gamow. En consecuencia, su interpretación correcta de los resultados de Penzias y Wilson literalmente transformó la teoría del *big bang* de una hipótesis en física experimentalmente contrastada. A medida que el universo se expandía, la bola de fuego increíblemente caliente, densa y opaca se fue enfriando paulatinamente hasta alcanzar su temperatura actual de 2,7 Kelvin.

Desde entonces, las observaciones del fondo cósmico de microondas han producido algunas de las mediciones más precisas de la cosmología. La temperatura de esta radiación se conoce hoy con cuatro cifras significativas: 2,725 K; y su intensidad cambia con la longitud de onda justamente de la manera que cabría esperar de una fuente térmica, confirmando las predicciones del *big bang*. Pero aun a la vista de esta evidencia abrumadora y contraria a la teoría del estado estacionario, Hoyle nunca quedó convencido, y propuso que en lugar de representar un vestigio del *big bang*, la radiación del fondo de microondas se producía a causa de unos «pelitos» o filamentos de hierro extragalácticos que absorberían y dispersarían la luz infrarroja de las galaxias a longitudes de onda de microondas. Se suponía que estos filamentos de hierro se habrían condensado a partir de vapores metálicos, por ejemplo en el material eyectado por explosiones de supernovas.

Pese a todos los esfuerzos de Hoyle, desde mediados de la década de 1960 la mayoría de los científicos dejaron de prestarle atención a la teoría del estado estacionario. Los continuados intentos de Hoyle por demostrar que todos los conflictos entre la teoría y las nuevas observaciones se podían resolver parecían cada vez más forzados y menos plausibles. Y lo que es peor, parecía haber perdido aquel «fino juicio» que en otro tiempo había aconsejado y supuestamente lo distinguía de quien «se convierte en un chiflado». En un simposio internacional sobre «La cosmología moderna en retrospectiva», que se celebró en Bolonia (Italia) en 1988, dio una conferencia titulada «Una evaluación de las pruebas contra la teoría del

estado estacionario». En aquella anacrónica conferencia, Hoyle intentó (debo añadir que sin éxito) persuadir a su audiencia de que todas las convincentes pruebas empíricas acumuladas sobre el *big bang* (la existencia del fondo de radiación de microondas, la implícita necesidad de una síntesis primordial de los elementos ligeros deuterio, helio y litio, y los recuentos de las fuentes de radio), *todas* ellas se podían explicar³⁷² todavía desde la teoría del estado estacionario. La terca resistencia de Hoyle a cambiar de opinión contrasta fuertemente con la actitud adoptada, por ejemplo, por otro de los científicos que concibieron la teoría del estado estacionario, Hermann Bondi. Recuérdese que Bondi había insistido en que le enseñasen restos fósiles del universo del pasado, si es que en efecto el universo estaba evolucionando. En su propia presentación en aquel mismo simposio de Bolonia, Bondi admitió que efectivamente había aparecido aquella evidencia fósil, tanto en forma de la abundancia cósmica de helio, que se había demostrado que probablemente se había formado en el *big bang*, como en el fondo cósmico de microondas, que se ajustaba de maravilla a las predicciones del *big bang*. Bondi concluyó con elegancia: «Así pues, mi reto de hallar fósiles ha recibido respuesta tiempo después de que lo planteara».

Hoyle, en cambio, siguió defendiendo una versión un tanto modificada de la teoría del estado estacionario (que llamaba «estado cuasiestacionario»). Aun en el año 2000, a los ochenta y cinco años de edad, publicó un libro titulado³⁷³ *Una aproximación distinta a la cosmología: De un universo estático a través del Big Bang hasta la realidad*, en el que él y sus colaboradores, Jayant Narlikar y Geoff Burbidge, explicaban los detalles de la teoría del estado cuasiestacionario y sus objeciones al *big bang*. Para expresar su desdeñosa opinión sobre el *establishment* científico, en una de las páginas del libro presentaban una fotografía de una bandada de gansos andando por un camino de tierra; el pie de la imagen decía: «Así vemos la aproximación conformista de la cosmología estándar (el caliente *big bang*)». Para entonces, sin embargo, Hoyle llevaba tanto tiempo alejado de la

cosmología convencional que muy pocos se molestaron siquiera en señalar los defectos de la teoría modificada. Tal vez lo mejor que se dijo del libro apareció en la reseña publicada en el *Sunday Telegraph* de Inglaterra, y no se refería tanto al contenido del libro como a la fogosa personalidad de Hoyle: «Hoyle hace un repaso sistemático de la evidencia a favor de la teoría del *big bang* y le da una buena somanta [...] es difícil no sentirse impresionado por la audacia de su trabajo de demolición [...] Solo me cabe esperar que yo posea una milésima parte del espíritu combativo de Hoyle cuando, como él, haya alcanzado mis ochenta y cinco años».

Disidencia y negación

El error de Hoyle es un tanto diferente de los de Darwin, Kelvin y Pauling en dos aspectos importantes. Para empezar, está la cuestión de la escala del asunto en cuyo contexto se produjo el error. El error de Darwin implicaba solamente a un elemento de su teoría (aunque un elemento muy importante). El error de Kelvin concernía a una suposición que estaba en la base de un cálculo concreto (aunque de gran significación). El error de Pauling afectaba a un modelo específico (que lamentablemente resultó ser el de una molécula crucial). Pero el error de Hoyle concernía nada más y nada menos que a *una teoría entera* para el conjunto del universo. En segundo lugar, y más importante, Hoyle no cometió ningún error al proponer el modelo del estado estacionario, a diferencia de Darwin, que no comprendió las implicaciones de un mecanismo biológico equivocado; de Kelvin, que no tomó en consideración procesos físicos imprevistos; y de Pauling, que ignoró las reglas básicas de la química. La teoría en sí era audaz, excepcionalmente inteligente, y se ajustaba a todas las observaciones que existían en aquel momento. El error de Hoyle radica en su testarudo y casi irritante rechazo a reconocer la muerte de la teoría, incluso cuando esta estaba casi asfixiada por la acumulación de pruebas en su contra, y en su uso de criterios de juicio asimétricos con respecto a las teorías del *big bang* y del estado estacionario.

¿Qué fue lo que causó este comportamiento intransigente? Para responder a esta intrigante pregunta, empecé por buscar la opinión de algunos de los antiguos estudiantes y colaboradores más jóvenes de Hoyle.

El cosmólogo Jayant Narlikar fue estudiante de doctorado de Hoyle, y siguió colaborando con él durante toda la vida de este. Los dos investigadores desarrollaron, entre otras cosas, una teoría de la gravedad conocida como teoría de Hoyle-Narlikar, que se ajusta a su modelo de estado cuasiestacionario. Narlikar sugirió que el descontento³⁷⁴ de Hoyle con el modelo del *big bang* nacía, al menos en un principio, de la auténtica incomodidad que sentía Hoyle hacia algunas de las premisas físicas del *big bang*. Por ejemplo, Narlikar recordaba cómo Hoyle había señalado que todas las otras radiaciones de fondo que se habían observado (óptica, de rayos X, infrarroja) se habían podido asociar a objetos astrofísicos (estrellas, galaxias activas, etc). y que no veía razón para que el fondo cósmico de microondas fuese distinto y estuviese relacionado con un suceso singular (el *big bang*). De forma parecida, alrededor de 1956, pensó que de algún modo las estrellas podían producir la energía observada en el fondo cósmico de microondas, si se podía hallar una manera de sintetizar todo el helio en las estrellas. En un plano más emocional, Narlikar creía que el hecho de que Hoyle no fuese una persona religiosa podría haber contribuido a su objeción a un universo que había aparecido de golpe.

Los astrofísicos Peter Eggleton y John Faulkner fueron ambos estudiantes de investigación de Hoyle a principios de los años 1960 (Faulkner es la persona que aparece en el extremo de la derecha de la primera fila en la figura 22), pero me sorprendió un tanto descubrir que sus sentimientos eran bastante diferentes. Eggleton recordaba a Hoyle como una persona³⁷⁵ que sabía todo lo que merecía saberse de la astrofísica de su tiempo y que también conocía a todos los que eran alguien en el mundo de los astrofísicos. Señaló que una expresión caprichosa que se había utilizado para describir al estudioso de la época victoriana Benjamin Jowett³⁷⁶ se podía adoptar como una genuina

caracterización de Hoyle: «Lo que no conocía, no era conocimiento». En cuanto a la actitud de Hoyle hacia la ciencia, la actitud de Eggleton era que si la comunidad científica creía algo, Hoyle se sentía inclinado a creer lo contrario para ver hasta dónde podía llegar. Cuando le insistí sobre el porqué de la renuencia de Hoyle a aceptar el *big bang*, Eggleton expresó el parecer de que en la raíz de su resistencia estaba el rechazo de Hoyle a la idea de que la vida en la Tierra hubiera surgido a través de una evolución química natural. Según Eggleton, Hoyle insistía en que el origen de la vida requería mucho más tiempo que la edad del universo inferida a partir del *big bang*. Este es un aspecto interesante sobre el que volveremos enseguida.

Faulkner admitió que a él mismo³⁷⁷ le había desconcertado la posición inflexible de Hoyle hacia el *big bang*. En su opinión, a Hoyle «se le fue la olla un poco; tan enamorado como estaba de su criatura [la teoría del estado estacionario], que no quería abandonarla». Hizo también otro comentario interesante: que a finales de los años 1960, el interés de Hoyle por lo que podríamos llamar «ciencia normativa» había decaído, dando paso a una actitud más heterodoxa.

Martin Rees, Real Astrónomo³⁷⁸ de Gran Bretaña, sucedió a Hoyle como Profesor Plumiano y como director del Instituto de Astronomía de la Universidad de Cambridge. Recuerda con cariño a Hoyle, siempre dispuesto a apoyarlo aunque parte del trabajo de Rees sobre el fondo cósmico de microondas y sobre cuásares contribuyó a demoler la teoría del estado estacionario. Rees todavía tiene la más alta opinión de Hoyle; incluso tiene una fotografía de su predecesor en su oficina del Instituto de Astronomía. Rees propuso dos interesantes causas potenciales de la disidencia de Hoyle. En primer lugar, hizo hincapié en los efectos negativos del aislamiento científico. Explicó que más o menos desde mediados de los años 1960, Hoyle prácticamente solo hablaba de ciencia con sus colaboradores más cercanos: un grupo muy pequeño en el que estaban Jayant Narlikar, Chandra Wickramasinghe y los Burbidge. Como estos científicos nunca o casi nunca

contradecían a Hoyle, está claro que esta no era la mejor receta para cambiar las opiniones propias. Para mi sorpresa, Rees me dijo que si bien Hoyle siempre había sido muy generoso y presto a darle ánimos, casi nunca había discutido con él sobre ciencia. De hecho, Hoyle no contrastaba sus opiniones sobre nuevos descubrimientos científicos con ningún cosmólogo joven fuera de su círculo de simpatizantes.

Rees hizo otra valoración interesante que recuerda a uno de los comentarios de Faulkner. Lo que dijo fue que en los últimos estadios de su vida profesional, algunos científicos pierden interés por los progresos regulares y paulatinos que suelen caracterizar buena parte de los esfuerzos de los científicos, y dirigen su atención a ramas de la ciencia completamente nuevas, a veces incluso fuera de su campo de conocimiento. Como ejemplo de este fenómeno, Rees señaló la preocupación casi obsesiva de Linus Pauling por la vitamina C durante los últimos años de su carrera, y dijo ver bajo una luz parecida los mal encaminados esfuerzos de Hoyle sobre el origen de la vida en la Tierra.

No cabe duda de que los factores sugeridos por Rees, Eggleton y Faulkner contribuyeron en mayor o menor medida a la obstinación de Hoyle. La mejor prueba de que es así la encontramos en algunas declaraciones del propio Hoyle. En *Home Is Where the Wind Blows*, escribió un sorprendente párrafo: El problema del *establishment* científico se remonta a las pequeñas partidas de caza de la prehistoria. Debía ocurrir entonces que, para que una cacería tuviera éxito, se necesitara el grupo entero. Como la dirección en que se encontraban las presas era incierta, igual que en la ciencia al principio es incierta la dirección de la teoría correcta, el grupo tenía que tomar una decisión sobre adónde ir, aunque fuese al azar. El disidente que argumentase que la dirección correcta era justamente la opuesta de la elegida tenía que ser expulsado del grupo, del mismo modo que, en la actualidad, el científico que adopta una opinión distinta del consenso encuentra que las revistas rechazan sus artículos y que sus solicitudes de proyectos son negadas

sumariamente por las agencias estatales. La vida debió ser dura en la prehistoria, pues cuanto más tiempo pasaba una partida sin encontrar presas en la dirección elegida, más tenía que continuar en aquella dirección, pues pararse a discutir conllevaría incertidumbre y el riesgo de que surgiesen diferencias de opinión, con la desastrosa posibilidad de que el grupo se dividiera. Es por ello por lo que la mayor prioridad entre los científicos no es la corrección, sino que todo el mundo piense lo mismo. Es esta motivación primitiva y tal vez instintiva lo que crea el *establishment*³⁷⁹.

Es difícil imaginar una defensa más tenaz de la disensión respecto a la corriente general de la ciencia. Hoyle se hace eco de las palabras de Galeno de Pérgamo, el influyente médico del siglo II: «Desde mi juventud he rechazado³⁸⁰ la opinión de la multitud y he anhelado la verdad y el conocimiento, pues no creo que haya para el hombre posesión más noble o divina». Sin embargo, como Rees ha señalado, el aislamiento tiene un precio. La ciencia no progresa a lo largo de una línea recta de A a B sino que sigue un camino en zigzag modelado por la reevaluación crítica y las interacciones que ayudan a encontrar los fallos. La evaluación continua proporcionada por el *establishment* científico que tanto desdeñaba Hoyle es lo que crea los controles y verificaciones que impiden que los científicos se desvíen demasiado en la dirección equivocada. Al imponerse a sí mismo el aislamiento académico, Hoyle se negó esas fuerzas correctoras.

Las idiosincrásicas ideas de Hoyle sobre el origen de la vida sin duda contribuyeron a que no abandonase la teoría del estado estacionario. He aquí como lo expresaba el propio Hoyle:

El punto de vista filosófico adecuado, según creo, para reflexionar sobre la evolución en un plano cosmológico plantea cuestiones que son superastronómicas, como inevitablemente ocurre cuando se intenta comprender el origen del orden biológico. Enfrentados a problemas de un orden de complejidad superastronómico, los biólogos han recurrido a cuentos de hadas. Esto se hace patente cuando se considera el orden de los

aminoácidos en cualquiera de un centenar de enzimas [Hoyle estimaba que la probabilidad de que se formasen dos mil enzimas *al azar* a partir de aminoácidos era de uno en $10^{40\ 000}$] [...] para tener alguna esperanza de resolver el problema de los orígenes biológicos de una manera racional se *requiere un universo con un lienzo esencialmente ilimitado* [cursiva añadida], un universo en el que la entropía por unidad de masa [una medida del desorden] no aumente de manera inexorable, como ocurre en las cosmologías del *big bang*. Es para proporcionar ese lienzo ilimitado por lo que se requiere la teoría del estado estacionario, o al menos eso pienso.

En otras palabras, Hoyle creía que un universo en evolución, con el aumento de desorden que le acompaña, no proporciona las condiciones necesarias para que surja algo tan ordenado como la biología. Tampoco creía que la edad del universo, inferida por el valor de la constante de Hubble, fuese suficiente para que se formasen moléculas complejas. Debo dejar claro que la corriente principal de la biología evolutiva rechaza de plano este argumento. En esencia, Hoyle intentaba revivir la «analogía del relojero» que caracterizó todos los argumentos del diseño inteligente y que comparaba el origen al azar de una célula viva con la probabilidad de que «un tornado que barre una chatarrería monte un Boeing 747 con los materiales que encuentra». El biólogo Richard Dawkins denominó³⁸¹ a este razonamiento «falacia de Hoyle», y señalaba que la biología no requiere que las estructuras complejas de la vida aparezcan en un solo paso. Los organismos que pueden reproducirse a sí mismos pueden generar complejidad por medio de cambios sucesivos, mientras que los objetos inanimados son incapaces de transmitir modificaciones reproductoras.

Para ir algo más allá de estas explicaciones parciales del error de Hoyle, sobre todo por lo que respecta a su negación a reconocer su error, necesitamos entender algo mejor el concepto de negación. La negación raramente suscita simpatía³⁸², especialmente en círculos científicos. Por buenas razones, los científicos ven este tipo de negación como algo

contradictorio con el espíritu investigador, que implica que las viejas teorías tienen que dar paso a otras nuevas cuando los resultados experimentales así lo requieran. Pero la investigación la llevan a cabo seres humanos, y el propio Sigmund Freud había postulado que los humanos han desarrollado la negación como mecanismo de defensa ante los traumas o las realidades externas que amenazan al ego. A todos nos resulta familiar, por ejemplo, la negación como primero de los cinco estadios reconocidos del duelo. Lo que tal vez se conozca menos es que la experiencia de estar equivocado en una empresa importante constituye un trauma de igual magnitud. El sistema judicial aporta muchos ejemplos que indican que realmente es así. Se han producido bastantes incidentes en los que tanto las víctimas de crímenes violentos como los abogados de la acusación se han negado firmemente a creer que la persona que inicialmente fue hallada culpable fuese en realidad inocente, incluso cuando una prueba de ADN o un nuevo testimonio exonerasen a esa persona de manera concluyente. La negación ofrece a la mente atormentada una forma de evitar reabrir unas experiencias que ya se creían definitivamente superadas. Es obvio que el hecho de equivocarse en una teoría científica no puede compararse con errar en la condena de una persona inocente, pero se trata sin duda de una experiencia traumática, y cabe suponer que la negación, en este sentido, puede haber jugado un papel en el error de Hoyle.

Ya he señalado varias veces que la *idea* de un universo en estado estacionario fue brillante en el momento en que se propuso. Visto desde nuestros días, el universo estacionario, con su continua creación de materia, comparte muchas características con los modelos hoy tan en boga de un universo inflacionario: la conjetura de que el cosmos experimentó un acelerón de crecimiento más rápido que la luz cuando tenía menos de una fracción de segundo de existencia. En algunos aspectos, el universo en estado estacionario es simplemente un universo en el que la inflación siempre ocurre. El físico Alan Guth propuso la inflación³⁸³ en 1981 para

explicar, entre otras cosas, la homogeneidad e isotropía cósmicas. A Hoyle le gustó señalar entonces que en un artículo que había publicado en 1963 con Narlikar, habían demostrado que el campo de creación que proponían «actúa de tal modo que suaviza una inicial anisotropía [dependencia de la dirección] o inhomogeneidad [desviación de la uniformidad]», y que «parece que el universo alcanza la regularidad observada con independencia de las condiciones de contorno iniciales». Estas son precisamente las propiedades³⁸⁴ que hoy se atribuyen a la inflación. La genialidad de Hoyle también se puso de manifiesto en el hecho de que perteneció a ese pequeño grupo de científicos que son capaces de investigar en paralelo dos teorías mutuamente incongruentes. A pesar de que se resistió al *big bang* durante toda su vida, Hoyle hizo algunas contribuciones importantes³⁸⁵ a la nucleosíntesis durante el *big bang*, en particular en lo que concierne a la abundancia cósmica de helio y a la síntesis de elementos a muy altas temperaturas. Lord Rees describió en una ocasión a Hoyle como «el astrofísico más creativo y original de su generación». En mi humilde condición de astrofísico, debo decir que estoy completamente de acuerdo. Aunque con el tiempo se demostrasen erróneas, las teorías de Hoyle fueron siempre dinamizadoras, y nunca dejaron de estimular campos enteros y de catalizar nuevas ideas. No es de extrañar que la estatua de Hoyle (figura 31) se alce hoy justo afuera del edificio que lleva su nombre en el Instituto de Astronomía de Cambridge, que el mismo fundó en 1966.



Figura 31

Por importante que fueran las aportaciones de Hoyle, no cabe duda de que la persona a quien más debemos nuestra actual comprensión de cómo funciona el cosmos en general es Albert Einstein. Sus teorías de la relatividad especial y general revolucionaron completamente nuestra perspectiva sobre dos de los conceptos más básicos de la existencia: el espacio y el tiempo. Y, sin embargo, la expresión «mayor error» ha quedado íntimamente asociada a una de las ideas de este científico, el más icónico de todos los tiempos.

Capítulo 10

El « mayor error »

*Mi disciplina dispersa las galaxias pero
une la Tierra. ¡Esperemos que ninguna
«repulsión cósmica» intervenga y nos
desgarre!*

Sir Arthur Eddington

Cuando lanzo las llaves al aire, alcanzan una altura máxima y caen de nuevo a mis manos. Solo por un instante están quietas las llaves: cuando alcanzan el punto más alto. Obviamente, la atracción gravitatoria de la Tierra es la responsable de este comportamiento. Si de algún modo pudiese lanzar las llaves a una velocidad superior a unos once kilómetros por segundo, escaparían de la Tierra, como hizo, por ejemplo, la nave Pioneer 10, con la que se perdió la comunicación en 2003, cuando la sonda se encontraba a más de once mil millones de kilómetros de la Tierra. Sin embargo, si no hay otra fuerza que se oponga, la gravedad sola impide que las llaves se queden suspendidas en el aire.

Dos científicos demostraron de manera independiente en la década de 1920 que cabía esperar que el comportamiento del espacio-tiempo cósmico fuese muy parecido. Estos dos investigadores, el matemático y meteorólogo ruso Aleksandr Friedmann y el sacerdote y cosmólogo francés Georges Lemaître, aplicaron al universo como un todo la teoría general de la relatividad de Einstein. Enseguida se dieron cuenta de que la atracción gravitatoria de toda la materia y la radiación del universo implica que el espacio-tiempo, la combinación de espacio y tiempo definida por Einstein, puede estirarse o contraerse, pero no quedarse quieto con una extensión fija. Estos importantes hallazgos condujeron al contexto teórico que permitió a Lemaître

y Hubble descubrir que nuestro universo se está expandiendo. Pero será mejor que comencemos por el principio.

En 1917, el propio Einstein fue el primero³⁸⁶ que intentó comprender la evolución del universo entero a la luz de sus ecuaciones de la relatividad general. Este esfuerzo inició la transformación de los problemas cosmológicos desde la especulación filosófica hasta la física. Todavía no se había descubierto la expansión del universo. Es más, no solo Einstein desconocía cualquier observación de movimientos a gran escala, sino que hasta aquel momento, la mayoría de los astrónomos todavía creían que el universo estaba formado exclusivamente por nuestra galaxia de la Vía Láctea; que más allá no había nada. Las observaciones del astrónomo Vesto Slipher del *corrimiento al rojo* (los estiramientos de la luz que más tarde se interpretarían como velocidades de recesión de galaxias) de las «nebulosas» no eran muy conocidas por aquel entonces, y aún menos entendidas. El astrónomo Heber Curtis presentó algunas pruebas preliminares de que la galaxia de Andrómeda, M31, podría encontrarse fuera de la Vía Láctea, pero no fue hasta 1924 cuando Edwin Hubble confirmó inequívocamente³⁸⁷ este profundo hecho: que nuestra galaxia no es el universo entero.

Convencido en 1917 de que el cosmos era inmutable y estático a su mayor escala, Einstein tuvo que encontrar el modo de impedir que el universo que describían sus ecuaciones se colapsara bajo su propio peso. Para lograr una configuración estática con una distribución uniforme de la materia, Einstein conjeturó que debía haber alguna fuerza de repulsión que contrarrestara de manera precisa la gravedad. En consecuencia, algo más de un año después de publicar su teoría de la relatividad general, a Einstein se le ocurrió lo que, a primera vista, parecía una solución brillante. En un influyente artículo titulado «Consideraciones cosmológicas sobre la teoría general de la relatividad», introdujo en sus ecuaciones un nuevo término que daba lugar a un efecto sorprendente: ¡una fuerza de repulsión gravitatoria! La repulsión cósmica supuestamente actuaba en todo el universo, haciendo que cada

parte del espacio empujase sobre cualquier otra parte, justo lo contrario de lo que hacen la materia y la energía. Como pronto descubriremos, la masa y la energía distorsionan el espacio-tiempo de tal manera que la materia tiende a agregarse. El nuevo término cosmológico tenía el efecto de distorsionar el espacio-tiempo en el sentido contrario, haciendo que la materia se separase. El valor de la nueva constante que introdujo Einstein (además de la conocida fuerza de la gravedad) determinaba la fuerza de la repulsión. Esta nueva constante se designaba con la letra griega lambda, Λ , y recibía el nombre de *constante cosmológica*. Einstein demostró que podía escoger el valor de la constante cosmológica de manera que la fuerza gravitatoria de atracción y la de repulsión quedasen perfectamente equilibradas, dando lugar a un universo estático, eterno, homogéneo e inmutable de un tamaño fijo. Este modelo se conocería más tarde como el «universo de Einstein». Einstein concluyó su artículo con lo que resultó ser un comentario preñado de significado: «Este término es necesario *solamente* [la cursiva es mía] para el propósito de hacer posible una distribución cuasi-estática de la materia, tal como requiere el hecho de las pequeñas velocidades de las estrellas³⁸⁸». Como se habrá notado, Einstein habla aquí de «velocidades de estrellas», no de galaxias, puesto que la existencia y movimientos de estas últimas todavía se encontraban más allá de los horizontes astronómicos de la época.

Con pocas excepciones, a toro pasado todo se ve muy claro. Los cosmólogos tienden a resaltar el hecho de que al introducir la constante cosmológica, Einstein perdió una oportunidad de oro para hacer una predicción espectacular. Si se hubiera aferrado a sus ecuaciones originales, podría haber predicho con más de una década de antelación respecto a las observaciones de Hubble que el universo debería estar contrayéndose o expandiéndose. No hay duda de que eso es cierto. Sin embargo, como argumentaré en el próximo capítulo, la introducción de la constante cosmológica también podría haber constituido una predicción igualmente significativa.

Cabe preguntarse cómo pudo añadir Einstein en sus ecuaciones este nuevo término de repulsión sin tirar abajo todos los otros éxitos de la teoría general de la relatividad como explicación de diversos fenómenos desconcertantes. Por ejemplo, la relatividad general esclareció la ligera desviación de la órbita del planeta Mercurio en cada vuelta sucesiva alrededor del Sol. Como es natural, Einstein era consciente de que su constante cosmológica podía echar por tierra la concordancia con las observaciones, y para evitar consecuencias indeseables, modificó sus ecuaciones de manera que la repulsión cósmica aumentara en proporción a la separación espacial³⁸⁹. Es decir, la repulsión era imperceptible a la escala de distancias del sistema solar, pero se hacía apreciable a grandes distancias cosmológicas. Así se preservaban todas las verificaciones experimentales de la relatividad general, que se basaban en mediciones sobre distancias relativamente cortas.

Inexplicablemente, Einstein cometió un sorprendente error al pensar que la constante cosmológica produciría un universo estático. Aunque formalmente la modificación permitía una solución estática de las ecuaciones, esa solución describía un estado de *equilibrio inestable* (como en un lápiz de pie sobre la punta o una bola en lo alto de una colina), de manera que la más pequeña desviación del estado de reposo tenía como resultado fuerzas que desplazaban al sistema todavía más lejos del equilibrio. Se puede entender esto sin la ayuda de una matemática sofisticada. La fuerza de repulsión aumenta con la distancia, mientras que la fuerza de atracción de la gravedad disminuye con la distancia. En consecuencia, aunque se puede encontrar una densidad de masa a la cual las dos fuerzas se contrarrestan exactamente, cualquier perturbación en forma de, por ejemplo, una pequeña expansión, *aumentaría* la fuerza de repulsión y *reduciría* la de atracción, dando lugar a una expansión acelerada. De manera parecida, la más mínima contracción tendría como resultado un colapso total. Eddington fue el primero en señalar este error en 1930³⁹⁰, aunque atribuyó la perspicacia a Lemaître. Sin embargo, para entonces ya era un hecho conocido que el universo se estaba

expandiendo, así que este defecto concreto del universo estático de Einstein ya no revestía ningún interés. Debo añadir que en su artículo original, Einstein no especificó ni el origen físico de la constante ni sus características precisas. Volveremos a ocuparnos de estas interesantes cuestiones (y de cómo puede la gravedad ejercer un empuje de repulsión) en el próximo capítulo.

Pese a estas cuestiones irresueltas, Einstein estaba bastante satisfecho de haber logrado (o así lo creía) construir un modelo de un universo estático, un cosmos que consideraba compatible con el pensamiento astronómico dominante. Al principio, también estaba satisfecho con la constante cosmológica por otra razón. La nueva modificación de las ecuaciones originales del campo gravitatorio parecían armonizar la teoría con algunos principios filosóficos que Einstein había utilizado anteriormente al concebir la relatividad general. En concreto, las ecuaciones originales (sin la constante cosmológica) parecían requerir lo que los físicos llaman «condiciones de contorno», es decir, la especificación de un conjunto de valores para cantidades físicas a distancias infinitas. Esto parecía incongruente con el «espíritu de la relatividad», en palabras de Einstein. A diferencia de los conceptos de Newton sobre el espacio y el tiempo absolutos, una de las premisas básicas de la relatividad general era que no había un sistema de referencia absoluto. Además, Einstein había insistido en que la distribución de la materia³⁹¹ y la energía debía determinar la estructura del espacio-tiempo. Por ejemplo, un universo en el que la distribución de la materia se desvanece en la nada no habría resultado satisfactorio, pues el espacio-tiempo no se podía definir adecuadamente sin la presencia de masa o energía. Sin embargo, para disgusto de Einstein, las ecuaciones originales admitían como solución un espacio *vacío*. Por eso le complació descubrir que el universo estático no necesitaba ninguna condición de contorno, puesto que era finito y curvado sobre sí mismo como la superficie de una esfera, sin contorno alguno. En este universo, un rayo de luz regresaba a su punto de

origen antes de comenzar un nuevo circuito. En este sentido filosófico, Einstein, como antes que él Platón, siempre rehuyó los extremos abiertos, eso que el filósofo Georg Wilhelm Hegel había llamado «mal infinito».

Me doy perfecta cuenta de que los lectores que tengan un poco olvidada la relatividad general agradecerán un recordatorio, así que aquí va un breve repaso de sus principios fundamentales.

La distorsión del espacio-tiempo

En su teoría de la relatividad especial³⁹², que precedió a su articulación de la relatividad general, Einstein se deshacía de la idea de Newton de un tiempo absoluto o universal, el que supuestamente medirían todos los relojes. El objetivo de Newton era presentar simétricamente el tiempo absoluto y el espacio absoluto. Con esta pretensión, declaró: «El tiempo absoluto, verdadero y matemático, por sí mismo y por su propia naturaleza fluye igualmente sin relación con nada externo». Al convertir en el tema central de la relatividad especial el postulado de que todos los observadores deberían medir *la misma* velocidad de la luz, con independencia de lo rápido que se desplacen o en qué dirección lo hagan, Einstein tuvo que pagar el precio de vincular para siempre el espacio y el tiempo en una única entidad entretejida que llamó espacio-tiempo. Son muchos los experimentos que desde entonces han confirmado el hecho de que no coinciden los intervalos de tiempo medidos por dos observadores que se desplacen el uno respecto al otro. El caso más reciente se produjo en 2010 cuando, al comparar dos relojes atómicos ópticos conectados con fibra óptica, investigadores del Instituto Nacional de Patrones y Tecnología consiguieron observar este efecto de «dilatación del tiempo» incluso para velocidades relativas³⁹³ de tan solo ¡35 kilómetros por hora!

Dado el papel central que desempeñaba la luz (o, de manera más general, de la radiación electromagnética) en la teoría, la relatividad especial fue hecha a medida para que concordase con las leyes que describían la

electricidad y el magnetismo. De hecho, Einstein tituló el artículo de 1905 en el que presentaba su teoría, «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento». Sin embargo, ya en 1907 comenzaba a ser consciente de que la relatividad especial era incompatible con la gravedad de Newton. La fuerza de la gravitación de Newton supuestamente actuaba de manera instantánea por todo el espacio. La implicación de esto sería que, por ejemplo, cuando nuestra galaxia, la Vía Láctea, y la galaxia de Andrómeda choquen de aquí a unos pocos miles de millones de años, el cambio en el campo gravitatorio debido a la redistribución de masa se dejaría sentir al instante por todo el cosmos. Esta condición entraba claramente en conflicto con la relatividad especial, pues significaba que la información puede viajar más deprisa que la luz, algo que la relatividad especial no permitía. Además, el solo concepto de simultaneidad en todo el cosmos requeriría la existencia de aquel mismo tiempo universal que la relatividad especial había invalidado con tanto esmero. Aunque Einstein no habría utilizado este ejemplo concreto en 1907 porque lo desconocía, entendía perfectamente el principio. Para superar estas dificultades (y, en particular, para permitir que su teoría también se aplicase al movimiento acelerado), Einstein se embarcó en una ruta bastante sinuosa con muchos tropiezos pero que finalmente le condujo a la relatividad general.

La relatividad general todavía es considerada por muchos la teoría física más ingeniosa jamás articulada. El famoso físico Richard Feynman confesó en una ocasión: «Todavía no llego a comprender cómo pudo ocurrírsele». La teoría se basaba fundamentalmente en dos ideas³⁹⁴ originales y profundas: (1) la equivalencia entre la gravedad y la aceleración, y (2) la transformación del papel del espacio-tiempo de un espectador pasivo en un protagonista principal en el drama de la dinámica universal. En primer lugar, al reflexionar sobre la experiencia de una persona en caída libre³⁹⁵ en el campo gravitatorio de la Tierra, Einstein comprendió que la aceleración y la gravedad son esencialmente indistinguibles. Una persona que viviera en la

Tierra dentro de un ascensor cerrado impulsado hacia arriba con una aceleración constante, creería que vive en un lugar con una gravedad más fuerte; de hecho, una balanza de baño registraría un peso mayor que el suyo normal. De manera parecida, los astronautas de la lanzadera espacial experimentaban «ingravidez» porque tanto ellos como la lanzadera estaban sometidos a la misma aceleración con respecto a la Tierra. En su Conferencia de Kioto de 1922, un discurso espontáneo a estudiantes y profesores, Einstein explicó cómo se le había ocurrido la idea: «Estaba sentado en una silla en la oficina de patentes de Berna cuando de repente me asaltó una idea: "Una persona en caída libre no sentirá su propio peso". Me quedé sorprendido. Esta simple idea me produjo una enorme impresión. Me empujó hacia una teoría de la gravitación».

La segunda idea de Einstein cambió completamente la gravedad de Newton. Lo que Einstein expuso es que la gravedad no es ninguna fuerza misteriosa que actúa a través del espacio, sino que la masa y la energía distorsionan el espacio-tiempo del mismo modo que una persona sobre un trampolín hace que este se combe. Einstein definió la gravedad como la curvatura del espacio-tiempo. Así, los planetas se desplazan por el camino más corto en el espacio-tiempo curvado por el Sol, del mismo modo que una pelota de golf sigue la ondulación del *green* o que un Jeep sorteja las dunas en el desierto del Sahara. Tampoco la luz viaja en línea recta, sino que se curva en el espacio distorsionado cerca de las grandes masas. La figura 32 muestra una carta escrita por Einstein en 1913, cuando todavía estaba desarrollando la teoría. En la misiva, dirigida al astrónomo estadounidense George Ellery Hale, Einstein explica la curvatura de la luz en un campo gravitatorio y la deflexión por el Sol de la luz proveniente de una estrella lejana. Esta crucial predicción fue puesta a prueba por primera vez en 1919, durante un eclipse de Sol. La persona que organizó las observaciones (en Brasil y en la isla de Príncipe en el golfo de Guinea) fue Arthur Eddington, y las desviaciones registradas por su equipo³⁹⁶ y por la expedición dirigida por el astrónomo

irlandés Andrew Crommelin (de aproximadamente 1,98 y 1,61 segundos de arco) resultaron ser coherentes, dentro de los errores de observación estimados, con la predicción de Einstein de 1,74 segundos de arco. (La gravedad newtoniana predecía la mitad de esa cifra). El tiempo también está «curvado» en la relatividad general: los relojes situados cerca de cuerpos muy masivos hacen tictac más despacio que los que están lejos. Hay experimentos que confirman este efecto³⁹⁷, que también toman en cuenta los satélites del GPS.



Figura 32

La premisa crucial de Einstein en la relatividad general era una idea verdaderamente revolucionaria: lo que percibimos como la fuerza de la gravedad no es más que una manifestación del hecho de que masa y energía producen una distorsión del espacio-tiempo. En este sentido, Einstein estaba más cerca, al menos en espíritu, a las concepciones geométricas (en

oposición a dinámicas) de los astrónomos de la antigua Grecia que a Newton con su énfasis en las fuerzas. En lugar de ser un telón de fondo rígido y fijo, el espacio-tiempo puede flexionarse, curvarse y estirarse como respuesta a la presencia de materia y energía, y esas distorsiones provocan a su vez que la materia se desplace del modo que lo hace. En palabras del influyente físico John Archibald Wheeler, «La materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse, y el espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse». Materia y energía se convierten en compañeros eternos del espacio y el tiempo.

Al introducir la relatividad general, Einstein resolvió de una manera espectacular el problema de la propagación de la fuerza de la gravedad más rápido que la luz, el problema que incordiaba a la teoría de Newton. En la relatividad general, la velocidad de transmisión queda reducida a lo rápido que puedan viajar de un lugar a otro las ondas en el tejido del espacio-tiempo. Einstein mostró que esas distorsiones y expansiones, las manifestaciones geométricas de la gravedad, viajan exactamente a la velocidad de la luz. En otras palabras, los cambios en el campo gravitatorio no se pueden transmitir de manera instantánea.

¿Qué hay en una palabra?

Por feliz que estuviera Einstein con su constante cosmológica y su universo estático, su satisfacción no tardaría en evaporarse, pues nuevos descubrimientos científicos hicieron insostenible el concepto de un universo estático. Primero hubo algunas decepciones teóricas³⁹⁸, la más temprana de las cuales golpeó casi de inmediato. Apenas un mes después de la publicación del artículo cosmológico de Einstein, su amigo y colega profesional Willem de Sitter halló una solución³⁹⁹ a las ecuaciones de Einstein sin materia en absoluto. Un universo desprovisto de materia entraba sin duda en contradicción con la aspiración de Einstein de enlazar la geometría del universo con su masa y su contenido de energía. Por otro lado, el propio De Sitter estaba bastante satisfecho, ya que desde el primer momento había

objetado a la introducción de la constante cosmológica. En una carta a Einstein fechada el 20 de marzo de 1917, argumentaba que la λ tal vez fuese deseable desde un punto de vista filosófico, pero no desde un punto de vista físico. Lo que más le perturbaba era el hecho de que la constante cosmológica no se pudiera determinar empíricamente. En aquel momento, el propio Einstein mantenía la mente abierta a todas las opciones. En su respuesta a De Sitter, el 14 de abril de 1917, escribió proféticamente en un bello párrafo, que recuerda mucho al célebre de Darwin: «En el futuro lejano [...] Se arrojará luz sobre el origen del hombre y sobre su historia» (véase el capítulo 2):

En cualquier caso, una cosa sí se sostiene. La teoría general de la relatividad *permite* la inclusión de $\Lambda_{\mu\nu}$ [el término cosmológico] en las ecuaciones de campo. Un día, nuestro conocimiento real de la composición del firmamento de las estrellas fijas, los movimientos aparentes de las estrellas fijas y la posición de las líneas espectrales en función de la distancia, probablemente lleguen lo bastante lejos para permitirnos decidir empíricamente la cuestión de si Λ desaparece o no. La convicción es una buena motivadora, ¡pero un mal juez!

Como veremos en el siguiente capítulo, Einstein predijo precisamente lo que los astrónomos conseguirían ochenta y un años más tarde. Pero en 1917, los reveses no dejaban de llegar. Aunque el modelo de De Sitter a primera vista parecía ser estático, no era más que una ilusión. Análisis posteriores realizados por los físicos Felix Klein y Hermann Weyl mostraron que cuando se inserían en él cuerpos de prueba, estos no quedaban en reposo, sino que se apartaban unos de otros.

El segundo golpe teórico vino de Aleksandr Friedmann. Como ya se ha dicho, Friedmann mostró en 1922 que las ecuaciones de Einstein (con o sin el término cosmológico) permitían soluciones no estáticas en las que el universo se expandía o se contraía. Esto incitó al decepcionado Einstein a escribir el 1923 a su amigo Weyl: «Si no hay un mundo cuasi-estático, hay

que deshacerse del término cosmológico⁴⁰⁰». Pero el desafío más grave vino de las observaciones. Como ya hemos visto en el capítulo 9, Lemaître (tentativamente) y Hubble (inequívocamente) demostraron a finales de la década de 1920 que, al final, el universo no era estático, sino que se estaba expandiendo. Einstein comprendió de inmediato las implicaciones de un universo en expansión, en el que la fuerza de atracción de la gravedad se limita a frenar la expansión. Tras el descubrimiento de Hubble se vio obligado a admitir que ya no había necesidad de un delicado número de equilibrio entre la atracción y la repulsión; en consecuencia, la constante cosmológica se podía sacar de las ecuaciones. En un artículo publicado en 1931⁴⁰¹, abandonó formalmente el término, pues «la teoría de la relatividad parece satisfacer de manera más natural los recientes resultados obtenidos por Hubble [...] sin necesidad del término Λ ». Más tarde, en 1931, en un artículo que Einstein publicó conjuntamente con De Sitter⁴⁰², los autores llegaron a la siguiente conclusión: «Históricamente el término que contiene la "constante cosmológica" Λ fue introducido en las ecuaciones de campo con el fin de permitirnos explicar teóricamente la existencia de una densidad media finita en un universo estático. Ahora parece que en el caso dinámico este extremo puede alcanzarse sin la introducción de Λ ».

Einstein era consciente del hecho de que sin la constante cosmológica, la tasa de expansión medida por Hubble daba una edad del universo incómodamente corta en comparación con las edades estimadas para las estrellas, pero al principio sostuvo la opinión de que el problema podía estar con las segundas. La mayor contribución al error de la tasa de expansión determinada mediante observaciones no pudo corregirse hasta mediados de la década de 1960, pero las incertidumbres de un factor de aproximadamente dos en la tasa se mantuvieron hasta la llegada del Telescopio Espacial Hubble. Sorprendentemente, sin embargo, la constante cosmológica que ya se había desterrado regresó a bombo y platillo en 1998.

Como ya se habrá observado, el lenguaje utilizado por Einstein y De Sitter con relación a la constante cosmológica es benigno; se limitan a señalar que en un universo en expansión ya no es necesaria. Sin embargo, si se lee casi cualquier crónica de la historia de la constante cosmológica, casi con seguridad se encontrará el relato de que Einstein denunció la introducción de esta constante en su ecuación como su «mayor error». ¿Realmente dijo eso Einstein? Y, de ser así, ¿por qué?

Después de escudriñar todos los documentos disponibles, confirmé algo que unos pocos historiadores de la ciencia ya habían sospechado: la historia de que Einstein llamó a la constante cosmológica su mayor error se originó en una sola fuente: el expresivo George Gamow. Recuérdese que Gamow fue responsable de la idea de la nucleosíntesis durante el *big bang*, y también de algunas de las primeras reflexiones sobre el código genético. James Watson, el codescubridor de la estructura del ADN, dijo en cierta ocasión sobre Gamow que estaba «muy a menudo un paso por delante de todos los demás». Gamow explicó lo del «mayor error» en dos lugares. En un artículo titulado «El universo en evolución⁴⁰³», publicado en el número de septiembre de 1956 de *Scientific American*, Gamow escribió: «Einstein me comentó hace muchos años que la idea de la repulsión cósmica había sido el mayor error de su vida». Repitió la misma historia (y, por alguna razón, la mayoría de las crónicas de la historia de la constante cosmológica solo conocen esta fuente) en su libro autobiográfico⁴⁰⁴ *My World Line*, publicado póstumamente en 1970: «Así pues, la ecuación original de la gravedad de Einstein era correcta, y cambiarla [para introducir la constante cosmológica] fue un error. Mucho más tarde, mientras discutía problemas cosmológicos con Einstein, me comentó que introducir el término cosmológico había sido el mayor error que había cometido en toda su vida».

Sin embargo, como es bien conocido que a Gamow le gustaba adornar muchas de sus anécdotas (su primera mujer dijo en una ocasión: «En más de veinte años juntos, Geo nunca ha sido más feliz que perpetuando una

broma»), decidí escarbar un poco más con la intención de establecer la autenticidad del relato. Mi motivación para investigar esta cita concreta se vio aumentada porque la reciente resurrección de la constante cosmológica ha convertido la expresión «mayor error» en una de las más citadas de Einstein. ¡La última vez que lo comprobé, había más de medio millón de páginas en Google con las palabras «Einstein» y «biggest blunder»!

Comencé por intentar dilucidar si Gamow realmente pretendía citar a Einstein directamente. Por desgracia, las dos citas arriba presentadas resultaban insuficientes, por sí solas, para determinar si Gamow afirmaba que el propio Einstein había usado las palabras «mayor error» que había cometido en su vida, o si Gamow se limitaba a transmitir el espíritu de la conversación. Sin embargo, en *My World Line*, Gamow prosigue diciendo: «Pero este "error", rechazado por Einstein, todavía hoy hay cosmólogos que lo usan ocasionalmente, y la constante cosmológica designada con la letra griega " Λ " deja ver su fea cabeza una y otra vez». El uso de las comillas en la palabra «error» parece sugerir al menos que Gamow pretendía transmitir una verdadera cita. El hecho de que Gamow usara exactamente la misma expresión en dos ocasiones también indica que intentaba dar la impresión, al menos, de que estaba citando directamente a Einstein. Además, como se habrá observado, Gamow revela aquí su propio prejuicio contra la constante cosmológica al usar la expresión «su fea cabeza».

Curiosamente, descubrí que Einstein realmente utilizó la expresión «Cometí un gran error en mi vida», pero en un contexto totalmente distinto. Linus Pauling habló con Einstein (en calidad los dos de destacados científicos y pacifistas) en Princeton el 16 de noviembre de 1954. Justo después de la conversación, Pauling escribió en su diario que Einstein le había dicho lo siguiente (la figura 33 muestra la entrada en el diario de Pauling): «Había cometido un gran error: cuando firmó la carta al presidente Roosevelt recomendando la fabricación de las bombas atómicas; pero había alguna justificación: el peligro de que las hicieran los alemanes». Como es obvio,

este hecho por sí mismo no excluye la posibilidad de que Einstein usase la expresión «el mayor error» también en un contexto científico, aunque el lenguaje empleado en la conversación con Pauling («*un gran error*») da que pensar.

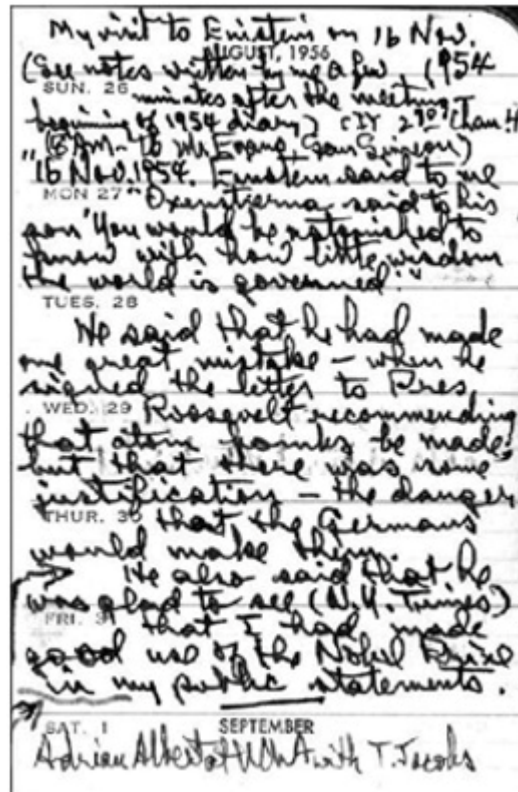


Figura 33

La segunda pregunta que deseaba intentar esclarecer era la de las circunstancias; ¿cuándo podría haber usado Einstein esa expresión con Gamow? En *My World Line* Gamow da la impresión de que él y Einstein eran buenos amigos. Describe cómo durante la segunda guerra mundial los dos sirvieron al mismo tiempo como asesores en la División de Altos Explosivos de la Oficina de Armamento de la marina de Estados Unidos. Como, según recuerda Gamow, en aquel momento a Einstein no le era posible viajar de Princeton a Washington, D. C., Gamow fue «seleccionado», en sus palabras, por la marina para llevarle documentos a Einstein «cada dos viernes»,

porque «había conocido a Einstein anteriormente, en una situación no militar». Gamow continúa describiendo unos lazos cálidos y cercanos entre él y Einstein:

Einstein solía recibirme en el estudio de su casa, vestido con uno de sus famosos jerséis, y revisábamos todas las propuestas, una por una [...] Cuando finalizaba la parte de negocios de la visita, almorzábamos en la casa de Einstein o en la cafetería del Instituto de Estudios Avanzados, que no caía lejos, y la conversación derivaba a problemas de astrofísica y cosmología [...] Nunca olvidaré aquellas visitas a Princeton durante las cuales llegué a conocer a Einstein mucho mejor de lo que lo había conocido antes⁴⁰⁵.

Tomando por un hecho esta descripción, en su libro *Ordinary Geniuses: Max Delbruck, George Gamow, and the Origins of Genomics and Big Bang Cosmology*⁴⁰⁶ el físico Gino Segrè llegó de manera natural a la conclusión de que Einstein había hecho su comentario sobre el «mayor error» durante una de aquellas «charlas de Princeton durante la segunda guerra mundial». Albrecht Fölsing⁴⁰⁷, autor de una de las más fieles biografías de Einstein, también dio por hecho que el relato de Gamow era auténtico, y, como tantos otros, repitió la presunta cita del «mayor error». Lamentablemente, como he descubierto, la realidad fue bastante diferente.

Stephen Brunauer ya era un experto científico de superficies cuando, siendo lugarteniente, se convirtió en el director de investigación y desarrollo de explosivos de alto orden de la marina de Estados Unidos durante la segunda guerra mundial. En cierto momento, preguntó a las divisiones civiles y de infantería⁴⁰⁸ si Einstein trabajaba para ellos. La respuesta, en ambos casos, fue negativa. Le explicaron a Brunauer que Einstein era un pacifista y que, además, no estaba «interesado en nada práctico». Reticente a aceptar esta caracterización como definitiva, Brunauer visitó a Einstein en Princeton el 16 de mayo de 1943, y lo reclutó como asesor de la marina con una remuneración de 25 dólares diarios. Brunauer fue también el oficial que reclutó a Gamow el 20 de septiembre de 1943. (Véase su carta a Gamow,

figura 34). En un artículo publicado en 1986, titulado «Einstein y la marina: [...] "una combinación imbatible"», Brunauer describe con todo detalle todo el episodio. Menciona allí que además de él mismo, hubo unos pocos científicos más en la división que ocasionalmente utilizaron los servicios de Einstein, entre ellos los físicos Raymond Seeger, John Bardeen (que ganaría dos premios Nobel de Física) y George Gamow, así como el químico Henry Eyring. Cuando explica el papel preciso de Gamow, Brunauer escribe: «Gamow, en años posteriores, dio a entender que era el vínculo entre la marina y Einstein, que lo visitaba cada dos semanas y que el profesor "escuchaba" pero no hacía ninguna aportación. Todo es falso. Quien más lo visitaba era yo, y eso ocurría más o menos cada dos meses».

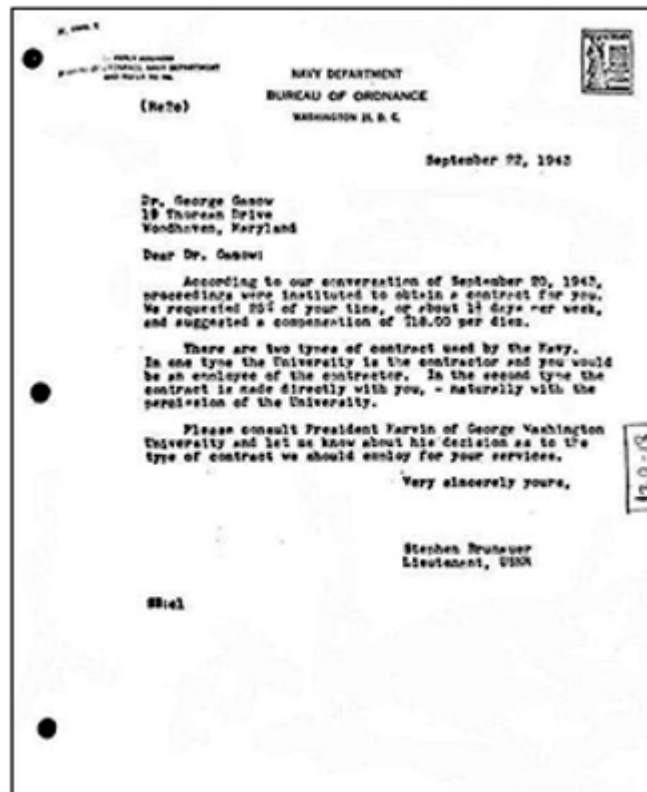


Figura 34

Esta crónica sin duda arroja nueva luz sobre la interacción entre Einstein y Gamow. El escrutinio de la poca correspondencia formal entre Gamow y

Einstein no hizo más que reforzar mi impresión de que los dos hombres nunca habían sido amigos cercanos. En una de ellas, Gamow le pregunta a Einstein su opinión⁴⁰⁹ sobre la idea de que el conjunto del universo podría tener un momento angular (una medida de rotación) distinto de cero. En otra, Gamow adjuntaba su artículo⁴¹⁰ sobre la síntesis de los elementos en el *big bang*. Einstein respondía cortésmente⁴¹¹ a las cartas de Gamow, pero nunca menciona la constante cosmológica. Tal vez la información más reveladora de toda la correspondencia sea un comentario que Gamow añadió a la carta de Einstein del 4 de agosto de 1946⁴¹². Einstein informaba a Gamow de que había leído el manuscrito sobre la nucleosíntesis en el *big bang* y estaba «convencido de que la abundancia de elementos en función del peso atómico es un punto de partida de extrema importancia para las especulaciones cosmogónicas». Gamow escribió al pie de la carta (figura 35): «Por supuesto, el viejo está de acuerdo con casi todo últimamente».

Pero si Einstein y Gamow no mantenían una relación cercana, ¿no es sorprendente que Einstein usara con Gamow una expresión tan fuerte («el mayor error de toda mi vida») para referirse a la constante cosmológica, y que sin embargo no lo hiciera con ninguno de sus colegas y amigos más íntimos?⁴¹³ Para explorar algo más esta cuestión, examiné los artículos, libros y correspondencia personal de Einstein escritos después de 1932, en busca de otra mención de la constante cosmológica. Partí de 1932 porque ese fue el año en que Einstein y De Sitter declararon que la constante cosmológica era innecesaria.

Los escritos de Einstein no dejan ninguna duda de que tras el descubrimiento de la expansión del cosmos, no estaba contento de haber introducido la constante cosmológica. Por ejemplo, en 1942 su ayudante y colaborador, el físico Peter Bergmann, publicó un libro titulado *Introduction to the Theory of Relativity*, que incluía un prefacio de Einstein. El libro ni siquiera menciona la constante cosmológica. Sin embargo, en la segunda edición de su propio

libro, *El significado de la relatividad*, Einstein añade un apéndice con un comentario sobre el término cosmológico:



Figura 35

La introducción del «miembro cosmológico» en las ecuaciones de la gravedad, aunque posible desde el punto de vista de la relatividad, debe rechazarse desde el punto de vista de la economía lógica. Como Friedman[n] mostró por primera vez, se puede reconciliar una densidad finita de masa en todos los lugares con la forma original de las ecuaciones de la gravedad si se admite la variabilidad temporal de la distancia métrica entre dos puntos de masa⁴¹⁴.

Dicho de otro modo, Einstein reconocía que los principios de la relatividad general permitían añadir a las ecuaciones un término de repulsión cosmológica, pero como no era necesario, apelaba a la simplicidad

matemática para rechazarlo. Luego complementaba su comentario con una nota a pie de página:

Si la expansión de Hubble se hubiera descubierto en el momento de la creación de la teoría general de la relatividad, el miembro cosmológico no se habría introducido. Hoy parece mucho menos justificado introducir ese término en las ecuaciones de campo, dado que su introducción pierde su única justificación original, que es la de contribuir a una solución natural al problema cosmológico⁴¹⁵.

En el apéndice 4 de su libro de divulgación *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Einstein también señala que el término cosmológico «no era requerido por la teoría como tal ni parecía natural desde un punto de vista teórico». De manera parecida, la edición revisada, de 1958, del libro del premio Nobel Wolfgang Pauli, *Teoría de la relatividad*, incluía una nota complementaria⁴¹⁶ a pie de página que hacía referencia al hecho de que Einstein era perfectamente consciente de las soluciones de Friedmann y Lemaître, así como del descubrimiento de Hubble. Según su autor, que era miembro del círculo más cercano a Einstein, este habría rechazado posteriormente el término cosmológico por «superfluo y ya no justificado». Pauli comentó además que él mismo aceptaba el punto de vista de Einstein. Pero en ningún lugar aparece la menor alusión al «mayor error».

Un análisis de todos los registros de Einstein sobre la constante cosmológica deja absolutamente claro que la rechazó únicamente sobre la base de dos criterios: una simplicidad de motivación estética y el arrepentimiento por haberla introducido con una motivación equivocada. Como ya he señalado en el capítulo 2, la simplicidad en los *principios* implicados en una teoría es una de las características que la hacen bella. Para Einstein, la simplicidad era más que eso; era casi un criterio de realidad: «Nuestra experiencia hasta la fecha⁴¹⁷ nos justifica cuando nos sentimos seguros de que en la naturaleza se realiza el ideal de la simplicidad matemática». La experiencia de Einstein durante el desarrollo de la relatividad general no había hecho más que

reforzar su confianza en los principios matemáticos. Cuando intentó seguir lo que pensó que eran restricciones físicas, no llegó a nada, mientras que al seguir las ecuaciones más naturales desde una perspectiva matemática, se le abrieron las puertas a una «teoría de incomparable belleza», en sus propias palabras. Añadir otra constante (la constante cosmológica) a las ecuaciones no le transmitía a Einstein ninguna belleza reduccionista, pero estaba dispuesto a tolerarla en tanto le pareciera impuesta por lo que él percibía como una realidad estática. En el momento en que se descubrió que el cosmos se expandía dinámicamente, a Einstein le complació liberar a su teoría de lo que ahora consideraba un exceso de carga. Expresó sus ideas al respecto en una carta⁴¹⁸ que escribió a Georges Lemaître el 26 de septiembre de 1947 en respuesta a una carta⁴¹⁹ que el cosmólogo belga le había enviado a Einstein el 30 de julio de aquel mismo año. En aquella carta (y en un artículo de Lemaître que la siguió), Lemaître hizo todo lo que pudo para convencer a Einstein de que la constante cosmológica era en realidad necesaria para explicar cierto número de hechos cosmológicos, entre ellos la edad del universo.

Einstein admitió al principio que «la introducción del término Λ ofrece una posibilidad» de evitar una contradicción con las edades geológicas. Hay que recordar que la edad del universo que implicaban las observaciones originales de Hubble era muy inferior a la edad de la Tierra. Lemaître creía que podía resolver este conflicto si las ecuaciones incluían la constante cosmológica. Sin embargo, Einstein repitió sus argumentos reduccionistas para justificar su renuencia a aceptar la constante cosmológica. Lo que escribió fue esto:

Desde que introduje este término he tenido mala conciencia. Pero en aquel momento no pude ver otra manera de contemplar el hecho de la existencia de una densidad media finita de materia. Me pareció verdaderamente feo que la ley del campo de gravitación estuviera compuesta por dos términos lógicamente independientes y enlazados por una suma. *Sobre la justificación*

de estas impresiones acerca de la simplicidad lógica, es difícil argumentar [la cursiva es mía]. No puedo evitar sentir las con fuerza y soy incapaz de creer que se dé en la naturaleza algo tan feo⁴²⁰.

En otras palabras, la motivación original ya no existía, y Einstein creía que se violaba la simplicidad estética, así que no creía que la naturaleza necesitase una constante cosmológica. ¿Pensó entonces que aquello había sido su «mayor error»?⁴²¹ Es improbable. Es cierto que se sentía incómodo con el concepto, y que ya en 1919 había dicho que era «gravemente perjudicial para la belleza formal de la teoría». Pero la relatividad general definitivamente *permitía* la introducción del término cosmológico sin violar ninguno de los principios fundamentales sobre los que se asentaba la teoría. En este sentido, Einstein sabía que esto no era en absoluto un error antes incluso de los descubrimientos recientes que conciernen a la constante cosmológica. La experiencia adquirida en la física teórica desde los tiempos de Einstein nos ha demostrado que cualquier término permitido por los principios básicos probablemente resulte ser necesario. El reduccionismo se aplica a los fundamentos, no a la forma específica de las ecuaciones. Las leyes de la física se parecen en esto a las reglas de la novela *La leyenda del rey Arturo*, del escritor inglés T. H. White: «Todo lo que no está prohibido es obligatorio⁴²²».

En conclusión, es prácticamente imposible demostrar más allá de toda duda que alguien *no* dijo algo. De todos modos, basándome en todos los indicios disponibles, mi conjetura más firme es que si bien Einstein tal vez tuviera «mala conciencia» por haber introducido la constante cosmológica, sobre todo porque perdió la oportunidad de predecir la expansión cósmica, en realidad nunca lo calificó como el «mayor error» de toda su vida. Ese extremo fue, en mi humilde opinión, casi con certeza una hipérbole de Gamow. Una anécdota divertida es que, en un artículo titulado «El mayor error de Einstein», el astrónomo J. P. Leahy, de la Universidad de Manchester⁴²³, comentó: «Es una suerte que Einstein le hiciera ese

comentario a Gamow, pues de lo contrario este habría tenido la fuerte tentación de inventárselo». Mi conclusión es que Gamow probablemente ¡se lo inventó!

Uno se puede preguntar por qué esta ocurrencia de Gamow se ha convertido en una de las historias más memorables del folclore de la física. La respuesta, creo yo, es triple. De un lado, a la gente en general, y a los medios de comunicación en particular, les encantan los superlativos. Las noticias sobre la ciencia siempre son más atractivas si incluyen expresiones como «lo más veloz», «lo más lejano» o «lo primero». Humano como era, Einstein se equivocó muchas veces, pero ninguno de sus otros errores dio pie a titulares como el del que fue calificado como su mayor error. En segundo lugar, Einstein se ha convertido en la encarnación del genio⁴²⁴, el hombre que solo con la ayuda de sus capacidades intelectuales descubrió cómo funciona el universo. Fue el científico que demostró que la matemática pura podía descubrir lo que crea y también crear lo que descubre. Se ha dicho de los antiguos griegos que encontraron el universo hecho un misterio y lo dejaron hecho una *polis* (ciudad-estado). Desde la perspectiva de la cosmología moderna, este aforismo se ajusta a Einstein todavía mejor. (La figura 36 muestra mi imagen favorita de Einstein). El hecho de que incluso una potencia científica de este calibre sea falible es a un tiempo fascinante y una lección de humildad, y de cómo progresa realmente la ciencia. Ni siquiera las mentes más impresionantes son infalibles; tan solo preparan el camino para el siguiente nivel de comprensión. La tercera razón de la popularidad de la constante cosmológica, de la que en alguna ocasión se ha dicho que es el más famoso término amañado de la historia de la ciencia, es que ha resultado ser un auténtico superviviente. Como el narco Pablo Escobar y el místico ruso Grigory Rasputin, la constante cosmológica ha sido muy difícil de eliminar aunque Einstein ya la denunció hace ochenta años. Y lo que es más, este ostensible «error» no solo se ha negado a morir, sino que durante la última década se ha convertido en el verdadero centro de

atención. ¿Qué fue lo que le dio a la constante cosmológica sus nueve vidas, y por qué acabó estando de nuevo bajo los focos?

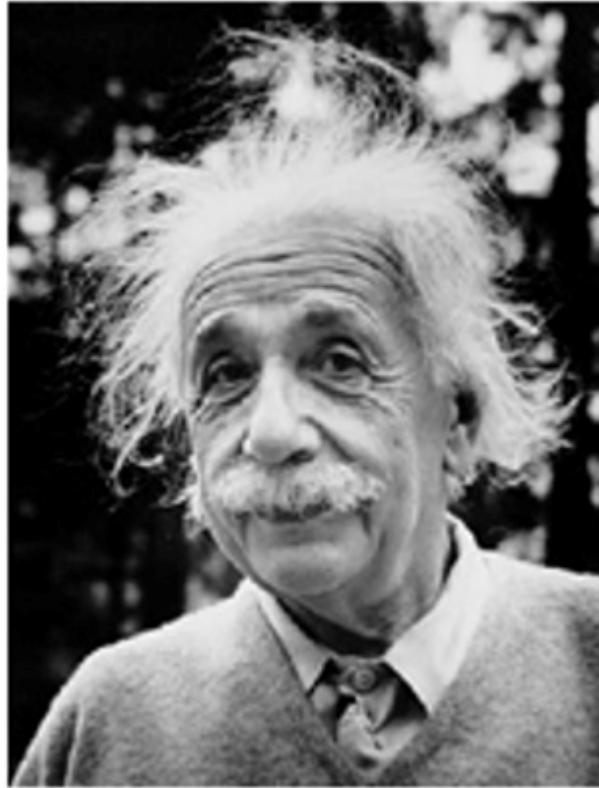


Figura 36

Enganchado a Λ

Incluso en vida de Einstein, hubo algunos científicos que no querían deshacerse de la constante cosmológica. El físico Richard C. Tolman⁴²⁵, por ejemplo, escribió a Einstein en 1931: «A falta de una determinación experimental de su magnitud, la asignación definitiva de $\Lambda = 0$ parece arbitraria y no necesariamente correcta». Lemaître, aparte de su sentimiento general de que no debería rechazarse Λ solo porque hubiera sido introducido por razones equivocadas, tenía otras dos motivaciones de peso para querer mantener viva la constante cosmológica. La primera es que ofrecía una solución potencial a la discrepancia entre la joven edad del universo (según implicaban las observaciones de Hubble) y las escalas de tiempo geológicas.

En algunos de los modelos de Lemaître, un universo con una constante cosmológica⁴²⁶ podía perdurar mucho tiempo en una fase de estancamiento, prolongando así la edad del cosmos. La segunda razón de Lemaître para defender Λ tenía que ver con sus ideas sobre la formación de las galaxias. Conjeturaba que durante la fase de estancamiento, las regiones de densidad más alta se amplificaban y crecían formando protogalaxias. Aunque a finales de la década de 1960 se demostró que esta idea particular no se sostenía⁴²⁷, ayudó a mantener la constante cosmológica en suspenso, pero no descartada.

Arthur Eddington fue otro de los grandes defensores de la constante cosmológica. Tanto que, de hecho, en cierta ocasión declaró como un desafío: «La vuelta a la antigua visión [sin la constante cosmológica] es impensable. Abandonar la constante cosmológica se me antoja parecido a regresar a la teoría newtoniana⁴²⁸». La principal razón de la defensa de Eddington era que creía que la gravedad repulsiva era la verdadera explicación de la expansión observada del universo. En sus palabras:

Solo hay dos maneras de explicar las grandes velocidades de recesión de las nebulosas: (1) fueron producidas por una fuerza dirigida hacia afuera tal como hemos supuesto, o (2) desde el principio del presente orden de las cosas han existido velocidades tanto o más grandes. Se han propuesto varias explicaciones rivales de la recesión de las nebulosas que no la aceptan como indicio de una fuerza de repulsión. Estas necesariamente adoptan la segunda alternativa, y postulan que han existido grandes velocidades desde el principio. Eso podría ser cierto; pero difícilmente podemos calificarlas de *explicación* de las grandes velocidades⁴²⁹.

Dicho de otro modo, Eddington reconocía que incluso sin la constante cosmológica, la relatividad general permitía como solución un universo en expansión. Sin embargo, esta solución tenía que suponer que el cosmos había comenzado con altas velocidades, sin proporcionar una explicación de esas particulares condiciones iniciales. El *modelo inflacionario*⁴³⁰, la idea de

que el universo experimentó una fenomenal expansión cuando apenas tenía una fracción de segundo, nació de una parecida insatisfacción con la necesidad de depender de unas condiciones iniciales específicas como causa de efectos cósmicos observados. Por ejemplo, se supone que la inflación infló tanto el tejido del universo que aplanó la geometría cósmica. Al mismo tiempo, se cree que la inflación fue el agente que tomó fluctuaciones cuánticas de tamaño subatómico en la densidad de la materia y las infló hasta escalas cosmológicas. Estos fueron los incrementos de densidad que más tarde se convertirían en las semillas para la formación de la estructura cósmica.

Como ya he señalado en el capítulo 9, el modelo del estado estacionario de Hoyle de 1948 reproducía algunas de las características de la cosmología inflacionaria. El término de campo que Hoyle había introducido en las ecuaciones de Einstein para la creación continua de materia actuaba de varias maneras como una constante cosmológica. En concreto, provocaba que el universo se expandiera exponencialmente. En consecuencia, la cosmología del estado estacionario ayudó a mantener en boga, en una u otra forma, el factor cosmológico de repulsión durante otros quince años, más o menos.

Cuando William McCrea, astrónomo y durante largo tiempo defensor de Hoyle, resumió las ideas preponderantes en 1971 acerca de la constante cosmológica, tuvo la clarividencia de distinguir⁴³¹ entre dos posibilidades: o bien la relatividad general es una teoría completa y coherente, o hay que ver la relatividad general solamente como una parte de una «teoría de todo» mucho más general, que describe el cosmos y todos los fenómenos que ocurren en su interior. En el primer caso, observaba McCrea, la constante cosmológica se convierte en un incordio, puesto que su valor no se puede determinar desde dentro de la teoría. En el segundo caso, dijo con enorme perspicacia, el valor de la constante cosmológica puede fijarse a través de la conexión entre la relatividad general y otras ramas relevantes de la física.

Como pronto veremos, los físicos intentan entender la naturaleza de la constante cosmológica precisamente a través de sus esfuerzos por unificar lo grande y lo pequeño, la relatividad general y la física cuántica.

Capítulo 11

A partir del espacio vacío

Si admitimos que el éter es en cierto grado condensable y extensible, y creemos que se extiende por todo el espacio, debemos concluir que no habrá gravitación mutua entre sus partes, y no podemos creer que sea atraído gravitatoriamente por el Sol o la Tierra o ninguna materia ponderable; es decir, debemos creer que el éter es una sustancia ajena a la ley de la gravitación universal.

Lord Kelvin

La constante cosmológica introdujo en el vocabulario de la física una fuerza gravitatoria de repulsión que es proporcional a la distancia y actúa por encima y más allá de la atracción gravitatoria común entre masas. Como con tantos otros conceptos físicos, Newton fue el primero en considerar⁴³² los efectos de una fuerza parecida. En su célebre *Principia* discutía, además de la fuerza normal de la gravedad, otra fuerza que «aumenta con una razón simple de la distancia». Newton pudo demostrar que para este tipo de fuerza, como para la gravedad, se podía considerar una masa esférica como si toda la masa estuviera concentrada en su centro. Sin embargo, no examinó a fondo el problema para el caso en que dos fuerzas actúan en tándem. Newton le habría prestado más atención a este escenario si se hubiera percatado, o hubiera tomado más en serio, el hecho de que su ley de la gravitación no se podía aplicar fácilmente al universo entero. Si se intenta calcular⁴³³ la fuerza gravitatoria en cualquier punto de un cosmos de

extensión infinita y densidad uniforme, el cálculo no arroja ningún valor definido. La situación se parece un poco a la de intentar calcular la suma de la secuencia infinita $1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1$, y así sucesivamente. El resultado depende de dónde se para.

Hacia finales del siglo XIX, unos pocos físicos intentaron⁴³⁴ buscar una salida a este laberinto, y sugirieron soluciones que iban desde pequeñas modificaciones a la ley de la gravitación de Newton hasta la introducción de conceptos más exóticos, como las masas negativas. El ubicuo Lord Kelvin, por ejemplo, propuso que el éter (la sustancia que entonces se creía que impregnaba todo el espacio) no participaba de ningún modo en la gravitación. (Véase la cita que abre este capítulo). Al final, todos estos antiguos intentos culminaron en la teoría de la relatividad general de Einstein y la posterior ampliación de sus ecuaciones con la constante cosmológica. Sin embargo, como ya hemos visto, Einstein repudió más tarde este término, y aparte de su efímera reencarnación en la cosmología del estado estacionario de Hoyle, quedó prácticamente desterrada de la teoría durante varias décadas. Pero a finales de los años 1960, unas observaciones astronómicas proporcionaron el ímpetu necesario para que este fénix resurgiera de sus cenizas. Los astrónomos hallaron lo que parecía un exceso en el recuento de cúasares agrupados alrededor de una época de hace unos diez mil millones de años. Este exceso de densidad se podía explicar si de algún modo el tamaño del universo⁴³⁵ se hubiese mantenido durante un tiempo con las dimensiones que tenía entonces, de aproximadamente un tercio de su extensión actual. De hecho, algunos astrofísicos mostraron que era posible obtener ese ralenti astronómico a partir del modelo de Lemaître, pues este incluía (gracias a su utilización de la constante cosmológica) una tranquila fase de estancamiento o cuasi-estática. Aunque este modelo concreto no sobrevivió mucho más tiempo, consiguió llamar la atención sobre una posible interpretación de la constante cosmológica: la *densidad de*

energía del espacio vacío. Esta idea es tan fundamental y al mismo tiempo tan desconcertante que merece una explicación.

De las escalas más grandes a las más pequeñas

Por definición, las ecuaciones matemáticas son expresiones o proposiciones que afirman la igualdad de dos cantidades. Por ejemplo, la ecuación más famosa de Einstein,

$$E = mc^2$$

expresa el hecho de que la energía asociada a una masa determinada (en el lado izquierdo del signo de la igualdad) es igual al producto de esa masa por el cuadrado de la velocidad de la luz (en el lado derecho). La ecuación original de Einstein para la relatividad general tenía la siguiente forma: en el lado izquierdo tenía un término que describía la curvatura del espacio y en el lado derecho, un término que especificaba la distribución de masa y energía (multiplicado por la constante de Newton para la magnitud de la fuerza de la gravedad). Esta es una manifestación clara de lo esencial de la relatividad general: la materia y la energía (en el lado derecho) determinan la geometría del espacio-tiempo (en el lado izquierdo), que es la expresión de la gravedad. Cuando introdujo la constante cosmológica⁴³⁶, Einstein la añadió al lado izquierdo (multiplicada por una cantidad que define distancias), porque la concebía como una propiedad más del espacio-tiempo. Sin embargo, si se desplaza este término al lado derecho⁴³⁷, adquiere un nuevo significado físico. Ahora en lugar de describir la geometría, el término cosmológico pasa a formar parte del balance energético del cosmos. Sin embargo, las características de esta nueva forma de energía difieren de las de la energía asociada a la materia y la radiación de dos maneras importantes. En primer lugar, mientras que la densidad de la materia (tanto la común como la llamada «oscura», que no emite luz) disminuye a medida

que el universo se expande, la densidad de la energía correspondiente a la constante cosmológica permanece eternamente *constante*. Y por si eso no fuera bastante extraño, esta nueva forma de energía ¡tiene presión negativa! Chúpate esa. Y no lo digo como chiste. La presión positiva, como la que ejerce un gas normal comprimido, empuja hacia afuera; en cambio, la presión negativa chupa hacia adentro en lugar de empujar hacia afuera. Esta propiedad resulta ser crucial, pues en la relatividad general, además de la masa y la energía, también la presión es una fuente de gravedad: aplica su propia fuerza gravitatoria. Además, mientras que la presión positiva genera una fuerza gravitatoria de atracción, la presión negativa contribuye a una *fuerza gravitatoria de repulsión* (una característica que seguramente hace que Newton se revuelva en su tumba). Este es justamente el atributo de la constante cosmológica que Einstein había aprovechado en su intento por mantener el universo estático. La simetría básica de la relatividad general — que las leyes de la naturaleza deberían hacer las mismas predicciones en distintos marcos de referencia— implica que solo el vacío puede tener una densidad de energía que no se diluya con la expansión. Pues, ¿cómo podría diluirse más un espacio vacío? Pero ¿energía del vacío? ¿Por qué tiene energía, la que sea, el espacio vacío? ¿Acaso no es el vacío simplemente «nada»?

No en el extraño mundo de la mecánica cuántica. Cuando se entra en el dominio de lo subatómico, el vacío deja de ser nada. De hecho, es un frenesí de pares de partículas y antipartículas virtuales (en el sentido de que no pueden observarse directamente) que aparecen y desaparecen de la existencia a una escala de tiempo fugacísima. En consecuencia, hasta el espacio vacío puede estar dotado de densidad de energía y, por lo tanto, ser una fuente de gravedad. Esta interpretación⁴³⁸ es completamente diferente de la que había sugerido Einstein, quien veía su constante cosmológica como una potencial peculiaridad del espacio-tiempo que servía para describir el universo a sus mayores escalas cósmicas. La identificación de la constante

cosmológica con la energía del espacio vacío, aunque matemáticamente equivalente, de inmediato la relaciona con las más minúsculas escalas subatómicas, que son el dominio de la mecánica cuántica. La observación de McCrea de 1971 de que tal vez se podría determinar el valor de la constante cosmológica a partir de una física externa a la relatividad general clásica resultó ser verdaderamente visionaria. Debo señalar que el propio Einstein hizo un interesante intento de conectar la constante cosmológica con las partículas elementales. En lo que podría verse como su primera incursión en el campo de batalla de los intentos por unificar la gravedad y el electromagnetismo, Einstein propuso en 1919⁴³⁹ que tal vez las partículas con carga eléctrica se mantienen unidas gracias a fuerzas gravitatorias. Esto le llevó a una restricción electromagnética sobre el valor de la constante cosmológica. Aparte de una nota breve sobre el tema⁴⁴⁰ en 1927, Einstein nunca volvió a ocuparse de esta cuestión.

La idea de que el vacío no está realmente vacío sino que puede contener una gran cantidad de energía no es realmente nueva. Fue propuesta por primera vez en 1916 por el físico químico alemán Walther Nernst, pero como lo que más le interesaba era la química, Nernst no pensó en las implicaciones de esta idea para la cosmología. En la década de 1920, quienes se ocupaban de la mecánica cuántica⁴⁴¹, y en especial Wolfgang Pauli, discutieron el hecho de que en el dominio cuántico la energía más baja posible de cualquier campo no era cero. Esta *energía del punto cero*, como se la suele llamar, es una consecuencia de la naturaleza ondulatoria de los sistemas mecánico-cuánticos, que hace que experimenten fluctuaciones o sacudidas incluso en su estado fundamental. No obstante, ni siquiera las conclusiones de Pauli encontraron eco en consideraciones cosmológicas. La primera persona que de manera específica conectó la constante cosmológica con la energía del espacio vacío fue Lemaître. En un artículo publicado en 1934, no mucho después de reunirse con Einstein, Lemaître escribió: «Todo ocurre como si la energía *in vacuo* fuese diferente de cero⁴⁴²». Y prosiguió diciendo que la

densidad de energía del vacío debía estar asociada a una presión negativa, y que «este es en esencia el significado de la constante cosmológica Λ ». La figura 37 muestra el encuentro de Einstein y Lemaître en Pasadena en enero de 1933.

Por perceptivos que fuesen los comentarios de Lemaître, el asunto durmió el sueño de los justos durante más de tres décadas hasta que un breve resurgimiento de interés en la constante cosmológica atrajo la atención del versátil físico judío bielorruso Yakov Zeldovich. En 1967 Zeldovich hizo el primer intento⁴⁴³ genuino de calcular la contribución de las sacudidas del vacío al valor de la constante cosmológica.



Figura 37

Por desgracia, por el camino hizo algunas suposiciones *ad hoc* sin explicar su razonamiento. En particular, Zeldovich supuso que la mayoría de las energías del punto cero de un modo u otro se cancelan, dejando solo la interacción

gravitatoria entre las partículas virtuales en el vacío. Incluso con esta injustificada omisión, el valor que obtuvo era totalmente inaceptable: aproximadamente mil millones de veces superior a la densidad de energía de toda la materia y la radiación del universo observable.

Intentos más recientes de estimar la energía del espacio vacío no han hecho más que exacerbar el problema, produciendo valores que son muchísimo más altos; tanto, de hecho, que no pueden tenerse sino por absurdos. Por ejemplo, los físicos primero supusieron ingenuamente que podían sumar las energías del punto cero hasta la escala en que se quiebra nuestra teoría de la gravedad. Es decir, hasta el punto en que el universo es tan pequeño que se necesita una teoría cuántica de la realidad (una teoría que todavía no tenemos). En otras palabras, la hipótesis era que la constante cosmológica debería corresponder a la densidad cósmica cuando el universo no tenía más que una fracción de segundo, antes incluso de que se imprimieran las masas de las partículas subatómicas. Sin embargo, cuando los físicos de partículas realizaron la estimación⁴⁴⁴, se encontraron con un valor unos 123 órdenes de magnitud (un 1 seguido de 123 ceros) mayor que la densidad de la energía cósmica combinada de la materia y la radiación. Esta disparatada discrepancia llevó al premio Nobel de Física Steven Weinberg a calificarla como «el peor fracaso de una estimación de orden de magnitud en toda la historia de la ciencia». Obviamente, si la densidad de energía del espacio vacío fuese realmente tan alta, no solo no habrían existido galaxias y estrellas, sino que además la enorme repulsión habría desgarrado al instante átomos y núcleos. En un intento desesperado por corregir aquella estimación basada en conjeturas, los físicos usaron principios de simetría para especular que la suma de las energías del punto cero debería recortarse a una energía menor. Para su desesperación, aunque la estimación revisada arrojaba un valor considerablemente más bajo, la energía todavía era demasiado alta en unos 53 órdenes de magnitud.

Enfrentados a esta crisis, algunos físicos recurrieron a creer que hay algún mecanismo todavía no descubierto que de algún modo cancela completamente todas las distintas contribuciones de la energía del vacío, produciendo de este modo un valor de exactamente cero para la constante cosmológica. Como se comprenderá, matemáticamente hablando eso es el equivalente exacto de lo que hizo Einstein cuando simplemente retiró de sus ecuaciones la constante cosmológica. Suponer que la constante cosmológica desaparece significa que no es necesario incluir en las ecuaciones un término de repulsión. El razonamiento, sin embargo, era completamente distinto. El descubrimiento de Hubble de la expansión cósmica enseguida subvirtió la motivación original de Einstein para introducir la constante cosmológica. Aun así, muchos físicos consideraron injustificado que se asignase el valor específico de cero a λ por la mera razón de la brevedad o como remedio a una «mala conciencia». Por otro lado, en su moderna encarnación como energía del espacio vacío, la constante cosmológica parece ser obligatoria desde la perspectiva de la mecánica cuántica, a no ser que todas las distintas fluctuaciones cuánticas de algún modo se pongan de acuerdo para sumar cero. Esta situación inconclusa y frustrante duró hasta 1998, cuando nuevas observaciones astronómicas convirtieron la cuestión entera en lo que posiblemente haya que calificar como el mayor desafío al que se enfrenta hoy la física.

El universo acelerado

Desde las observaciones de Hubble de finales de los años 1920, sabemos que vivimos en un universo en expansión. La teoría de la relatividad general de Einstein proporcionaba una interpretación natural de los descubrimientos de Hubble: la expansión es un estiramiento de la urdimbre del propio espacio-tiempo. La distancia entre dos galaxias cualesquiera aumenta del mismo modo que aumentaría la distancia entre dos motas pegadas a un globo si lo inflamamos. Sin embargo, del mismo modo que la gravedad de la

Tierra frena el movimiento de cualquier objeto lanzado hacia lo alto, uno esperaría que la expansión cósmica se estuviera frenando a causa de la atracción gravitatoria mutua de toda la materia y energía del universo. Pero en 1998 dos equipos de astrónomos⁴⁴⁵ que trabajaban independientemente descubrieron que la expansión cósmica no se está frenando; al contrario, durante los últimos seis mil millones de años, ¡se viene acelerando! Uno de los equipos, el Proyecto de Cosmología de Supernovas, estaba dirigido por Saul Perlmutter, del Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley, y el otro, el Equipo de Búsqueda de Supernovas de Z Alta, estaba dirigido por Brian Schmidt, del Observatorio de Monte Stromlo y Siding Spring, y por Adam Riess, del Instituto de Ciencia del Telescopio Espacial y de la Universidad Johns Hopkins.

El descubrimiento de la expansión acelerada⁴⁴⁶ fue al principio toda una sorpresa, pues implicaba algún tipo de fuerza de repulsión (como la que se esperaría de la constante cosmológica) que impulsaba la expansión del universo. Para llegar a su sorprendente conclusión, los astrónomos se basaron en observaciones de explosiones estelares muy brillantes conocidas como supernovas de tipo 1a. Estas explosiones estelares son tan luminosas (en su momento álgido, superan el brillo de la galaxia que las acoge) que pueden detectarse (y seguir la evolución de su brillo) hasta más de la mitad de la distancia del universo observable. Además, lo que hace a las supernovas de tipo 1a especialmente adecuadas para esta clase de estudio es el hecho de que son excelentes *candelas estándar*: son prácticamente idénticas en su luminosidad intrínseca en el punto álgido, y las pequeñas desviaciones de la uniformidad que existen pueden calibrarse empíricamente. Como el brillo observado de una fuente de luz es inversamente proporcional a su distancia (un objeto que está tres veces más lejos que otro es nueve veces más tenue), el conocimiento de la luminosidad intrínseca combinado con la medición de la luminosidad aparente permite una determinación fiable de la distancia a la fuente.

Las supernovas de tipo 1a son muy poco frecuentes⁴⁴⁷: solo se dan aproximadamente una vez por siglo en una galaxia dada. En consecuencia, el equipo tuvo que examinar miles de galaxias para conseguir una muestra de unas pocas docenas de supernovas. Los astrónomos determinaron las distancias a estas supernovas y a las galaxias que las hospedan, y las velocidades de recesión de estas últimas. Armados con estos datos, compararon sus resultados con las predicciones de la ley lineal de Hubble. Si la expansión del universo se estaba enlenteciendo, como todos esperaban, deberían haber encontrado que las galaxias situadas, digamos, a dos mil millones de años luz, fuesen más brillantes de lo esperado, puesto que habrían estado algo más cerca de lo que habría predicho una expansión uniforme. En cambio, Riess, Schmidt, Perlmutter y sus colegas encontraron que las galaxias distantes eran *más tenues* de lo esperado, lo que indicaba que habían alcanzado una distancia mayor. Un análisis meticuloso mostró que los resultados implicaban una aceleración cósmica durante los últimos seis mil millones de años, aproximadamente. Perlmutter, Schmidt y Riess compartieron el premio Nobel de Física de 2011 por su extraordinario hallazgo.

Desde su descubrimiento en 1998 han aparecido nuevas piezas de este rompecabezas, y todas ellas corroboran el hecho de que alguna nueva forma de energía con una distribución muy suavizada produce una gravedad repulsiva que empuja al universo a acelerarse. En primer lugar, la muestra de supernovas se ha incrementado considerablemente y ahora cubre un rango de distancias más amplio, lo que sitúa el hallazgo sobre una base más firme. En segundo lugar, Riess y sus colaboradores han mostrado por medio de observaciones posteriores que la actual fase de aceleración del universo de los últimos seis mil millones de años vino precedida por una época anterior de deceleración. De todo ello emerge una imagen bella y persuasiva: cuando el universo era más pequeño y mucho más denso, la gravedad tenía la mano ganadora y frenaba la expansión. Hay que recordar,

no obstante, que la constante cosmológica, como su nombre indica, no se diluye; la densidad de energía del vacío es constante. En cambio, las densidades de materia y radiación eran extremadamente elevadas en el universo primigenio, pero no han hecho más que disminuir a medida que el universo se ha ido expandiendo. Cuando la densidad de energía de la materia cayó por debajo de la del vacío (hace unos seis mil millones de años), comenzó la aceleración.

El indicio más convincente de un universo acelerado se produjo por la combinación de observaciones detalladas de las fluctuaciones⁴⁴⁸ del fondo cósmico de microondas realizadas por la Sonda Wilkinson de la Anisotropía de Microondas (WMAP, por sus siglas en inglés) y las observaciones de supernovas, complementado todo ello con mediciones independientes de la actual tasa de expansión (la constante de Hubble). Después de tomar en cuenta todas las restricciones impuestas por las observaciones, los astrónomos lograron determinar de una manera precisa la actual contribución de la supuesta energía del vacío respecto al balance total de energía del cosmos. Las observaciones revelaron que la materia (la común y la oscura juntas) constituye tan solo un 27 por ciento, aproximadamente, de la densidad de energía del universo, mientras que la «energía oscura» (el nombre con el que se ha bautizado a ese componente suavizado que es congruente con la posibilidad de ser energía del vacío) constituye alrededor del 73 por ciento. En otras palabras, la pertinaz constante cosmológica de Einstein, o algo que se parece mucho a su «modalidad» contemporánea, la energía del espacio vacío, ¡se tiene hoy por la forma de energía que predomina en el universo!

Dejemos clara una cosa: el valor medido de la densidad de energía asociada a la constante cosmológica sigue siendo de unos 53 a unos 123 órdenes de magnitud menor de lo que arrojaría un cálculo ingenuo de la energía del vacío, pero el hecho de que definitivamente no sea cero ha frustrado las esperanzas de muchos físicos teóricos. Recuérdese que dada la increíble

discordancia entre cualquier valor razonable de la constante cosmológica (un valor que el universo pudiera tolerar sin romperse por las costuras) y las expectativas teóricas, los físicos confiaban en que hubiese alguna simetría todavía no descubierta que cancelara completamente la constante cosmológica. Es decir, confiaban en que las contribuciones de las distintas energías del punto cero, por grandes que pudieran ser individualmente, se encontrasen en parejas de signos opuestos, de manera que el resultado neto fuese cero.

Algunas de estas expectativas descansaban en conceptos como la supersimetría⁴⁴⁹: los físicos de partículas predicen que todas las partículas que nos son tan familiares, como los electrones y los quarks (los constituyentes de los protones y los neutrones), deberían tener compañeras supersimétricas, todavía no descubiertas, con la misma carga (por ejemplo, eléctrica y nuclear), pero con el espín reducido en media unidad mecánico-cuántica. Por ejemplo, el electrón tiene un espín de $\frac{1}{2}$, y su «sombra» supersimétrica supuestamente tendría espín de 0. Si, además, todas las supercompañeras tuviesen la misma masa que sus compañeras conocidas, la teoría predice que la contribución de cada una de esas parejas se cancelaría. Desafortunadamente, sabemos que las superparejas del electrón, el quark y el esquivo neutrino no pueden tener la misma masa, respectivamente, que el electrón, el quark y el neutrino, pues en ese caso ya las habríamos descubierto. Cuando se toma en cuenta este hecho, la contribución total a la energía del vacío es mayor que la observada en unos 53 órdenes de magnitud. Uno todavía podría albergar la esperanza de que alguna supersimetría que aún nadie ha imaginado produzca la deseada cancelación. Sin embargo, la medición de la aceleración cósmica es un hito precisamente porque nos muestra que eso no es demasiado probable. El valor extraordinariamente pequeño, pero distinto de cero, de la constante cosmológica ha convencido a muchos teóricos de que es inútil buscar una explicación basada en argumentos de simetría. Al fin y al cabo, ¿cómo se

puede reducir un número a 0,000000000000000000000000 000 000000000000000000000000 001 de su valor original sin cancelarlo del todo? Este remedio parece requerir un nivel de ajuste finísimo que la mayoría de los físicos no están dispuestos a aceptar. Habría sido mucho más fácil, en principio, imaginar un escenario hipotético que haga que el valor de la energía del vacío sea exactamente cero que un escenario que lo reduzca al minúsculo valor observado. Entonces, ¿qué salidas nos quedan? En su desesperación, a algunos físicos les ha dado por recurrir a uno de los conceptos más controvertidos de la historia de la ciencia: el razonamiento antrópico, una forma de argumentación en la que la mera existencia de los observadores humanos se considera parte de la explicación. Einstein no tuvo nada que ver con este desarrollo, pero fue la constante cosmológica (el fruto de la mente de Einstein, su «error») lo que ha convencido a bastantes de los teóricos más destacados de nuestros días a tomarse en serio esta condición. Veamos una explicación sucinta del nudo de toda esta conmoción.

Razonamiento antrópico

Casi todo el mundo estaría de acuerdo en que la pregunta «¿Hay vida extraterrestre inteligente?» es una de las preguntas de la ciencia actual que más curiosidad despiertan. Que esta sea una pregunta razonable que plantearse se debe a un hecho verdadero: las propiedades de nuestro universo⁴⁵⁰, y las leyes que lo gobiernan, han permitido la aparición de vida compleja. Obviamente, las peculiaridades biológicas de los humanos dependen de forma crucial de las propiedades de la Tierra y de su historia, pero hay algunos requisitos básicos que nos parecen necesarios para que cualquier forma de vida inteligente llegue a materializarse. Por ejemplo, las galaxias compuestas por estrellas, con planetas en órbita alrededor de algunas de esas estrellas, parecen un requisito razonablemente genérico. De igual manera, la nucleosíntesis en el interior de las estrellas tuvo que forjar las piezas fundamentales de la vida: átomos como el carbono, el oxígeno y el

hierro. El universo también tuvo que proporcionar un medio lo bastante acogedor, y durante un tiempo lo bastante dilatado, como para que aquellos átomos se pudieran combinar y formar las moléculas complejas de la vida, lo que permitió que la vida primitiva evolucionara hasta su fase «inteligente».

En principio, uno podría imaginar universos «contrafactuales» que no son conducentes a la aparición de la complejidad. Imaginemos, por ejemplo, un universo que responde a las mismas leyes de la naturaleza, y a los mismos valores de las «constantes de la naturaleza», con la excepción de una. Es decir, las magnitudes de las fuerzas gravitatoria, electromagnética y nuclear son idénticas a las de nuestro universo, igual que lo son los cocientes de las masas de todas las partículas elementales. Sin embargo, el valor de un parámetro, la constante cosmológica, es mil veces más alto en este universo hipotético. En un universo así, la fuerza repulsiva asociada a la constante cosmológica provocaría una expansión tan rápida que no se llegaría a formar ninguna galaxia.

Como ya hemos visto, la pregunta que hemos heredado de Einstein es la siguiente: ¿por qué debería haber siquiera una constante cosmológica? La física moderna ha transformado esa pregunta en esta: ¿por qué debería el espacio vacío ejercer una fuerza de repulsión? Sin embargo, a raíz del descubrimiento de la expansión acelerada, lo que nos preguntamos es: ¿por qué es tan pequeña la constante cosmológica (o la fuerza ejercida por el vacío)? En 1987, tras todos los intentos previos y fallidos de poner una restricción a la energía del espacio vacío, el físico Steven Weinberg⁴⁵¹ planteó una audaz posibilidad: ¿y si la constante cosmológica no fuese realmente fundamental (es decir, explicable en el marco de una «teoría de todo»), sino *accidental*? Dicho de otro modo, imaginemos que existe un enorme conjunto de universos (un «multiverso») y que la constante cosmológica puede asumir distintos valores en distintos universos. En algunos de ellos, como en el universo contrafactual que hemos planteado con una lambda mil veces mayor, la complejidad y la vida no se habrían desarrollado. Los humanos nos

encontramos, naturalmente, en uno de los universos «biófilos». Así las cosas, no habría ninguna gran teoría unificada de las fuerzas fundamentales que pudiera fijar el valor de la constante cosmológica; este vendría determinado por el simple requisito de que se encuentre dentro del intervalo que permite la evolución de los humanos. En un universo con una constante cosmológica demasiado alta, no habría nadie para preguntarse sobre su valor. El físico Brandon Carter, que fue quien primero presentó este argumento⁴⁵² en los años 1970, lo bautizó como «principio antrópico». En concordancia con ello, los intentos de definir los dominios «provida» se describen como argumentación o razonamiento antrópico. ¿En qué condiciones podemos siquiera intentar aplicar este tipo de razonamiento para explicar el valor de la constante cosmológica?

Para que tenga algún sentido, la argumentación antrópica tiene que descansar sobre tres suposiciones básicas:

- 1. Las observaciones están sujetas a un «sesgo de selección», un filtrado de la realidad física, por el mero hecho de que las realizan los humanos.
- 2. Algunas de las «constantes de la naturaleza» nominales son accidentales, no fundamentales.
- 3. Nuestro universo no es más que un miembro más de un gigantesco conjunto de universos.

Examinemos muy brevemente cada uno de estos puntos e intentemos evaluar su viabilidad.

Los estadísticos siempre han detestado los sesgos de selección: distorsiones de los que se introducen o bien a causa de las herramientas de recolección de los datos, o bien por el método de acumulación de los datos. Veamos algunos ejemplos que muestran este efecto. Imaginemos que queremos poner a prueba una estrategia de inversión examinando el comportamiento de un gran grupo de valores frente a veinte años de datos. Uno podría

sentirse tentado a incluir en el estudio únicamente los valores de los que se tiene información completa para los veinte años del periodo de estudio. Sin embargo, eliminar los valores que dejaron de cotizar durante ese periodo produciría resultados sesgados, pues son esos precisamente los valores que no sobrevivieron al mercado.

Durante la segunda guerra mundial, el matemático judío austro-húngaro Abraham Wald demostró que comprendía muy bien el sesgo de selección. A Wald le pidieron que examinara datos⁴⁵³ sobre la localización de los impactos de fuego enemigo en el casco de los aviones que regresaban, con el fin de que hiciera recomendaciones sobre las partes de los aviones que había que reforzar para mejorar su supervivencia. Para sorpresa de sus superiores, Wald recomendó blindar las partes que *no* mostraban daños. Lo que Wald había entendido era que los agujeros de bala que veía en los aviones que habían sobrevivido indicaban los lugares donde un avión podía recibir impactos y resistir. Por consiguiente, concluyó que los aviones que habían caído probablemente habían recibido impactos precisamente en los lugares donde los aviones que habían regresado habían tenido la suerte de no haber sido alcanzados.

Los astrónomos conocen bien el *sesgo de Malmquist* (así llamado por el astrónomo sueco Gunnar Malmquist, que lo estudió a fondo en los años 1920)⁴⁵⁴. Cuando los astrónomos hacen una prospección de estrellas o galaxias, sus telescopios solamente son sensibles por encima de cierto brillo. Pero los objetos que son intrínsecamente más luminosos se pueden observar a distancias mayores, y esto crea la falsa tendencia de un aumento de la luminosidad intrínseca media con la distancia, simplemente porque los objetos más tenues no llegan a verse.

Brandon Carter manifestó que no debemos tomarnos demasiado al pie de la letra el principio copernicano, que no somos nada especial en el cosmos, y recordó a los astrónomos que los humanos son los únicos que hacen observaciones del universo y, en consecuencia, no debería sorprendernos

descubrir que las propiedades del cosmos son congruentes con la existencia humana. Por ejemplo, no podríamos descubrir que nuestro universo no contiene carbono, puesto que somos una forma de vida basada en el carbono. Al principio, la mayoría de los investigadores no vieron en el razonamiento antrópico de Carter más que una aseveración obvia y trivial. Sin embargo, durante el último par de décadas, el principio antrópico ha ganado algo de popularidad. Hoy más de un destacado teórico acepta el hecho de que en el contexto de un multiverso, el argumento antrópico puede conducirnos a una explicación natural del valor, de otro modo desconcertante, de la constante cosmológica. Para recapitular el argumento, si λ fuese mucho mayor (como algunas consideraciones probabilísticas parecen requerir), la aceleración cósmica habría superado a la gravedad antes de que las galaxias hubiesen tenido siquiera la oportunidad de formarse. El hecho de que nos encontramos en la galaxia de la Vía Láctea necesariamente sesga nuestras observaciones hacia valores bajos de la constante cosmológica en nuestro universo.

Pero ¿hasta qué punto es razonable suponer que una constante física es «accidental»? Un ejemplo histórico puede ayudarnos a clarificar este concepto. En 1597 el gran astrónomo alemán Johannes Kepler publicó un tratado⁴⁵⁵ conocido como *Mysterium Cosmographicum* (*El misterio cósmico*). En este libro, Kepler creía haber hallado la solución a dos desconcertantes enigmas cósmicos: por qué había precisamente seis planetas en el sistema solar (los seis que se conocían en su tiempo), y qué determinaba el tamaño de las órbitas planetarias. Incluso para su época, las respuestas de Kepler a estas preguntas rozaban la extravagancia. Lo que hizo fue construir un modelo del sistema solar encajando uno dentro del otro cinco cuerpos regulares conocidos como *sólidos platónicos* (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro). Junto a una esfera exterior que correspondía a las estrellas fijas, los sólidos determinaban de forma precisa seis espacios que, para Kepler, «explicaban» el número de planetas. Al escoger un orden

particular para encajar un sólido dentro de otro, Kepler logró reproducir de forma aproximada los tamaños relativos de las órbitas del sistema solar. El problema principal del modelo de Kepler no estaba en los detalles geométricos; al fin y al cabo, Kepler utilizó la matemática que conocía para explicar las observaciones disponibles. El principal fallo fue que Kepler no se dio cuenta de que ni el número de planetas ni los tamaños de sus órbitas eran cantidades fundamentales, es decir, cantidades que se puedan explicar a partir de primeros principios. Aunque las leyes de la física sin duda gobiernan el proceso general de la formación de los planetas a partir de un disco protoplanetario de gas y polvo, es el entorno particular de un objeto estelar joven lo que determina el resultado final.

Hoy sabemos que en la Vía Láctea hay millones de planetas extrasolares, y cada sistema planetario es diferente por lo que respecta a sus miembros y propiedades orbitales. Tanto el número de planetas como las dimensiones de sus circuitos son accidentales, igual que es accidental, por ejemplo, la forma precisa de un copo de nieve.

Hay una magnitud particular en el sistema solar que ha sido crucial para nuestra existencia: la distancia entre el Sol y la Tierra. Nuestro planeta se encuentra en la zona habitable alrededor del Sol, una estrecha región circumestelar donde es posible la existencia de agua líquida en la superficie del planeta. A menor distancia el agua se evapora y a mayor distancia, se congela. El agua fue esencial para la aparición de la vida en la Tierra porque las moléculas se podían combinar fácilmente en el «caldo» de la Tierra joven y formar largas cadenas resguardadas de las dañinas radiaciones ultravioletas. Kepler estaba obsesionado con la idea de encontrar una explicación basada en primeros principios para la distancia Tierra-Sol, pero se equivocaba en su obstinación. No había nada que, en principio, impidiera que la Tierra se formase a una distancia distinta. Pero si esa distancia hubiese sido significativamente mayor o menor, no habría habido Kepler que se preguntase por qué. Entre los miles de millones de sistemas solares de la

Vía Láctea, muchos probablemente no alberguen vida por no tener ningún planeta en la zona habitable alrededor de la estrella. Aunque las leyes de la física determinaron la órbita de la Tierra, no hay una explicación más profunda para el radio de su órbita aparte del hecho de que si hubiese sido muy distinta, no estaríamos aquí.

Esto nos lleva al último ingrediente necesario del argumento antrópico. Para que la explicación del valor de la constante cosmológica como magnitud accidental en un multiverso tenga algún sentido, tiene que haber un multiverso. ¿Lo hay? No lo sabemos, pero eso a algunos perspicaces físicos no les ha privado de especular. Lo que sí sabemos es que en un escenario teórico conocido como «inflación eterna», un drástico estiramiento del espacio-tiempo puede producir un multiverso eterno e infinito. Supuestamente, este multiverso estaría generando continuamente regiones de inflación, que evolucionarían hacia particulares «universos de bolsillo»⁴⁵⁶. El *big bang* con el que apareció nuestro particular «universo de bolsillo» solo es un evento más en un esquema mucho mayor de un sustrato que se expande exponencialmente. Algunas versiones de la «teoría de cuerdas» (que hoy se conoce a veces como «teoría M») también permiten una enorme variedad de universos (¡más de 10^{500} !), cada uno de ellos potencialmente caracterizado por distintos valores de las constantes físicas. Si este escenario especulativo fuese correcto, lo que tradicionalmente hemos llamado «el universo» no sería más que un pedazo de espacio-tiempo dentro de un vasto paisaje cósmico⁴⁵⁷.

No quisiera que nadie se llevase la impresión de que todos los físicos (o siquiera la mayoría) creen que la solución al rompecabezas de la energía del espacio vacío nos llegará por medio de un razonamiento antrópico. La simple mención de «multiverso» y «antrópico» hace que a algunos físicos les suba la tensión. Hay dos razones principales para esta reacción adversa. La primera es que, como ya se ha comentado en el capítulo 9, desde los trabajos pioneros del filósofo de la ciencia Karl Popper, para que una teoría

científica merezca este calificativo tiene que ser falsable mediante experimentos u observaciones. Este requisito se ha convertido en el fundamento del «método científico». Una suposición sobre la existencia de un conjunto de universos potencialmente no observables se nos presenta, a primera vista, en conflicto con este requisito y, por lo tanto, más en el dominio de la metafísica que en el de la física. No obstante, la frontera entre lo que definimos como observable y no observable no está clara. Pensemos, por ejemplo, en el «horizonte de partículas», la superficie que nos envuelve desde la cual nos llega la radiación emitida en el *big bang*. En el modelo de Einstein-De Sitter, el de un universo homogéneo, isotrópico, con curvatura constante y sin constante cosmológica, la expansión cósmica está en deceleración, y cabe esperar que todos los objetos que actualmente se encuentran más allá del horizonte se tornen observables en el futuro lejano. Pero desde 1998 sabemos que no vivimos en un cosmos de Einstein-De Sitter: nuestro universo se está acelerando. En este universo, cualquier objeto que actualmente se encuentre más allá del horizonte seguirá estándolo para siempre. Además, si, como sugiere el hecho de que haya una constante cosmológica, la expansión acelerada continúa, ¡incluso galaxias que hoy podemos ver llegarán a ser invisibles para nosotros! A medida que su velocidad de recesión se acerque a la velocidad de la luz, su radiación se estirará (corrimiento al rojo) hasta el momento en que su longitud de onda sea mayor que el tamaño del universo. (No hay un límite para la velocidad a la que se estira el espacio-tiempo, puesto que en realidad no se mueve ninguna masa). Así pues, incluso nuestro propio universo acelerado contiene objetos que ni nosotros ni las generaciones de astrónomos del futuro podrán observar. Sin embargo, no se nos ocurre pensar que esos objetos pertenezcan al dominio de la metafísica. Entonces, ¿qué nos podría dar confianza en universos potencialmente no observables? La respuesta es una extensión natural del método científico: podemos creer en su existencia si la predice una teoría que adquiere credibilidad porque es corroborada de otras

maneras. Creemos en las propiedades de los agujeros negros porque su existencia la predice la relatividad general, una teoría que se ha puesto a prueba en numerosos experimentos. Las reglas deberían ser una extensión simple de las ideas de Popper: si una teoría realiza predicciones contrastables y falsables en las partes observables del universo, deberíamos estar dispuestos a aceptar sus predicciones sobre aquellas partes del universo (o multiverso) que no son accesibles a la observación directa.

La segunda razón principal de las pasiones hostiles que provoca el razonamiento antrópico es que para algunos científicos señala el «fin de la física». Siguiendo a Descartes, la mayoría de los físicos sueñan, por encima de todo, con una teoría matemática única e intrínsecamente coherente que explique y determine todas las constantes microfísicas, además de toda la evolución cósmica. Por consiguiente, les gustaría seguir, en palabras del cosmólogo Edward Milne, «un camino único hacia la comprensión de esta entidad única, el universo». No cabe duda de que también Einstein albergaba esta esperanza. En una conferencia pronunciada en Oxford⁴⁵⁸ en 1933, Einstein dijo: «Estoy convencido de que la construcción matemática pura nos permite descubrir los conceptos, y las leyes que los conectan, que nos proporcionan la clave para entender el fenómeno de la naturaleza». Como es bien sabido, Einstein no se sentía cómodo siquiera con la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica, aunque valoraba plenamente sus éxitos. En una carta que escribió el 4 de diciembre de 1926 a Max Born, uno de los padres fundadores de la mecánica cuántica, Einstein expresó su opinión:

La mecánica cuántica es ciertamente imponente. Pero una voz interior me dice que *no es todavía la de verdad* [la cursiva es mía]. La teoría da mucho de sí, pero apenas nos acerca a los secretos del Viejo. Yo, en todo caso, estoy convencido de que Él no juega a los dados.

El concepto de variables accidentales en un multiverso potencialmente no observable seguramente habría inquietado a Einstein todavía más. Nótese,

sin embargo, que las reservas de Einstein hacia la mecánica cuántica nacían más de la psicología (su creencia en que sabía en qué dirección buscar) que del núcleo duro de la física. Lo mismo podría ocurrir al final con las objeciones al razonamiento antrópico. A pesar de la experiencia de las últimas décadas, nada nos garantiza que la realidad física se vaya a prestar a ser explicada en su totalidad a partir de primeros principios. La búsqueda de tales descripciones puede resultar tan fútil como la búsqueda de Kepler de un bello modelo geométrico del sistema solar. Lo que tradicionalmente hemos llamado constantes fundamentales, incluso lo que tenemos por leyes de la naturaleza, podrían resultar no ser más que variables accidentales y leyes secundarias solo para nuestro propio universo. Tal vez el principio antrópico acabe desempeñando un papel parecido al que el filósofo Bertrand Russell asignaba a la filosofía: «El objeto de la filosofía es comenzar con algo tan simple que parezca que apenas merece enunciarse y acabar con algo tan paradójico que nadie pueda creerlo».

El pensamiento antrópico sobre la naturaleza de la constante cosmológica demuestra el profundo impacto que sigue teniendo sobre la física de vanguardia el intento aparentemente inocente de Einstein de describir un universo estático. ¿Cómo debemos valorar entonces el «mayor error» de Einstein?

El segundo *annus mirabilis*

Suele decirse de 1905 que fue el *annus mirabilis* («año de los milagros») de Einstein porque fue entonces cuando publicó sus artículos pioneros sobre cómo la luz hace saltar electrones al incidir sobre los metales (el «efecto fotoeléctrico», que engendró la mecánica cuántica y le valió el premio Nobel), sobre la deriva aleatoria de partículas suspendidas en un fluido (el «movimiento browniano») y la teoría de la «relatividad especial». Aunque 1905 fue sin duda un año prodigioso para Einstein, en realidad tuvo un segundo *annus mirabilis* (quince meses, para ser exactos) de noviembre de

1915 a febrero de 1917. Durante este periodo, publicó no menos de quince tratados, entre ellos el pináculo de su obra, la relatividad general, y dos contribuciones importantes a la mecánica cuántica. Así nació la cosmología moderna, y con ella la constante cosmológica.

Confío en que los datos presentados en el capítulo 10 hayan convencido al lector de que lo más probable es que Einstein nunca usara la expresión «mayor error». Además, la introducción de la constante cosmológica no fue un error en absoluto, pues los principios de la relatividad general daban luz verde a ese término. Creer que la constante garantizaría un universo estático fue sin duda un error lamentable, pero no de la magnitud de los que se consideran en este libro. ¡El verdadero error de Einstein fue *quitar* la constante cosmológica! Recordemos una vez más que quitar el término de las ecuaciones equivale a asignar arbitrariamente el valor *cero* a λ . Al hacerlo, Einstein restringió la generalidad de su teoría, pagando un elevado precio por la concisión de las ecuaciones, aun antes del reciente descubrimiento de la aceleración cósmica.

La simplicidad es una virtud cuando se aplica a los principios fundamentales, no a la forma de las ecuaciones. En el caso de la constante cosmológica, Einstein se equivocó al sacrificar la generalidad en el altar de la elegancia superficial. Una simple analogía ayudará a clarificar este concepto. Cuando Kepler descubrió que las órbitas planetarias eran elípticas en lugar de circulares, el gran Galileo Galilei se negó a creerlo. Galileo todavía vivía prisionero de los ideales estéticos de la antigüedad, según los cuales las órbitas tenían que ser perfectamente simétricas. Pero la física ha demostrado que se trata de un prejuicio injustificado. En realidad hay una simetría más profunda que la simple simetría de las formas. La ley de la gravitación universal de Newton dice que las órbitas elípticas (que son una consecuencia natural de esta ley) pueden tener cualquier orientación en el espacio. En otras palabras, la ley no cambia si medimos las direcciones con respecto al norte, el sur o la estrella más cercana: es simétrica con respecto a la

rotación. Cuando Einstein dijo de la constante cosmológica que era «fea», demostró sufrir el mismo tipo de sesgo y miopía. Debería haberse aferrado a su instinto inicial de que llegaría el día en que podamos «permitirnos decidir empíricamente la cuestión de si Λ desaparece o no», como le escribió a De Sitter. Ese día llegó en 1998.

Los errores de un genio

Más del 20 por ciento de los artículos originales de Einstein contienen errores de uno u otro tipo. En varios casos, aunque comete errores por el camino, el resultado final sigue siendo correcto. Esta es a menudo la marca que distingue a los grandes teóricos: se guían más por la intuición que por el formalismo. En una carta que escribió el 3 de febrero de 1915 al físico holandés Hendrik Lorentz, Einstein proporcionó su propia perspectiva sobre los errores en las teorías científicas:

Un teórico se equivoca de dos maneras:

- 1. El diablo lo lleva del hocico con falsas hipótesis. (Por esto, merece nuestra compasión).*
- 2. Sus argumentos son erróneos y chapuceros. (Por esto, merece una paliza).*

Aunque el propio Einstein ciertamente cometió errores de los dos tipos, su claridad de visión para la física, sin parangón, le mostró en muchas ocasiones el camino que llevaba a las respuestas correctas. Por desgracia nosotros, los simples mortales, no podemos imitar ni adquirir su talento.

En 1949 un colaborador de Einstein, Leopold Infeld⁴⁵⁹, describió de este modo el artículo pionero de Einstein sobre la cosmología:

Aunque es difícil exagerar la importancia de este artículo [...] las ideas originales de Einstein, vistas desde la perspectiva de nuestros días, son anticuadas, si no erróneas [...] De hecho, es un ejemplo más de cómo una

solución errónea a un problema fundamental puede ser incomparablemente más importante que una solución correcta a un problema trivial y sin interés. El ensayo de Infeld apareció en un volumen en honor a Einstein titulado *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Contribuyeron a este libro nada menos que seis premios Nobel. En su contribución, Georges Lemaître describió lo que consideraba razones de peso para mantener la constante cosmológica en las ecuaciones: «La historia de la ciencia nos ofrece muchos casos de descubrimientos que se realizaron por razones que ya no se consideran satisfactorias. Es posible que el descubrimiento de la constante cosmológica [por Einstein] sea uno de esos casos⁴⁶⁰». Cuánta razón tenía.

El propio Einstein permaneció poco convencido⁴⁶¹. En sus «Comentarios sobre los ensayos recogidos en este volumen colectivo», repite sus argumentos anteriores:

La introducción de esta constante implica una renuncia considerable de la lógica de la simplicidad de [la] teoría, una renuncia que me pareció inevitable solo mientras no tuviera razón para dudar de la naturaleza esencialmente estática del espacio.

Y prosigue diciendo que tras el descubrimiento por Hubble de la expansión cósmica y la demostración de Friedmann de que la expansión se podía acomodar dentro de las ecuaciones originales, le pareció que la introducción de lambda «en el presente [1949] no está justificada». Nótese, por cierto, que aunque Einstein escribe estos comentarios no mucho después de su correspondencia con Gamow, no alude en ningún momento a su «mayor error».

Por un lado, se puede argumentar que Einstein tenía razón al rehusar añadir a sus ecuaciones un término que las observaciones no requerían absolutamente. Por otro lado, Einstein ya había perdido una oportunidad de predecir la expansión cósmica al fiarse de la falta de pruebas de los movimientos estelares. Al denunciar la constante cosmológica, perdió una segunda oportunidad, esta vez de predecir ¡la aceleración del universo! En

un científico normal y corriente, dos descuidos como estos sin duda se verían como falta de intuición, una conclusión a la que no podemos llegar en el caso de Einstein. Los fallos de Einstein⁴⁶² nos recuerdan que la lógica humana no es a prueba de errores, aunque quien la ejerza sea un genio monumental. Einstein siguió pensando en una teoría unificada y en la naturaleza de la realidad física hasta el final de sus días. Ya en 1940 previó las dificultades a las que se enfrentan los actuales teóricos de las cuerdas: «Los dos sistemas [relatividad general y teoría cuántica] no se contradicen directamente, pero parecen ser poco idóneos para fusionarse en una sola teoría unificada». Luego, apenas un mes antes de su muerte, en 1955, a la edad de setenta y seis años, añadió algunas dudas personales: «Parece dudoso que una teoría de campos [clásica] pueda explicar la estructura atomista de la materia y la radiación al mismo tiempo que los fenómenos cuánticos». No obstante, Einstein encontró cierto alivio en las palabras del dramaturgo del siglo XVIII Gotthold Ephraim Lessing: «La aspiración a la verdad es más valiosa que su posesión segura⁴⁶³». Con errores o sin ellos, posiblemente nadie en la memoria reciente haya aspirado más a la verdad que Albert Einstein.

Coda

*Permítame advertirle seriamente
contra la pretensión de hallar la razón
y explicación de todo [...] Intentar
buscar la razón de todo es sumamente
peligroso y no conduce sino a la
decepción y la insatisfacción; inquieta
la mente y, al cabo, trae la desdicha.*

Reina Victoria

Ninguna teoría científica goza de un valor absoluto y permanente. A medida que mejoran los métodos y herramientas de observación y experimentación, las teorías pueden ser refutadas o pueden metamorfosearse en formas nuevas que incorporan algunas de las ideas antiguas. El propio Einstein hacía hincapié en esta naturaleza evolutiva de las teorías de la física: «No hay más bello destino para una teoría científica que apuntar el camino para el establecimiento de una teoría más general, en la que vive como un caso limitado». La teoría de Darwin de la evolución de la vida por medio de la selección natural no fue sino reforzada con la aplicación de la genética moderna. La teoría de la gravedad de Newton sigue viviendo como un caso limitado dentro del marco de la relatividad general. El camino hacia una teoría «nueva y mejorada» no es un camino de rosas, y decididamente el progreso no es una carrera veloz hasta la verdad. Si luminarias como Darwin, Kelvin, Pauling, Hoyle y Einstein pueden cometer errores tan graves, qué no harán los científicos menores. Cuando James Joyce escribió en *Ulises*: «Un genio no comete errores. Sus errores son deliberados y portales de descubrimientos», pretendía ser provocador con la primera parte de su comentario. Sin embargo, como hemos visto en este libro, no cabe duda de que los errores de los genios son portales de descubrimientos.

En el cuento de hadas *The Princess Bride* (*La princesa prometida*), la película de 1987 del director Rob Reiner, uno de los personajes se enzarza en una batalla de ingenio con el protagonista, y en cierto momento exclama: «¡Has caído víctima de un error clásico! El más famoso de los cuales es "nunca te metas en una guerra en Asia"». Todos estaremos de acuerdo en que la historia reciente ha demostrado que este es un buen consejo. El famoso matemático y filósofo Bertrand Russell hizo otra sugerencia⁴⁶⁴ a quienes quieran asegurarse de evitar el fanatismo: «No te sientas absolutamente seguro de nada». Los ejemplos de este libro demuestran que este «mandamiento» puede tomarse también como una recomendación sobre cómo esquivar los grandes errores... aunque no estoy del todo seguro de eso. La duda suele verse como una señal de debilidad, pero también es un eficaz mecanismo de defensa y un principio operativo esencial en la ciencia.

Kelvin, Hoyle y Einstein nos han revelado también otro aspecto fascinante de la naturaleza humana. Del mismo modo que la gente (incluidos los científicos) a veces se muestra reacia a admitir sus errores, otras veces se opone obstinadamente a las ideas nuevas. Max Planck, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, dijo una vez con cierto cinismo: «Una nueva verdad científica no triunfa porque convenza a sus oponentes y les haga ver la luz, sino porque sus oponentes acaban muriendo y la nueva generación crece familiarizada con ella». Triste, pero quizá cierto.

Los psicólogos Amos Tversky y Daniel Kahneman⁴⁶⁵ establecieron una base cognitiva para los errores humanos comunes con la ayuda del concepto de *heurística*: reglas empíricas simples que guían la toma de decisiones. Una de las cosas que descubrieron fue que la gente tiende a confiar más en su comprensión intuitiva (que se basa fundamentalmente en su experiencia personal), que en datos reales. Naturalmente, los científicos del calibre de Darwin, Pauling o Einstein creían que su intuición los guiaría hasta la respuesta correcta aunque el camino correcto hacia delante fuese esquivo o el paisaje científico estuviese cambiando a una velocidad de vértigo. Como

ya he comentado, Bertrand Russell comprendía los peligros del exceso de confianza y de la certidumbre, y creía haber hallado una solución cuando defendió el hábito de supeditar las creencias «a observaciones e inferencias tan impersonales, tan despojadas de sesgos locales o temperamentales, como les sea posible a los seres humanos». Lamentablemente, no es fácil seguir este consejo. La moderna neurociencia nos muestra inequívocamente que la corteza orbitofrontal (una región de los lóbulos frontales del cerebro) integra emociones en la corriente del pensamiento racional. Los humanos no son seres puramente racionales capaces de apagar completamente sus pasiones.

A pesar de sus errores, o tal vez *gracias* a ellos, los cinco personajes que he seguido y bosquejado en este libro no solo han producido innovaciones dentro de sus ciencias respectivas, sino también creaciones intelectuales verdaderamente importantes. A diferencia de muchos trabajos científicos dirigidos únicamente a los profesionales de la propia disciplina, las obras de estos maestros han traspasado las fronteras que separan a la ciencia de la cultura general. La influencia de sus ideas se ha dejado sentir mucho más allá de su significación inmediata para la biología, la geología, la física o la química. En este sentido, la obra de Darwin, Kelvin, Pauling, Hoyle y Einstein se acerca en espíritu a los logros de la literatura, el arte y la música: todas ellas dejan una amplia marca en la cultura.

No hay mejor manera de acabar un libro sobre errores que con un importante recordatorio, una súplica de humildad, si se prefiere, que nadie puede expresar con más elocuencia que Darwin:

Debemos reconocer, sin embargo, o así me lo parece, que el hombre con todas sus nobles cualidades, con la compasión que siente hacia lo más degradado, con la benevolencia que extiende no ya a otros hombres, sino a los más humildes seres vivos, con su divino intelecto que ha penetrado en los movimientos y constitución del sistema solar; con todas estas exaltadas

potencias, el hombre todavía lleva en su cuerpo el sello indeleble de sus orígenes modestos⁴⁶⁶.

Bibliografía

- Alpher, R. A., Bethe, H. y Gamow, G. 1948. «The Origin of Chemical Elements», *Physical Review*, 73, p. 803.
- Aristóteles, siglo IV AEC. *The History of Animals*, libro 9, capítulo 6. La traducción de D'Arcy Wentworth Thompson se puede encontrar en www.mlahanas.de/Greeks/Aristotle/HistoryOfAnimals9.html (hay trad. cast.: *Investigación sobre los animales*, Gredos, Madrid, 1992).
- Armstrong, H. E. 1920. «Prof. John Perry, F. R. S.», *Nature*, 105, p. 751.
- Astbury, W. T. 1936. «X-Ray Studies of Protein Structure», *Nature*, 141, p. 803.
- Astbury, W. T. y Bell, F. O. 1938. «Some Recent Developments in the X-Ray Study of Proteins and Related Structures», *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 6, p. 109. ; [...], 1939. «X-Ray Data on the Structure of Natural Fibres and Other Bodies of High Molecular Weight», *Tabulae Biologicae*, 17, p. 90.
- Avery, D. T., MacLeod, C. M. y McCarty, M. 1944. «Studies on the Chemical Nature of the Substance Inducing Transformation of Pneumococcal Types: Induction of Transformation by a Desoxyribonucleic Acid Fraction Isolated from *Pneumococcus* Type III», *Journal of Experimental Medicine*, 79, p. 137.
- Bäckman, L. y Nyberg, L. 2010. *Memory, Aging and the Brain: A Festschrift in Honour of Lars-Göran Nilsson*, Psychology Press, Hove (Reino Unido).
- Barrow, J. D. 2005. «Worlds Without End or Beginnings», en D. Gough (ed). *The Scientific Legacy of Fred Hoyle*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 93.
- Barrow, J. D. y Tipler, F. J. 1986. *The Anthropic Cosmological Principle*, Clarendon Press, Oxford.

- Bechara, A., Damasio, H. y Damasio, A. R. 2000. «Emotion, Decision Making and the Orbitofrontal Cortex», *Cerebral Cortex*, 10, p. 295.
- Becker, L. E. 1869. «On the Study of Science by Women», *Contemporary Review*, 10, enero-abril de 1869, pp. 389-390.
- Becquerel, H. 1896. «Sur les Radiations Invisibles Émises par les Corps Phosphorescents», *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 122, p. 501.
- Bell, G. 2008. *Selection: The Mechanism of Evolution*, 2.a, Oxford University Press, Oxford.
- Berenstein, J. 1973. *Einstein, Modern Masters Series*, Viking, Nueva York.
- Berridge, K. C. 2003. «Pleasures of the Brain», *Brain and Cognition*, 52, p. 106.
- Bethe, H. A. 1939. «Energy Production in Stars», *Physical Review*, 55, p. 434.
- Blackburn, H. 1902. *Women's Suffrage: A Record of the Women's Suffrage Movement in the British Isles*, Williams and Norgate, Londres.
- Block, D. 2011. «Georges Lemaitre and Stiglers Law of Eponymy», <http://arxiv.org/abs/1106.3928>.
- Bloom, P. 2010. *How Pleasure Works: The New Science of Why We Like What We Like*, W. W. Norton, Nueva York (hay trad. cast.: *La esencia del placer*, Ediciones B, Barcelona, 2010).
- Blow, D. 2002. *Outline of Crystallography for Biologists*, Oxford University Press, Oxford.
- Bondi, H. 1955. En *Proceedings at Meeting of the Royal Astronomical Society*, n.o 886, p. 106. ; [...], 1990. «The Cosmological Scene 1945-1952», en B. Bertotti, R. Balbinot, S. Sergio y A. Messina (eds)., *Modern Cosmology in Retrospect*, Cambridge University Press, Cambridge.

- Bondi, H. y Gold, T. 1948. «The Steady-State Theory of the Expanding Universe», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 108, p. 252.
- Bondi, H. y Salpeter, E. E. 1952. «Thermonuclear Reactions and Astrophysics», *Nature*, 169, p. 304.
- Boorstin, D. J. 1983. *The Discoverers: A History of Man's Search to Know His World and Himself*, Random House, Nueva York (hay trad. cast.: *Los descubridores*, Crítica, Barcelona, 1998).
- Born, M. 1948. En *Proceedings at Meeting of the Royal Astronomical Society*, n.o 847, p. 217.
- Bowersox, J. 1999. «Experimental Staph Vaccine Broadly Protective in Animal Studies», *NIH News*, 27 de mayo de 1999.
- Bowler, P. J. 2009. *Evolution: The History of an Idea, 25th Anniversary Edition*, University of California Press, Berkeley.
- Bozarth, M. A. 1994. «Pleasure Systems in the Brain», en D. M. Warburton (ed)., *Pleasure: The Politics and the Reality*, John Wiley & Sons, Nueva York, p. 5.
- Bragg, sir W. L., Kendrew, J. C. y Perutz, M. F. 1950. «Polypeptide Chain Configurations in Crystalline Proteins», *Proceedings of the Royal Society of London*, A203, p. 321.
- Brannigan, A. 1981. *The Social Basis of Scientific Discoveries*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Braun, G., Tierney, D. y Schmitzer, H. 2011. «How Rosalind Franklin Discovered the Helical Structure of DNA: Experiments in Diffraction», *Physics Teacher*, 49, p. 140.
- Brecher, K. y Silk, J. 1969. «Lemaître Universe, Galaxy Formation and Observations», *Astrophysical Journal*, 158, p. 91.
- Brehm, J. W. 1956. «Postdecision Changes in the Desirability of Alternatives», *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 52(3), p. 384.

- Brice, W. R. 1982. «Bishop Ussher, John Lightfoot and the Age of Creation», *Journal of Geological Education*, 30, p. 18.
- Brownlie, A. D. y Lloyd Prichard, M. F. 1963. «Professor Fleeming Jenkin, 1833-1885, Pioneer in Engineering and Political Economy», *Oxford Economic Papers*, 15(3), p. 204.
- Brunauer, S. 1986. «Einstein and the Navy:... An Unbeatable Combination», *On the Surface*. Naval Surface Weapons Center, 24 de enero de 1986.
- Bulmer, M. 2004. «Did Jenkin's Swamping Argument Invalidate Darwin's Theory of Natural Selection?», *British Journal for the History of Science*, 37(3), p. 281.
- Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A. y Hoyle, F. 1957. «Synthesis of the Elements in Stars», *Reviews of Modern Physics*, 29(4), p. 547.
- Burbidge, G. 2003. «Sir Fred Hoyle», *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 49, p. 213. ; [...], 2008. «Hoyle's Role in B2FH», *Science*, 319, p. 1484.
- Burcheld, J. D. 1990. *Lord Kelvin and the Age of the Earth*, University of Chicago Press, Chicago.
- Burton, R. A. 2010. *On Being Certain: Believing You Are Right Even When You're Not*, St. Martin's Griffin, Nueva York.
- Calder, L. y Lahav, O. 2008. «Dark Energy: Back to Newton?», *Astronomy & Geophysics*, 49, 1.13.
- Carozzi, A. V. 1969. *Telliamed, or Conversations between an Indian Philosopher and a French Missionary on the Diminution of the Sea*, University of Illinois Press, Urbana. [Traducción al inglés de: De Maillet 1748.]
- Carroll, S. B. 2009. *Remarkable Creatures: Epic Adventures in the Search for the Origin of Species*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston.

- Carroll, S. B., Grenier, J. K. y Weatherbee, S. D. 2001, *From DNA to Diversity: Molecular Genetics and the Evolution of Animal Design*, Blackwell Science, Malden.
- Carroll, S. M. 2001. «The Cosmological Constant», *Living Reviews in Relativity*, 3, p. 1. ; [...], 2010. *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*, Dutton, Nueva York.
- Carter, B. 1974. «Large Number Coincidences and the Anthropic Principle in Cosmology», en *IAU Symposium 63, Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data*, Reidel, Dordrecht, p. 291.
- Chabris, C. y Simons, D. 2010. *The Invisible Gorilla, and Other Ways Our Intuitions Deceive Us*, Crown, Nueva York.
- Chamberlin, T. C. 1899. «Lord Kelvin's Address on the Age of the Earth as an Abode Fitted for Life», *Science, New Series*, 9(235), p. 889.
- Chapman, A. D. 2009. *Numbers of Living Species in Australia and the World*, 2.a ed., Australia Biodiversity Information Services, Toowoomba, Australia.
- Chargaff, E. 1950. «Chemical Specificity of Nucleic Acids and the Mechanism of their Enzymatic Degradation», *Experimentia*, 6, p. 201. ; [...], 1978, *Heraclitean Fire: Sketches from a Life before Nature*, Rockefeller University Press, Nueva York.
- Chargaff, E., Zamenhof, S. y Green, C. 1950. «Composition of Human Desoxyribose Nucleic Acid», *Nature*, 165, p. 756.
- Chou, C. W., Hume, D. B., Rosenband, T. y Wineland, D. J. 2010. «Optical Clocks and Relativity», *Science*, 329, p. 1630.
- Chown, M. 2001. *The Magic Furnace: The Search for the Origins of Atoms*, Oxford University Press, Oxford.
- Cicerón, M. T. 45 BCE. *The Nature of Gods*, p. 78; 1997. Edición anotada y traducción de P. G. Walsh, Oxford University Press, Oxford

(hay trad. cast., Sobre la naturaleza de los dioses, Gredos, Madrid, 2001).

- Clayton, D. D. 2007. «Hoyle's Equation», *Science*, 318, p. 1876.
- Cooper, J. y Fazio, R. H. 1984. «A New Look at Dissonance Theory», en L. Berkowitz (ed.), *Advances in Experimental Social Psychology*, Academic Press, Nueva York.
- Cosmides, L. y Tooby, J. 1996. «Are Humans Good Intuitive Statisticians After All? Rethinking Some Conclusions from Literature on Judgment Under Uncertainty», *Cognition*, 58, p. 1.
- Coute, D. 1978. *The Great Fear: The Anti-Communist Purge Under Truman and Eisenhower*, Touchstone, Nueva York.
- Coyne, J. A. 2009. *Why Evolution Is True*, Viking, Nueva York (hay trad. cast.: Por qué la teoría de la evolución es verdadera, Crítica, Barcelona, 2009).
- Coyne, J. A. y Orr, H. A. 2004. *Speciation*, Sinauer, Sunderland.
- Crick, F. 1988. *What Mad Pursuit: A Personal View of Scientific Discovery*, Basic Books, Nueva York (hay trad. cast.: Qué loco propósito, Tusquets, Barcelona, 1989).
- Curie, P. y Laborde, A. 1903. «Sur la Chaleur Dégagée Spontanément par les Sels de Radium», *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 136, p. 673.
- Dalrymple, G. B. 1991. *The Age of the Earth*, Stanford University Press, Stanford. ; [...], 2001. «The Age of the Earth in the Twentieth Century: A Problem (Mostly) Solved», *Geological Society, London, Special Publications*, 190, p. 205.
- Darwin, C. 1868. *The Variation of Animals and Plants Under Domestication*, John Murray, Londres (hay trad. cast.: La variación de los animales y las plantas bajo domesticación, Los Libros de la Catarata, Madrid, 2009). ; [...], 1909 [1842]. *The Foundations of the Origin of Species, A Sketch Written in 1842*, edición de F. Darwin,

Cambridge University Press, Cambridge (hay trad. cast.: La teoría de la evolución de las especies, Crítica, Barcelona, 2006).; [...], 1958 [1892]. The Autobiography of Charles Darwin and Selected Letters, edición de F. Darwin, Dover Publications, Nueva York (hay trad. cast.: Autobiografía, Alianza, Madrid, 1997).; [...], 1964 [1859]. On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life, John Murray, Londres; reimpresión: Harvard University Press, Harvard (hay trad. cast.: El origen de las especies por medio de la selección natural, Los Libros de la Catarata, Madrid, 2009).; [...], 1981 [1871]. The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex, John Murray, Londres; reimpresión facsímil con introducción de J. T. Bonner y R. M. May, Princeton University Press, Princeton (hay trad. cast.: El origen del hombre, Crítica, Barcelona, 2009).; [...], 1998. The Descent of Man, Prometheus Books, Amherst, publicación original en Estados Unidos en Crowell, Nueva York, 1874.; [...], 2009 [1853]. The Annotated Origin: A Facsimile of the First Edition of On the Origin of Species, edición anotada de J. T. Costa, Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, MA.

- Darwin, F. 1887. The Life and Letters of Charles Darwin, John Murray, Londres.
- Darwin, F. y Seward, A. C. 1903. More Letters of Charles Darwin: A Record of His Work in a Series of Hitherto Unpublished Letters, D. Appleton, Nueva York, Carta 406*, p. 36. Reimpresión: Johnson, Nueva York, 1972.
- Darwin, G. H. 1886. «Presidential Address to Section A», BAAS Report, 56, 511. ; [...], 1903. «Radio-Activity and the Age of the Sun», Nature, 68, 496.; [...], 1907-1916. The Scientific Papers of Sir George Darwin, edición de F. J. M. Stratton y J. Jackson, 5 vols., reimpresión: Cambridge University Press, Cambridge, 2009.

- Davies, P. 2011. «Out of the Ether», *New Scientist*, 19 de noviembre, p. 50.
- Davis, A. S. 1871. «The "North British Review" and the Origin of Species», *Nature*, 28 de diciembre, p. 161.
- Dawkins, R. 1986. *The Blind Watchmaker*, W. W. Norton, Nueva York (hay trad. cast.: *El relojero ciego*, RBA, Barcelona, 1993). ; [...], 2006. *The God Delusion*, Houghton Mifflin, Nueva York (hay trad. cast.: *El espejismo de Dios*, Espasa, Madrid, 2007).; [...], 2009. *The Greatest Show on Earth: The Evidence for Evolution*, Free Press, Nueva York (hay trad. cast.: *Evolución: el mayor espectáculo de la Tierra*, Espasa, Madrid, 2009).
- De Beer, G. 1964. «Mendel, Darwin, and Fisher», *Notes and Records of the Royal Society of London*, 19(2), p. 192.
- Dein, S. 2001. «What Really Happens When Prophecy Fails: The Case of Lubavitch», *Sociology of Religion*, 62(3), 383.
- De Maillet, B. 1748. *Telliamed ou Entretiens d'un Philosophe Indien avec un Missionnaire Français sur la Diminution de la Mer, le Formation de la Terre, L'Origine de L'Homme etc.*, ed. J.-A. Guer, L'Honoré et Fils, Amsterdam, traducción y edición de Carozzi 1969.
- De Martino, B., Kumaran, D., Seymour, B. y Dolan, R. J. 2006. «Frames, Biases, and Rational Decision-Making in the Human Brain», *Science*, 313, p. 684.
- Dennett, D. C. 1995. *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*, Simon & Schuster, Nueva York (hay trad. cast.: *La peligrosa idea de Darwin: evolución y significados de la vida*, Galaxia Gutenberg, Barcelona, 2000).
- Depew, D. J. y Weber, B. H. 1995. *Darwinism Evolving: Systems Dynamics and the Genealogy of Natural Selection*, MIT Press, Cambridge, MA.

- De Roode, J. 2007. «Reclaiming the Peppered Moth for Science», *New Scientist*, 8, diciembre, p. 46.
- De Sitter, W. 1917. «On the Relativity of Inertia, Remarks Concerning Einstein's Latest Hypothesis», *Proceedings of the Royal Academy of Amsterdam*, 19, p. 1217.
- Des Jardins, J. 2010. *The Madame Curie Complex: The Hidden History of Women in Science*, The Feminist Press, Nueva York.
- Dine, M. 2007. *Supersymmetry and String Theory: Beyond the Standard Model*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Dobzhansky, T. 1973. «Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution», *American Biology Teacher*, 35, p. 125.
- Dover, G. 2000. *Dear Mr. Darwin: Letters on the Evolution of Life and Human Nature*, University of California Press, Berkeley.
- Dunbar, D. N. F., Pixley, R. E., Wenzel, W. A. y Whaling, W. 1953. «The 7.68-MeV State in C12», *Physical Review*, 92, p. 649.
- Dunitz, J. D. 1991. «Linus Pauling—Born 1901, Still Going Strong», *Croatica Chemica Acta*, 64(3), p. 1.
- Dyson, F. W., Eddington, A. S. y Davidson, C. 1920. «A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A 220, p. 291.
- Earman, J. 2001. «Lambda: The Constant That Refuses to Die», *Archives for History of Exact Sciences*, 55, p. 190.
- Eddington, A. S. 1920. «The Internal Constitution of the Stars», *Observatory*, 43, p. 341. ; [...], 1923. *The Mathematical Theory of Relativity*, Cambridge University Press, Cambridge.; [...], 1926. *The Internal Constitution of the Stars*, Cambridge University Press, Cambridge.; [...], 1930. «On the Instability of Einstein's Spherical World», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 90, p.

- 668.; [...], 1952. *The Expanding Universe*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Einstein, A. 1917. «Cosmological Considerations on the General Theory of Relativity», traducción al inglés de «Kosmologische Betrachtungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie», *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften*, p. 142. ; [...], 1919. En PAW, p. 249; descrito también en Pais 1982, p. 287.; [...], 1927. «The Formal Relationship of Riemann's Curvature Tensor to the Field Equilibria of Gravitation», *Mathematische Annalen*, 97, p. 99.; [...], 1931. En 1960, *Sitzungsberichte, Preussische Akademie der Wissenschaften (PAW)*, Sc. Carl Seelig, Albert Einstein, Europa Verlag, Zürich, p. 235.; [...], 1934. «On the Method of Theoretical Physics», *Philosophy of Science*, 1 (2), p. 163.; [...], 1949. «Remarks Concerning the Essays Brought Together in this Co-Operative Volume», en P. A. Schilpp (ed.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist, Library of Living Philosophers*, Evanston, IL.; [...], 1955. *The Meaning of Relativity*, 5.a ed. Including the Relativistic Theory of the Non-Symmetric Field, Princeton University Press, Princeton (hay trad. cast.: *El significado de la relatividad*, Espasa, Madrid, 2005).; [...], 1966. *The Meaning of Relativity*, 5.a ed. Including the Relativistic Theory of the Non-Symmetric Field, Princeton University Press, Princeton.; [...], 2005. *Relativity: The Special and General Theory*, traducción de R. W. Lawson, con una introducción de R. Penrose, comentarios de R. Geroch y ensayo histórico de d. C. Cassidy, Pi Press, Nueva York (hay trad. cast.: *La teoría de la relatividad* Altaya, Barcelona, 1993).
 - Einstein, A. y De Sitter, W. 1932. «On the Relation Between the Expansion and the Mean Density of the Universe», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 18(3), p. 213.
 - Elgvin, T. D., Hermansen, J. S., Fijarczyk, A., Bonnet, T., Borge, T., Saether, S. A., Voje, K. L. y Saetre, G.-P. 2011. «Hybrid Speciation in

- Sparrows II: A Role for Sex Chromosomes?», *Molecular Ecology*, 20(18), p. 3823.
- Elkin, L. O. 2003. «Rosalind Franklin and the Double Helix», *Physics Today*, marzo, p. 42.
 - Else, L. 2011. «Nobel Psychologist Reveals the Error of Our Ways», *New Scientist*, 2839, en línea en: www.newscientist.com/article/mg21228390.400-nobel-psychologist-reveals-the-err-of-our-ways.html.
 - Endler, J. A. 1986. *Natural Selection in the Wild*, Princeton University Press, Princeton.
 - England, P., Molnar, P. y Richter, F. 2007. «John Perry's neglected critique of Kelvin's age for the Earth: A missed opportunity in geodynamics», *GSA Today* 17, p. 1.
 - Enz, C. P. y Thellung, A. 1960. «Nullpunktsenergie und Anordnung Nicht Vertauschbarer Faktoren im Hamiltonoperator», *Helvetica Physica Acta*, 33, p. 839.
 - Evans, L. y Smith, K. 1973. *Chess World Championship: Fischer Vs. Spassky*, Simon & Schuster, Nueva York.
 - Eve, A. S. 1939. *Rutherford: Being the Life and Letters of the Rt. Hon. Lord Rutherford, O. M.*, Macmillan Company, Nueva York.
 - Faulkner, J. 2003. «Remembering Fred Hoyle», *Astrophysics and Space Science*, 285, p. 593.
 - Feller, S. A. 2010. «20th Century Physicists on Bank Notes», *Radiations*, 16(2), p. 7.
 - Ferris, T. 1993. «Needed: A Better Name for the Big Bang», *Sky & Telescope*, agosto.
 - Festinger, L. 1957. *A Theory of Cognitive Dissonance*, Stanford University Press, Stanford (hay trad. cast.: *Teoría de la disonancia cognoscitiva*, Centro de Estudios Políticos y Constitucionales, Madrid, 1975).

- Filón de Alejandría, siglo I EC. *Allegories of the Sacred Laws*, citado en Toumlin y Goodeld 1965, p. 58. El tratado se encuentra en línea en: <http://www.earlychristianwritings.com/yonge/book2.html>.
- Fiorino, D. F., Cury, A. y Phillips, A. G. 1997. «Dynamic Changes in Nucleus Accumbens Dopamine Efflux During the Coolidge Effect in Male Rats», *Journal of Neuroscience*, 17(12), p. 4849.
- Fisher, R. A. 1930. *The Genetical Theory of Natural Selection*, Oxford University Press, Oxford. Segunda edición publicada por Dover, Nueva York, 1958.
- Fölsing, A. 1997. *Albert Einstein: A Biography*, traducción de E. Osers, Viking, Nueva York.
- Foskett, D. J. 1953. «Wilberforce and Huxley on Evolution», *Nature*, 172, p. 920.
- Fowler, W. A. 1958. «Nuclear Processes and Element Synthesis in Stars», en D. J. K. O'Connell, S. J. (ed)., *Stellar Populations*, Vatican Observatory, Roma.
- Francoeur, E. 2001. «Molecular Models and the Articulation of Structural Constraints in Chemistry», en V. Klein (ed)., *Tools and Modes of Representation in Laboratory Science*, Kluwer, Dordrecht.
- Frank, A. 2011. *About Time: Cosmology and Culture at the Twilight of the Big Bang*, Free Press, Nueva York.
- Franklin, R. E. y Gosling, R. G. 1953a. «Molecular Configuration in Sodium Thymonucleate», *Nature*, 171, p. 740. ; [...], 1953b. «Evidence for a 2-Chain Helix in Crystalline Structure of Sodium Deoxyribonucleate», *Nature*, 172, p. 156.; [...], 1953. «The Structure of Sodium Thymonucleate Fibres. II: The Cylindrically Symmetrical Patterson Function», *Acta Crystallographica*, 6, p. 678.
- Friedmann, D. 1922. «Über die Krümmung des Raumes», *Zeitschrift für Physik*, 10, p. 377.

- Galison, P. 2003. *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps: Empires of Time*, W. W. Norton, Nueva York (hay trad. cast.: *Relojes de Einstein, mapas de Poincaré: los imperios del tiempo*, Crítica, Barcelona, 2005).
- Gamow, G. 1942. «Concerning the Origin of Chemical Elements», *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 32, p. 353. ; [...], 1946. «Expanding Universe and the Origin of Elements», *Physical Review*, 70, p. 572.; [...], 1956. «The Evolutionary Universe», *Scientific American*, septiembre, p. 136.; [...], 1961. *The Creation of the Universe: Revised Edition*, Viking, Nueva York (hay trad. cast.: *La creación del universo*, RBA, Barcelona, 1993).; [...], 1970. *My World Line: An Informal Autobiography*, Viking Press, Nueva York.
- Gann, A. y Witkowski, J. 2010. «The Lost Correspondence of Francis Crick», *Nature*, 467, p. 419.
- Gans, J., Wolinsky, M. y Dunbar, J. 2005. «Computational Improvements Reveal Great Bacterial Diversity and High Metal Toxicity in Soil», *Science*, 309, p. 1387.
- Gess, R. W., Goates, M. I. y Rubidge, B. S. 2006. «A Lamprey from the Devonian Period of South Africa», *Nature*, 443, p. 981.
- Glynn, J. 2012. *My Sister Rosalind Franklin*, Oxford University Press, Oxford.
- Goertzel, T. y Goertzel, B. 1995. *Linus Pauling: A Life in Science and Politics*, Basic Books, Nueva York.
- Gold, T. 1955. En *Proceedings at Meeting of the Royal Astronomical Society*, n.o 886, p. 106.
- Goldsmith, D. 2000. *The Runaway Universe: The Race to Discover the Future of the Cosmos*, Basic Books, Nueva York.
- Goleman, D. 1995. *Emotional Intelligence: Why It Can Matter More Than IQ*, Bantam, Nueva York (hay trad. cast.: *Inteligencia emocional*, Círculo de Lectores, Barcelona, 1999).

- Gould, S. J. 2002. *The Structure of Evolutionary Theory*, Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, MA (hay trad. cast.: *La estructura de la teoría de la evolución*, Tusquets, Barcelona, 2004).
- Gray, A. 1908. *Lord Kelvin: An Account of His Scientific Life and Work*, J. M. Dent and Company, Londres.
- Greaves, W. M. H. 1948, en *Proceedings at Meeting of the Royal Astronomical Society*, n.o 847, p. 209.
- Greene, B. 2004. *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality*, Alfred A. Knopf, Nueva York (hay trad. cast.: *El tejido del cosmos: espacio, tiempo y la textura de la realidad*, Crítica, Barcelona, 2010). ; [...], 2011. *The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos*, Alfred A. Knopf, Nueva York (hay trad. cast.: *La realidad oculta: universos paralelos y las profundas leyes del cosmos*, Crítica, Barcelona, 2011).
- Gregory, T. 2005. *Fred Hoyle's Universe*, Oxford University Press, Oxford.
- Guth, A. 1997. *The Inflationary Universe*, Addison-Wesley, Reading, MA (hay trad. cast.: *El universo inflacionario: la búsqueda de una nueva teoría sobre los orígenes del cosmos*, Debate, Barcelona, 1999).
- Haber, F. C. 1959. *The Age of the Earth: Moses to Darwin*, Johns Hopkins Press, Baltimore.
- Hager, T. 1995. *Force of Nature: The Life of Linus Pauling*, Simon & Schuster, Nueva York.
- Hardin, G. 1959. *Nature and Man's Fate*, Signet, Nueva York.
- Harrison, B. W. 2001. «Early Vatican Responses to Evolutionist Theology», en <http://www.rtforum.org/lt/lt93.html>.
- Hartl, D. L. y Clark, A. G. 2006. *Principles of Population Genetics*, 4.a edición, Sinauer Associates, Sunderland.
- Hawking, S. 2007. *A Stubbornly Persistent Illusion: The Essential Scientific Writings of Albert Einstein*, Running Press, Filadelfia (hay

trad. cast.: La gran ilusión: las grandes obras de Albert Einstein, Crítica, Barcelona, 2008).

- Henig, R. M. 2000. *The Monk in the Garden: The Lost and Found Genius of Gregor Mendel*, Houghton Mifflin, Boston (hay trad. cast.: *El monje en el huerto*, Debate, Barcelona, 2001).
- Hershey, A. D. y Chase, M. 1952. «Independent Functions of Viral Proteins and Nucleic Acid in Growth of Bacteriophage», *Journal of General Physiology*, 36, p. 39.
- Hodge, J. y Radick, G., eds. 2009. *The Cambridge Companion to Darwin*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Hodge, M. J. S. 1987. «Natural Selection as a Causal, Empirical, and Probabilistic Theory», en I. Krüger, G. Gigerenzer, y M. S. Morgan (eds)., *The Probabilistic Revolution*, MIT Press, Cambridge, vol. 2, p. 233.
- Holmes, A. 1947. «The Age of the Earth», *Endeavor*, 6, p. 99.
- Hooper, J. 2003. *Of Moths and Men: An Evolutionary Tale*, W. W. Norton, Nueva York.
- Hoyle, F. 1946. «The Synthesis of the Elements from Hydrogen», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 106, p. 343. ; [...], 1948a. «A New Model for the Expanding Universe», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 108, p. 372.; [...], 1948b. En *Proceedings at Meeting of the Royal Astronomical Society*, n.o 847, p. 209.; [...], 1954. «On Nuclear Reactions Occurring in Very Hot Stars. I. The Synthesis of Elements from Carbon to Nickel», *Astrophysical Journal Supplement*, 1, p. 121.; [...], 1958. «The Astrophysical Implications of Element Synthesis», en D. J. K. O'Connell, S. J. (ed)., *Stellar Populations*, Vatican Observatory, Roma.; [...], 1982. «Two Decades of Collaboration with Willy Fowler», en C. A. Barnes, D. D. Clayton y D. N. Schramm (eds)., *Essays in Nuclear Astrophysics: Presented to William A. Fowler on the Occasion of His Seventieth*

Birthday, Cambridge University Press, Cambridge, p. 1.; [...], 1983. The Intelligent Universe, Holt, Rinehart and Winston, Nueva York.; [...], 1986a. The Small World of Fred Hoyle: An Autobiography, Michael Joseph, Londres.; [...], 1986b. «Personal Comments on the History of Nuclear Astrophysics», Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, 27, p. 445.; [...], 1990. «An Assessment of the Evidence Against the Steady-State Theory», en B. Bertotti, R. Balbinot, S. Bergio, y A. Messina, Modern Cosmology in Retrospect, Cambridge University Press, Cambridge, p. 223.; [...], 1994. Home Is Where the Wind Blows: Chapters from a Cosmologist's Life, University Science Books, Mill Valley, CA.

- Hoyle, F., Burbidge, G. y Narlikar, J. V. 2000. A Different Approach to Cosmology: From a Static Universe Through the Big Bang Towards Reality, Cambridge University Press, Cambridge.
- Hoyle, F., Dunbar, D. N. F., Wenzel, W. A. y Whaling, W. 1953. «A State in C12 Predicted from Astrophysical Evidence», Physical Review, 92, p. 1095.
- Hoyle, F. y Tayler, R. J. 1964. «The Mystery of the Cosmic Helium Abundance», Nature, 203, p. 1108.
- Hoyle, F. y Wickramasinghe, C. 1993. Our Place in the Cosmos: The Unfinished Revolution, J. M. Dent, Londres.
- Hubble, E. P. 1926. «Extragalactic Nebulae», Astrophysical Journal, 64, p. 321. ; [...], 1929a. «A Relation Between Distance and Radial Velocity Among Extra-Galactic Nebulae», Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 15, p. 168.; [...], 1929b. «A Spiral Nebula as a Stellar System, Messier 31», Astrophysical Journal, 69, p. 103.
- Hull, D. L. 1973. Darwin and His Critics: The Reception of Darwin's Theory of Evolution by the Scientific Community, Harvard University Press, Cambridge, MA.

- Hutchinson, G. E. 1959. «Homage to Santa Rosalia & Why Are There So Many Kinds of Animals?», *American Naturalist*, 93 (870), p. 145.
- Hutton, J. 1788. «Theory of the Earth, or an Investigation of the Laws Observable in the Composition, Dissolution, and Restoration of Land upon the Globe», *Royal Society of Edinburgh Transactions*, 1, p. 209.
- Huxley, T. H. 1909 [1869]. Original de 1869, «Geological Reform», *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 25, pp. 38-53; en *Discourses, Biological and Geological Essays*, Appleton, Nueva York, 1999, p. 335.
- Infeld, L. 1949. «On the Structure of Our Universe», en P. A. Schilpp (ed)., *Albert Einstein: Philosopher Scientist*, Library of Living Philosophers, Evanston, IL.
- Isaacson, W. 2007. *Einstein: His Life and Universe*, Simon & Schuster, Nueva York (hay trad. cast.: *Einstein: su vida y universo*, Debate, Barcelona, 2008).
- Jenkin, F. 1867. «Review of The Origin of Species», *North British Review*, junio, vol. 46, p. 277.
- Jensen, J. V. 1988. «Return to the Wilberforce-Huxley Debate», *British Journal for the History of Science*, 21(2), p. 161. ; [...], 1991. *Thomas Henry Huxley: Communicating for Science*, University of Delaware Press, Newark.
- Joly, J. 1903. «Radium and the Geological Age of the Earth», *Nature*, 68, p. 526.
- Judson, H. F. 1996. *The Eighth Day of Creation: Makers of the Revolution in Biology*, edición ampliada, Cold Spring Harbor Laboratory Press, Plainview, NY; edición original: Simon & Schuster, Nueva York, 1979.
- Kahneman, D. 2011. *Thinking, Fast and Slow*, Farrar, Straus and Giroux, Nueva York.

- Kahneman, D., Slovic, P. y Tversky, A., eds. 1982. *Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kahneman, D. y Tversky, A. 1973. «On the Psychology of Prediction», *Psychology Review*, 80, p. 237. ; [...], 1982. «On the Study of Statistical Intuition», *Cognition*, 11, p. 123.
- Kaku, M. 2004. *Einstein's Cosmos: How Albert Einstein's Vision Transformed Our Understanding of Space and Time*, W. W. Norton, Nueva York (hay trad. cast.: *El universo de Einstein: cómo la visión de Albert Einstein transformó nuestra comprensión del espacio y el tiempo*, Antoni Bosch Editor, Barcelona, 2005).
- Kane, G. L. 2000. *Supersymmetry: Unveiling the Ultimate Laws of Nature*, Basic Books, Nueva York.
- Kant, I. 1754. «The Question, Whether the Earth Is Ageing, Considered Physically», publicado originalmente (en alemán) en dos partes en un semanario de Königsberg; traducción al inglés: Reinhardt y Oldroyd 1982.
- Kay, L. E. 1993. *The Molecular Vision of Life: Caltech, the Rockefeller Foundation, and the Rise of the New Biology*, Oxford University Press, Nueva York.
- Kean, S. 2010. *The Disappearing Spoon: And Other True Tales of Madness, Love, and the History of the World from the Periodic Table of the Elements*, Little, Brown and Company, Nueva York (hay trad. cast.: *La cuchara menguante*, Ariel, Barcelona, 2011).
- Kelvin, lord (sir William Thomson). 1862. «On the Age of the Sun's Heat», *Macmillan's Magazine*, 5, p. 388. De una reimpresión en *Popular Lectures and Addresses*, 1, 2.a ed., p. 356. ; [...], 1864. «On the Secular Cooling of the Earth», *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 23, 167. De una reimpresión en *Mathematical and Physical Papers*, 3, p. 295, 1890.; [...], 1868. «On Geological Time», discurso

pronunciado ante la Geological Society of Glasgow, 27 de febrero de 1868. *Popular Lectures and Addresses*, vol. 2, p. 10.; [...], 1891-1894. *Popular Lectures and Addresses*, 3 vols., Macmillan and Co., Londres.; [...], 1899. «The Age of the Earth as an Abode Fitted for Life», *Philosophical Magazine* (series 5), 47, p. 66.; [...], 1904. «Contribution to the Discussion of the Nature of Emanations from Radium», *Philosophical Magazine*, ser. 6, 7, p. 220.

- Kelvin, lord (sir William Thomson), y Murray, J. R. 1895. «On the Temperature Variation of the Thermal Conductivity of Rocks», *Nature*, 52, p. 182.
- Keynes, M. 2002. «Mendel—Both Ignored and Forgotten», *Journal of the Royal Society of Medicine*, 95(11), p. 576.
- King, C. 1893. «The Age of the Earth», *American Journal of Science*, 45, p. 1.
- Kirkaldy, J. F. 1971. *Geological Time*, Oliver & Boyd, Edimburgo.
- Kirshner, R. 2002. *The Extravagant Universe: Exploding Stars, Dark Energy, and the Accelerating Cosmos*, Princeton University Press, Princeton.
- Kirwan, R. 1797. «On the Primitive State of the Globe and Its Subsequent Catastrophe», *Transactions of the Royal Irish Society*, 6, p. 234.
- Kitcher, P. 1982. *Abusing Science: The Case Against Creationism*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Kliman, R., Sheehy, B. y Schultz, J. 2008. «Genetic Drift and Effective Population Size», *Nature Education* 1 (3).
- Klug, A. 1968a. «Rosalind Franklin and the Discovery of the Structure of DNA», *Nature*, 219, p. 808. ; [...], 1968b. «Rosalind Franklin and DNA», *Nature*, 219, p. 880.; [...], 1974. «Rosalind Franklin and the Double Helix», *Nature*, 248, p. 787.

- Krauss, L. M. 2012. *A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather Than Nothing*, Free Press, Nueva York.
- Krauss, L. M. y Turner, M. S. 2004. «A Cosmic Conundrum», *Scientific American*, septiembre, p. 71.
- Kritzman, L. D., ed. 2006. *The Columbia History of Twentieth-Century French Thought*, Columbia University Press, Nueva York.
- Kragh, H. 1996. *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*, Princeton University Press, Princeton, pp. 173-174. ; [...], 2010. «An Anthropic Myth: Fred Hoyle's Carbon-12 Resonance Level», *Archive for History of Exact Sciences*, 64, p. 721.
- Kragh, H. y Smith, R. W. 2003. «Who Discovered the Expanding Universe?», *History of Science*, 41, p. 141.
- Kruger, J. y Dunning, D. 1999. «Unskilled and Unaware of It: How Difficulties in Recognizing One's Own Incompetence Lead to Inflated Self-Assessments», *Journal of Personality and Social Psychology*, 77(6), p. 1121.
- Kunda, Z. 1990. «The Case for Motivated Reasoning», *Psychological Bulletin*, 108(3), p. 480.
- Laloë, S. y Pecker, J.-C. 1990. «Where Did Einstein Lament Lambda?», *Physics Today*, 43(5), p. 117.
- Leahy, J. P. 2001. «Einstein's Greatest Blunder: The Cosmological Constant», en www.jb.man.ac.uk/~jpl/cosmo/blunder.html.
- Lee, S. W. S. y Schwartz, N. 2010. «Washing Away Postdecisional Dissonance», *Science*, 328(5979), p. 709.
- Lehrer, J. 2009. *How We Decide*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston.
- Lemaître, G. 1927. «Un Univers Homogène de Masse Constante et de Rayon Croissant, Rendant Compte de la Vitesse Radiale des Nébuleuses Extra-Galactiques», *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, A47, p. 49. ; [...], 1931a. «A Homogeneous Universe of

Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulae», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 19, p. 483.; [...], 1931b. «The Expanding Universe», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 91, p. 490.; [...], 1934. «Evolution of the Expanding Universe», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 20, p. 12.; [...], 1949. «The Cosmological Constant», en A. Schilpp (ed)., *Albert Einstein: Philosopher Scientist*, Library of Living Philosophers, Evanston, IL.

- Levene, P. A., y Bass, L. W. 1931. *Nucleic Acids*, Chemical Catalog Company, Nueva York.
- Lightman, A. 2005. *The Discoveries: Great Breakthroughs in 20th Century Science*, Pantheon Books, Nueva York.
- Lightman, A. y Brawer, R. 1990. *Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Linden, D. J. 2011. *The Compass of Pleasure: How Our Brains Make Fatty Foods, Orgasm, Exercise, Marijuana, Generosity, Vodka, Learning, and Gambling Feel So Good*, Viking, Nueva York.
- Lindley, D. 2004. *Degrees Kelvin: A Tale of Genius, Invention, and Tragedy*, Joseph Henry Press, Washington.
- Livio, M. 2000. *The Accelerating Universe: Infinite Expansion, the Cosmological Constant, and the Beauty of the Cosmos*, John Wiley & Sons, Nueva York. ; [...], 2000. «A Different Approach to Cosmology», *Physics Today*, 53, p. 71.; [...], 2002. *The Golden Ratio: The Story of Phi, the World's Most Astonishing Number*, Broadway Books, Nueva York (hay trad. cast.: *La proporción áurea: la historia de phi, el número más enigmático del mundo*, Ariel, Barcelona, 2006).; [...], 2011. «Lost in Translation: Mystery of the Missing Text Solved», *Nature*, 479, p. 171.

- Livio, M., Hollowell, D., Weiss, A. y Truran, J. W. 1989. «The Anthropropic Significance of the Existence of an Excited State of ^{12}C », *Nature*, 340, p. 281.
- Livio, M. y Rees, M. J. 2005. «Anthropic Reasoning», *Science*, 309, p. 1022.
- Lucas, J. R. 1979. «Wilberforce and Huxley: A Legendary Encounter», *Historical Journal*, 22, p. 313.
- Lyell, C. 1830-1833. *Principles of Geology Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface, by Reference to Causes Now in Operation*, John Murray, Londres. Hay una nueva edición en Cambridge University Press, Cambridge, 2009.
- MacCurdy, E., ed. 1939. *The Notebooks of Leonardo da Vinci*, G. Braziller, Nueva York.
- Maddox, B. 2002. *Rosalind Franklin: The Dark Lady of DNA*, Harper Collins, Londres.
- Majerus, M. E. N. 1998. *Melanism: Evolution in Action*, Oxford University Press, Oxford.
- Mangel, M. y Samaniego, F. 1984. «Abraham Wald's Work on Aircraft Survivability», *Journal of the American Statistical Association*, 79, p. 259.
- Marchant, J. 1916. *Alfred Russel Wallace: Letters and Reminiscences*, Cassell and Company, Londres.
- Marinacci, B., ed. 1995. *Linus Pauling in His Own Words*, Touchstone, Nueva York.
- Mawer, S. 2006. *Gregor Mendel: Planting the Seeds of Genetics*, Harry N. Abrams, Nueva York.
- Mayr, E. 2001. *What Evolution Is*, Basic Books, Nueva York.
- McCrea, W. H. 1971. «The Cosmical Constant», *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 12, p. 140.

- McGrath, C. L. y Katz, L. A. 2004. «Genome Diversity in Microbial Eukaryotes», *Trends in Ecology and Evolution*, 19(1), p. 32.
- McPherson, A. 2003. *Introduction to Macromolecular Crystallography*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Mendel, G. 1866 [1865]. «Versuche über Pflanzen-Hybriden» («Experimentos sobre hibridación de plantas»), *Verh. Naturf. Ver. Brünn*, 4, p. 3.
- Meredith, R. W., et al. 2011. «Impacts of the Cretaceous Terrestrial Revolution and KPg Extinction on Mammal Diversification», *Science*, 334, p. 521.
- Miller, D., ed. 1985. *Popper Selections*, Princeton University Press, Princeton.
- Milne, E. A. 1933. «World-Structure and the Expansion of the Universe», *Zeitschrift für Astrophysik*, 6, p. 1.
- Mirsky, A. E. y Pauling, L. 1936. «On the Structure of Native, Denatured, and Coagulated Proteins», *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, 22(7), p. 439.
- Mitton, S. 2005. *Fred Hoyle: A Life in Science*, Aurum, Londres.
- Moore, J. R. 1979. *The Post-Darwinian Controversies: A Study of the Protestant Struggle to Come to Terms with Darwin in Great Britain and America, 1870—1900*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Mora, C., Tittensor, D. P., Adl, S., Simpson, A. G. B. y Worm, B. 2011. «How Many Species Are There on Earth and in the Ocean?», *PLOS Biology* 9(8): e1001127.doi:10.1371/journal.pbio.1001127.
- Morris, S. W. 1994. «Fleeming Jenkin and the Origin of Species: A Reassessment», *British Journal for the History of Science*, 27, p. 313.
- Motte, A. (traductor) 1848. *Newton's Principia, with a Life of the Author by N. W. Chittenden*, Daniel Adee, Nueva York.
- Narasimhan, T. N. 2010. «Thermal Conductivity Through the 19th Century», *Physics Today*, agosto, p. 36.

- Nernst, W. 1916. «Über einem Versuch, von Quantentheoretischen Betrachtungen Zur Annahme Stetiger Energiänderungen Zurückzukehren», Verhandlungen der Deutsche Physikalische Gesellschaft, 18, p. 83.
- Nestler, E. J. y Malenka, R. C. 2004. «The Addicted Brain», Scientific American, marzo, p. 78.
- Neumann, C. 1896. Allgemeine Untersuchungen über das Newton'sche Princip der Fernwirkungen, mit besonderer Rücksicht auf die elektrischen Wirkungen, Teubner, Leipzig.
- Newton, I. 1687. Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, S. Pepys, Royal Society Press, Londres (hay trad. cast.: Principios matemáticos de la filosofía natural, Alianza, Madrid, 2011).
- North, J. D. 1965. The Measure of the Universe: A History of Modern Cosmology, Clarendon Press, Oxford.
- Norton, J. D. 1999. «The Cosmological Woes of Newtonian Gravitation Theory», en H. Goenner, J. Renn, J. Ritter, y T. Sauer (eds)., The Expanding Worlds of General Relativity: Einstein Studies, Birkhäuser, Boston, 7, p. 271. ; [...], 2000. «Nature Is the Realisation of the Simplest Conceivable Mathematical Ideas: Einstein and the Canon of Mathematical Simplicity», Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 31(2), p. 135.
- Nudds, J. R., McMillan, N. D., Weaire, D. C. y McKenna Lawlor, S. M. P., eds. 1988. Science in Ireland, 1800—1930: Tradition and Reform, edición privada, Trinity College, Dublín.
- Nussbaumer, H., y Bieri, L. 2009. Discovering the Expanding Universe, Cambridge University Press, Cambridge. ; [...], 2011. «Who Discovered the Expanding Universe?», <http://arxiv.org/abs/1107.2281>.
- Nye, M. J. 2001. «Paper Tools and Molecular Architecture in the Chemistry of Linus Pauling», en V. Klein (ed)., Tools and Modes of Representation in Laboratory Sciences, Kluwer, Dordrecht.

- Ochs, V. L. 2005. «Waiting for the Messiah, a Tambourine in Her Hand», *Nashim: A Journal of Jewish Women's Studies & Gender Issues*, (9), p. 144.
- Ohanian, H. C. 2008. *Einstein's Mistakes: The Human Failings of Genius*, W. W. Norton & Company, Nueva York.
- Olby, R. 1974. *The Path to the Double Helix*, Macmillan, Londres (hay trad. cast.: *El camino hacia la doble hélice*, Alianza, Madrid, 1991).
- Olds, J. 1956. «Pleasure Centers in the Brain», *Scientific American*, octubre, p. 105.
- Olds, J., y Milner P. 1954. «Positive Reinforcement Produced by Electrical Stimulation of Septal Area and Other Regions of Rat Brain», *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 47, p. 419.
- Öpik, E. 1951. «Stellar Models with Variable Composition. II: Sequences of Models with Energy Generation Proportional to the Fifteenth Power of Temperature», *Proceedings of the Royal Irish Academy*, A 54, p. 49.
- Orel, V. 1996. *Gregor Mendel: The First Geneticist*, traducción de S. Finn, Oxford University Press, Nueva York.
- Overbye, D. 1998. «A Famous Einstein "Fudge" Returns to Haunt Cosmology», *New York Times*, 26 de mayo de 1998. ; [...], 2000. *Einstein in Love: A Scientific Romance*, Viking, Nueva York.
- Pais, A. 1982. *Subtle Is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford.
- Paley, W. 1802. *Natural Theology, or Evidence of the Existence and Attributes of the Deity, Collected from the Appearances of Nature*. 2006. Edición, introducción y notas de M. D. Eddy y D. Knight, Oxford University Press, Oxford.
- Pallen, M. 2009. *The Rough Guide to Evolution*, Rough Guides, Londres.

- Panek, R. 2011. *The 4% Universe: Dark Matter, Dark Energy, and the Race to Discover the Rest of Reality*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston.
- Parshall, K. H. 1982. «Varieties As Incipient Species: Darwin's Numerical Analyses», *Journal of the History of Biology*, 15(2), p. 191.
- Patterson, C. 1956. «Age of Meteorites and the Earth», *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 10(4), p. 230.
- Pauli, W. 1958. *Theory of Relativity*. Translated by G. Field, Pergamon Press, Oxford, reimpresión: Dover, Mineola, NY, 1981.
- Pauling, L. 1935. «The Oxygen Equilibrium of Hemoglobin and Its Structural Interpretation», *Science*, 81, p. 421. ; [...], 1939. *The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals*, Cornell University Press, Ithaca, NY.; [...], 1948a. «Nature of Forces Between Large Molecules of Biological Interest», *Nature*, 161, p. 707.; [...], 1948b. «Molecular Architecture and the Processes of Life», 21st Sir Jesse Boot Foundation Lecture, Nottingham, Inglaterra; conferencia pronunciada el 28 de mayo de 1948.; [...], 1955. «The Stochastic Method and the Structure of Proteins», *American Scientist*, 43, p. 285.; [...], 1996. «The Discovery of the Alpha Helix», *Chemical Intelligencer*, enero, p. 32 (publicado por Dorothy Munro).
- Pauling, L. y Bragg, L. 1953. «Discussion des Rapports de MM L. Pauling et L. Bragg», *Rep. Institut International de Chimie Solvay*, p. 111.
- Pauling, L. y Corey, R. B. 1950. «Two Hydrogen-Bonded Spiral Configurations of the Polypeptide Chain», *Journal of the American Chemical Society*, 72(11), p. 5349. ; [...], 1953. «A Proposed Structure for the Nucleic Acids», *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, 39, p. 84.
- Pauling, L., Corey, R. B. y Branson, H. R. 1951. «The Structure of Proteins: Two Hydrogen-Bonded Helical Configurations of the

Polypeptide Chain», Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A., 37, p. 205.

- Pauling, L. y Coryell, C. D. 1936. «The Magnetic Properties and Structure of Hemoglobin and Carbonmonoxyhemoglobin», Proceedings of the National Academy of Sciences, 22, p. 210.
- Pauling, L. y Shomaker, V. 1952a. «On a Phospho-tri-anhydride Formula for the Nucleic Acids», Journal of the American Chemical Society, 74, p. 1111. ; [...], 1952b. «On a Phospho-tri-anhydride Formula for the Nucleic Acids», Journal of the American Chemical Society, 74, p. 3712.
- Pauling, P. 1973. «DNA—The Race That Never Was?», New Scientist, 31 de mayo, p. 558.
- Peckham, M., ed. 1959. The Origin of Species: A Variorum Text, University of Pennsylvania Press, Filadelfia.
- Peebles, P. J. E. y Ratra, B. 2003. «The Cosmological Constant and Dark Energy», Review of Modern Physics, 75, p. 559.
- Perlmutter, S., et al. 1999. Astrophysical Journal, 517, p. 565.
- Perry, J. 1895a. «On the Age of the Earth», Nature, 51, p. 224. ; [...], 1895b. «On the Age of the Earth», Nature, 51, p. 341.; [...], 1895c. «The Age of the Earth», Nature, 51, p. 582.
- Perutz, F. 1987. «I Wish I'd Made You Angry Earlier», Scientist, 1(7), p. 19.
- Petrosian, V., Salpeter, E. y Szekeres, P. 1967. «Quasi-Stellar Objects in the Universe with Non-Zero Cosmological Constant», Astrophysical Journal, 147, p. 1222.
- Plinio el Viejo, siglo I EC, The Natural History, libro 8, capítulo 37, edición de J. Bostock y H. T. Riley, Taylor & Francis, Londres, 1855 (hay trad. cast.: Historia natural, Gredos, Madrid, 1995-2003).
- Popper, K. 1976. Unended Quest: An Intellectual Autobiography, Fontana/Collins, Glasgow (hay trad. cast.: Una búsqueda sin término:

una autobiografía intelectual, Alianza, Madrid, 2006). ; [...], 1978. «Natural Selection and the Emergence of Mind», *Dialectica*, 32, p. 339.; [...], 2006. *The Logic of Scientific Discovery*, Routledge, Londres, primera edición: 1935, *Logic der Forschung*, Verlag von Julius Springer, Viena (hay trad. cast.: *La lógica de la investigación científica*, Tecnos, Madrid, 1973, 2011).

- Randall, L. 2011. *Knocking on Heaven's Door: How Physics and Scientific Thinking Illuminate the Universe and the Modern World*, Ecco, Nueva York.
- RAS 1931. *Royal Astronomical Society Papers 2. Minutes of Council*, 12, pp. 160, 165, 166.
- Rees, M. 1997. *Before the Beginning: Our Universe and Others*, Helix Books, Reading, MA (hay trad. cast.: *Antes del principio: el cosmos y otros universos*, Tusquets, Barcelona, 1999). ; [...], 2001. «Fred Hoyle», *Physics Today*, noviembre, p. 75.
- Reich, D., Patterson, N., Kircher, M., et al. 2011. «Denisova Admixture and the First Modern Human Dispersals into Southeast Asia and Oceania», *American Journal of Human Genetics*, 89, p. 516.
- Reinhardt, O. y Oldroyd, D. R. 1982. «Kant's Thoughts on the Ageing of the Earth», *Annals of Science*, 39, p. 349.
- Richter, F. M. 1986. «Kelvin and the Age of the Earth», *Journal of Geology*, 94, p. 395.
- Ridley, M. 2004a. *Evolution*, 3.a ed., Blackwell Science, Malden, MA. ; [...], ed. 2004b. *Evolution*, 2.a ed., Oxford University Press, Oxford.
- Riess, A. G., et al. 1998. *Astronomical Journal*, 116, p. 1009.
- Ronwin, E. 1951. «A Phospho-tri-anhydride Formula for the Nucleic Acids», *Journal of the American Chemical Society*, 73, p. 5141.
- Rose, M. R. 1998. *Darwin's Spectre: Evolutionary Biology in the Modern World*, Princeton University Press, Princeton.

- Rosenfeld, L. 2003. «William Prout: Early 19th Century Physician-Chemist», *Clinical Chemistry*, 49(4), p. 699.
- Ruse, M. y Richards, R. J., eds. 2009. *The Cambridge Companion to the «Origin of Species»*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Russell, B. 1951. «The Answer to Fanaticism: Liberalism», en *The New York Times Magazine*, 16 de diciembre de 1951.
- Salisbury, R. C. 1894. President's address, *Report of the British Association for the Advancement of Science*, Oxford, p. 3.
- Salpeter, E. E. 1952. «Nuclear Reactions in Stars Without Hydrogen», *Astrophysical Journal*, 115, p. 326.
- Sayre, A. 1975. *Rosalind Franklin and DNA*, W. W. Norton, Nueva York (hay trad. cast.: *Rosalind Franklin y el ADN*, Horas y Horas, Madrid, 1997).
- Schilthuizen, M. 2001. *Frogs, Flies, and Dandelions: The Making of a Species*, Oxford University Press, Oxford.
- Schlattl, H., Heger, A., Oberhummer, H., Rauscher, T. y Csóto, A. 2004. «Sensitivity of the C and O Production on the 3α Rate», *Astrophysics and Space Science*, 291, p. 27.
- Schulz, K. 2010. *Being Wrong: Adventures in the Margin of Error*, Harper Collins, Nueva York.
- Sclater, A. 2003. «The Extent of Charles Darwin's Knowledge of Mendel», *Georgia Journal of Science*, 61, p. 134.
- Seelig, C., ed. 1956. *Helle Zeit, Dunkle Zeit*, Europa Verlag, Zürich.
- Segrè, G. 2011. *Ordinary Geniuses: Max Delbruck, George Gamow, and the Origins of Genomics and Big Bang Cosmology*, Viking, Nueva York.
- Serafini, A. 1989. *Linus Pauling: A Man and His Science*, Paragon House, Nueva York.
- Sharlin, H. I., y Sharlin, T. 1979. *Lord Kelvin: The Dynamic Victorian*, Penn State University Press, University Park, PA.

- Shaviv, G. 2009. *The Life of Stars: The Controversial Inception and Emergence of the Theory of Stellar Structure*, Springer, Heidelberg.
- Shipley, B. C. 2001. «"Had Lord Kelvin a Right?": John Perry, Natural Selection y the Age of the Earth, 1894-1895», en C. L. E. Lewis y S. J. Knell (eds)., *The Age of the Earth: From 4004 BC to AD 2002*, Geological Society, Londres, Special Publications, 190, p. 91.
- Sidgwick, I. 1898. «A Grandmother's Tales», *Macmillan's Magazine*, 78(1), p. 433.
- Smith, C., y Wise, M. N. 1989. *Energy and Empire: A Biographical Study of Lord Kelvin*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Soddy, F. 1904. *Radio-Activity: An Elementary Treatise from the Standpoint of Disintegration Theory*, The Electrician, Londres. ; [...], 1906. «The Recent Controversy on Radium», *Nature*, 74, p. 516.
- Spear, R. 2002. «The Most Important Experiment Ever Performed by an Australian Physicist», *Physicist*, 39(2), p. 35.
- Spinoza, B. 1925. *Spinoza Opera*, edición de C. Gebhardt, Carl Winter. Heidelberg (hay trad. cast.: *Obras completas*, Ediciones Ibéricas, Madrid, 1966).
- Stacey, F. D. 2000. «Kelvin's Age of the Earth Paradox Revisited», *Journal of Geophysical Research*, 105 (B6), 13, p. 155.
- Sturchio, N. C., y Purtschert, R. 2012. «Kr-81 Case Study: The Nubian Aquifer (Egypt)», en A. Suckow (ed)., *Dating Old Groundwater: A Guide Book*, IAEA, Viena.
- Susskind, L. 2006. *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design*, Little, Brown and Company, Nueva York (hay trad. cast.: *El paisaje cósmico: teoría de cuerdas y el mito del diseño inteligente*, Crítica, Barcelona, 2007).
- Tait, G. G. 1869. «Geological Time», *North British Review*, julio, p. 406.

- Taylor, A. J. P. 1963. «Mistaken Lessons from the Past», *Listener*, 6 de junio.
- Thompson, S. P. 1910. *The Life of William Thomson, Baron Kelvin of Largs*, Macmillan and Co., Londres; reimpresión: Chelsea Publishing Company, Nueva York, 1976.
- Thomson, J. J. 1936. *Recollections and Reflections*, Bell, Londres. ; [...], 1895. «The Age of the Earth», *Nature*, 51, p. 438.
- Tino, G. M., et al. 2007. «Atom Interferometers and Optical Atomic Clocks: New Quantum Sensors for Fundamental Physics Experiments in Space», *Nuclear Physics B (Proceedings Supplements)*, 166, p. 159.
- Toumlin, S. E., y Goodeld, J. 1965. *The Discovery of Time*, Harper & Row, Nueva York.
- Trimble, V. 2012. «Eponyms, Hubble's Law, and the Three Princes of Parallax», *Observatory*, 132, p. 33.
- Tyson, N. D.-G. 2007. *Death by Black Hole: And Other Cosmic Quandaries*, W. W. Norton, Nueva York.
- Tyson, N. D.-G., y Goldsmith, D. 2004. *Origins: Fourteen Billion Years of Cosmic Evolution*, W. W. Norton, Nueva York.
- Van den Bergh, S. 1997, en M. Livio, M. Donahue y N. Panagia (eds)., *The Extragalactic Distance Scale*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 1. ; [...], 2011. «The Curious Case of Lemaitre's Equation No. 24», <http://arxiv.org/abs/1106.1195>.
- Van Overwalle, F., y Jordens, K. 2002. «An Adaptive Connectionist Model of Cognitive Dissonance», *Personality and Social Psychology Review*, 6(3), p. 204.
- Van Veen, V., Krug, M. K., Schooler, J. W., y Carter, C. S. 2009. «Neural Activity Predicts Attitude Change in Cognitive Dissonance», *Nature Neuroscience*, 12(11), p. 1469.
- Vila, R., Bell, C. D., Macniven, R., Goldman-Huertas, B., Ree, R. H., Marshall, C. R., Balient, S., Johnson, K., Benjamini, D., y Pierce, N.

2011. «Phylogeny and Palaeoecology of *Polyommatus* Blue Butterflies Show Beringia Was a Climate-Regulated Gateway to the New World», *Proceedings of the Royal Society, series B*, p. 278.
- Vilenkin, A. 2006. *Many Worlds in One: The Search for Other Universes*, Hill and Wang, Nueva York (hay trad. cast.: *Muchos mundos en uno: la búsqueda de otros universos*, Alba Editorial, Barcelona, 2009).
 - Von Seelinger, H. 1895. «Über das Newton'sche Gravitationsgesetz», *Astronomische Nachrichten*, 137, 129.
 - Vorzimmer, P. 1963. «Charles Darwin and Blending Inheritance», *Isis*, 54(3), p. 371.
 - Wagoner, R. V., Fowler, W. A., y Hoyle, F. 1967. «On the Synthesis of Elements at Very High Temperatures», *Astrophysical Journal*, 148, p. 3.
 - Watson, J. D. 1951. Carta al biofísico Max Delbrück, fechada el 9 de diciembre de 1951, Caltech Archives. ; [...], 1980. *The Double Helix: A Personal Account of the Discovery of the Structure of DNA.*, edición de G. S. Stent, A Norton Critical Edition, W. W. Norton, Nueva York (hay trad. cast.: *La doble hélice: relato personal del descubrimiento de la estructura del ADN*, Alianza, Madrid, 2010).; [...], 2000. *A Passion for DNA: Genes, Genomes, and Society*, Oxford University Press, Oxford, p. 44 (hay trad. cast.: *Pasión por el ADN: genes, genomas y sociedad*, Crítica, Barcelona, 2002).
 - Watson, J. D., y Crick, F. H. C. 1953a. «Molecular Structure of Nucleic Acids», *Nature*, 171, p. 737. ; [...], 1953b. «Genetical Implications of the Structure of Deoxyribonucleic Acid», *Nature*, 171, p. 964.
 - Way, M., y Nussbaumer, H. 2011. «Lemaître's Hubble Relationship», *Physics Today*, agosto, p. 8.

- Weart, S. 1978. «Oral History Transcript—Dr. Thomas Gold», Source for History of Modern Astrophysics, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD, p. 34.
- Weinberg, S. 1987. «Anthropic Bound on the Cosmological Constant», *Physical Review Letters*, 59, p. 2607. ; [...], 1989. «The Cosmological Constant Problem», *Review of Modern Physics*, 61(1), p. 1.; [...], 1992. *Dreams of a Final Theory*, Parthenon, Nueva York.; [...], 2005. «Einstein's Mistakes», *Physics Today*, 58(11), p. 31.
- Wells, J. 2000. *Icons of Evolution: Science or Myth?*, Regency Publishing, Washington, DC.
- Wesemael, F. 2009. «Harkins, Perrin and the Alternative Paths to the Solution of the Stellar-Energy Problem, 1915-1923», *Journal for the History of Astronomy*, 40, n.o 3, p. 277.
- Westen, D., Blagov, P. S., Horenski, K., Kelts, C., y Hamman, S. 2006. «Neural Bases of Motivated Reasoning: An fMRI Study of Emotional Constraints on Partisan Political Judgment in the 2004 U.S. Presidential Election», *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(11), p. 1947.
- Wilkins, M. 2003. *The Third Man of the Double Helix: The Autobiography of Maurice Wilkins*, Oxford University Press, Oxford.
- Wilkins, M. H. F., Stokes, A. R., y Wilson, H. R. 1953. «Molecular Structure of Deoxyribonucleic Acids», *Nature*, 171, p. 738.
- Williams, R. C. 1952. «Electron Microscopy of Sodium Desoxyribonucleate by Use of a New Freeze-Drying Method», *Biochimica et Biophysica Acta*, 9, p. 237.
- Wilson, D. B. 1987. *Kelvin and Stokes: A Comparative Study in Victorian Physics*, Adam Hilger, Bristol.
- Wilson, E. B. 1927. *The Cell in Development and Heredity*, Macmillan, Nueva York.
- Wilson, E. O. 1992. *The Diversity of Life*, Belknap Press, Cambridge, MA (hay trad. cast.: *La diversidad de la vida*, Crítica, Barcelona, 1994).

- Wilson, J. D. 1999. «Watson on Pauling», Time Magazine, 21 de marzo de 1999; en línea en <http://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,990602,00.html>.
- Wilson, W. 1913. *The New Freedom: A Call for the Emancipation of the Generous Energies of a People*, Doubleday, Nueva York, capítulo 2.
- Wilson, W. E. 1903. «Radium and Solar Energy», *Nature*, 68, p. 222.
- Wise, R. A. 1998. «Drug-Activation of Brain Reward Pathways», *Drug and Alcohol Dependence*, 51(1-2), p. 13.
- Wolfowitz, J. 1952. «Abraham Wald 1902-1950», *Annals of Mathematical Statistics*, 23, p. 1.
- Zeldovich, Ya. B. 1967. «Cosmological Constant and Elementary Particles», *Journal of Experimental and Theoretical Physics, Letters*, 61, p. 316.

-
- ¹ Hay una descripción detallada en Evans y Smith (1973) y un resumen en línea en [www.mark-weeks.com/chess/72fs\\$\\$\\$.htm](http://www.mark-weeks.com/chess/72fs$$$.htm).
- ² Se puede leer sobre este triste caso en línea, por ejemplo en www.innocenceproject.org/Content/Ray_Krone.php.
- ³ Alan John Percival Taylor (1906-1990). Taylor 1963.
- ⁴ La traducción castellana clásica de Antonio de Zulueta, sin embargo, la vierte como «desarrollar». (N. del T).
- ⁵ Subcultura urbana enemiga de lo convencional, con una moda inspirada en ropa vintage y de segunda mano. (N. del T).
- ⁶ Wilson 1913.
- ⁷ Al parecer el récord lo ostenta el buitre moteado de Ruppell (*Gyps rueppellii*); véase www.straightdope.com/columns/read/1976/how-high-can-birds-and-bees-fly.
- ⁸ Véase, por ejemplo, «Jacques Piccard», *Encyclopedia of World Biography*, 2004. En línea en www.encyclopedia.com/doc/1G2-3404707243.html.
- ⁹ Chapman 2009.
- ¹⁰ Mora et al. 2011.
- ¹¹ Gans et al. 2005.
- ¹² La especie *Amphiprion ocellaris*.
- ¹³ Aristóteles, siglo IV AEC.
- ¹⁴ Plinio el Viejo, siglo I EC. Puede bajarse de www.perseus.tufts.edu (hay trad. clásica en castellano en <http://books.google.es/books?id=s5CpZ6f9gpkC>).
- ¹⁵ Cicerón, 45 AEC.
- ¹⁶ Paley 1802. William Paley (1743-1805) publicó un influyente libro titulado *Natural Theology*, en el que comparaba una roca natural con un reloj. Irónicamente, por medio de técnicas radiométricas (véase el capítulo 5), las rocas pueden determinar la edad de la Tierra, un intervalo de tiempo mucho mayor que el que haya medido nunca un reloj diseñado por un relojero.
- ¹⁷ Como se puede imaginar, hay numerosas reimpresiones de la obra de *The Origin*. Dos que me parecen atractivas son *The Annotated Origin*, una edición anotada por James T. Costa (Darwin 2009), y una edición facsímil con introducción de Ernst Mayr (Darwin 1964).
- ¹⁸ Darwin 2009 [1959], p. 488. El propio Darwin cumplió su propia predicción en *El origen del hombre*, publicado en 1871, y en *La expresión de las emociones en los animales y el hombre*, publicado el año siguiente. Los progresos actuales de la psicología evolutiva pueden verse como descendientes de aquellas investigaciones pioneras.
- ¹⁹ Darwin 1981 [1871]. Una docena de años después de *El origen*, Darwin hizo acopio de la confianza suficiente para ampliar su teoría de la evolución a los humanos, el asunto que intentó eludir en *El origen*. Es indudable que el clamor que se alzó contra el darwinismo habría sido mucho menos pronunciado si la evolución no se aplicase a los humanos. Las ideas de Darwin en *El origen del hombre* han inspirado los incansables esfuerzos de muchos miembros de la familia de Louis Leakey en la búsqueda de homínidos fósiles en África.
- ²⁰ Hay muchos y excelentes libros sobre evolución y selección natural, a distintos niveles. Los siguientes son algunos de los que me han parecido útiles: Ridley 2004a es un libro de texto de primera clase. Ridley 2004b es una maravillosa antología de artículos de alto nivel, lo mismo que Hodge y Radick 2009 (sobre Darwin), y Ruse y Richards 2009 (sobre *El origen*). Una provocadora aproximación filosófica es la que ofrece Dennett 1995. Una excelente revisión de la historia de la teoría evolutiva es Depew y Weber 1995. Wilson 1992 hace una exhaustiva revisión de la biodiversidad. Dawkins 1986, 2009, Carroll 2009 y Coyne 2009 son libros de divulgación de gran calidad. Pallen 2009 es una introducción concisa y muy accesible. Unas pocas páginas web útiles sobre la evolución son www.evolution.berkeley.edu; www.pbs.org/evolution; y www.nationalacademies.org/evolution.
- ²¹ Un libro fundamental sobre la historia y orígenes de la teoría de la evolución es Gould 2002. Otra revisión histórica de alto nivel es Bowler 2009.
- ²² La resistencia a antibióticos y plaguicidas, que se desarrollan en unos pocos años, son ejemplos de microevolución. El origen de los mamíferos a partir de los reptiles es un ejemplo de macroevolución. Un resumen excelente de macroevolución es Carroll, Grenier y Weatherbee 2001.
- ²³ Dobzhansky 1973.
- ²⁴ Charles Lyell (1797-1875) amplió el concepto de que los cambios geológicos son el resultado de la acumulación continua de minúsculas transformaciones durante periodos de tiempo inconmensurablemente grandes, sobre todo en su libro *Principios de geología*. Lyell 1830-1833.
- ²⁵ Clasificada como *Priscomyzon riniensis*. Gess et al. 2006.
- ²⁶ Este pilar de la evolución darwiniana ha sido confirmado por muchos hallazgos espectaculares. Por ejemplo, los descubrimientos de fósiles de dinosaurios con plumas, como *Microraptor gui* y *Mei long*, son coherentes con la idea de que las aves evolucionaron a partir de los reptiles.
- ²⁷ Dos buenas descripciones de la especiación son Schilthuizen 2001, y Coyne y Orr 2004.
- ²⁸ El lector hallará una interesante discusión sobre el árbol de la vida en Dennett 1995.
- ²⁹ Elgvin et al. 2011.
- ³⁰ El estudio que confirmó la conjetura de Nabokov es Vila et al. 2011.
- ³¹ En un impresionante estudio, Meredith et al. 2011 utilizaron veintiséis genes para construir la filogenia de las familias de los mamíferos y estimar los tiempos de divergencia.
- ³² Livio 2000.

³³ Este término se utiliza a veces de una manera abusiva para implicar que se pueden ignorar las complejidades y reducir completamente una disciplina a otra. Nadie debería intentar entender el Don Juan de lord Byron desde la perspectiva de las leyes de la física. Una buena discusión del reduccionismo en el sentido en que lo utilizo aquí puede encontrarse en Weinberg 1992.

³⁴ Por ejemplo, Hutchinson 1959.

³⁵ Dado que la determinación del genoma se realizó con métodos más antiguos, puede haber alguna incertidumbre; McGrath y Katz 2004.

³⁶ Darwin y Seward 1903.

³⁷ Darwin 1964 [1859], p. 61

³⁸ Una descripción muy accesible de la selección natural se encuentra en Mayr 2001. Un libro de texto sobre la selección es Bell 2008. Endler 1986 presenta abundantes pruebas de la selección natural.

³⁹ Marchant 1916, p. 171.

⁴⁰ Malthus argumentó en su Ensayo sobre el principio de la población (publicado en 1798) que los humanos producen demasiados descendientes y que, en consecuencia, si no se impone ninguna restricción, las hambrunas y «la muerte prematura visitará en una forma y otra a la raza humana». Las ideas de Malthus no influyeron únicamente en Darwin y Wallace, sino también en la filosofía económica y política.

⁴¹ El geólogo Frederick Wolaston Hutton (1836-1905) hizo una reseña de El origen para la revista Geologist.

⁴² Bowersox 1999.

⁴³ El genetista británico Bernard Kettlewell (1907-1979) llevó a cabo numerosas investigaciones sobre la mariposa del abedul y el melanismo industrial. Sus hallazgos han sido cuestionados por algunos (por ejemplo, Wells 2000; Hooper 2003) pero defendidos por otros (por ejemplo, Majerus 1998). Un resumen divulgativo de debate se encuentra en Roode 2007.

⁴⁴ Popper 1976, p. 151.

⁴⁵ Popper 1978; también Miller 1985.

⁴⁶ Existe una ingente bibliografía sobre la deriva genética. Puede escucharse una conferencia en línea de Stephen Stearns en www.cosmolearning.com/video-lectures/neutral-evolution-geneticdrift-6687. Otros recursos de fácil acceso en línea son Kliman et al. 2008 y www.ucl.ac.uk/~ucbhdjm/courses/b242/InbrDrift/InbrDrift.html. Un texto muy completo sobre genética de poblaciones es Hartl y Clark 2006.

⁴⁷ Se trata de una manifestación en la comunidad amish de lo que se conoce como «efecto fundador». Cuando una población queda reducida a un tamaño muy pequeño a causa de algunos cambios ambientales o de migración, los genes de los «fundadores» de la población resultantes tienen una representación desproporcionada.

⁴⁸ Lydia Ernestine Becker (1827-1890) publicó el Women's Suffrage Journal entre 1870 y 1890. La cita sobre Darwin es de su discurso, como presidente de Manchester's Ladies' Literary Society, del 30 de enero de 1867. Fue publicado en Becker 1869. También aparece descrito en Blackburn 1902, parte 2.

⁴⁹ Darwin 2009, p. 13.

⁵⁰ Quien primero usó esta expresión fue Hardin 1959, p. 107.

⁵¹ Darwin 2009, p. 160.

⁵² Brownlie y Lloyd Prichard 1963.

⁵³ Jenkin 1867. El artículo aparece reproducido en Hull 1973, p. 303, y también se puede leer en línea en www.victorianweb.org/science/science_texts/jenkins.html.

⁵⁴ Hay excelentes discusiones de los argumentos de Jenkins en Bulmer 2004, Vorzimmer 1963 y Hull 1973.

⁵⁵ Davis 1871.

⁵⁶ Una *grammar school* es una escuela de enseñanza secundaria. (N. del T).

⁵⁷ Hay una interesante descripción de Mendel y su obra en Mawer 2006.

⁵⁸ La descripción presentada aquí es básicamente una versión simplificada de la presentada por Ridley 2004a, pp. 35-39.

⁵⁹ Quien lo explica por primera vez es Fisher 1930.

⁶⁰ Darwin 1958 [1982], p. 18. Un análisis más detallado de los intentos numéricos de Darwin se encuentra en Parshall 1982.

⁶¹ Carta a Wallace del 2 de febrero de 1869, en Marchant 1916, vol. 1. También en Darwin 1887, vol. 2, p. 288.

⁶² Darwin 1909 [1842], p. 3.

⁶³ Hodge 1987.

⁶⁴ Darwin volvió sobre esta idea de una tendencia latente en una carta que escribió a Wallace el 23 de septiembre de 1868 (Darwin y Seward 1903, vol. 2, p. 84). Darwin escribió: «Me parece imposible ver cómo, por ejemplo, unas pocas plumas rojas de la cabeza del macho de un pájaro, que en un principio se transmiten a los dos sexos, acaban transmitiéndose únicamente a los machos. No basta con que a partir de machos con plumas rojas se produzcan hembras despojadas de plumas rojas, sino que estas hembras tienen que tener una tendencia latente a producir esas plumas, pues de lo contrario llevarían a la degradación de las plumas rojas de la cabeza de su descendencia masculina».

⁶⁵ Darwin estaba trabajando en la quinta edición de El origen; en F. Darwin 1887, vol. 3, p. 107. Véase también Bulmer 2004, Morris 1994.

⁶⁶ Peckham 1959, p. 178.

⁶⁷ Peckham 1959, p. 178.

⁶⁸ Se desconoce la fecha exacta de esta carta, pero como fue enviada desde Moor Park, tuvo que ser de antes del 12 de noviembre de 1857. En Darwin y Seward 1903, vol. 1, p. 102.

⁶⁹ Darwin 1868, vol. 2, p. 374.

⁷⁰ Carta fechada «martes, febrero, 1866». Marchant 1916, vol. 1, p. 168.

⁷¹ Hay una buena discusión del intercambio entre Darwin y Wallace y de su significación en Dawkins 2009.

⁷² Además de Mawer 2006, Orel 1996 ofrece una narración detallada de la vida y obra de Mendel. Véase también Brannigan 1981.

⁷³ Kitcher 1982, p. 9; Rose 1998, p. 33; Henig 2000, pp. 143-144.

⁷⁴ Dover 2000, p. 11.

⁷⁵ Sclater 2003. Véase también Keynes 2002.

⁷⁶ En De Beer 1964 se encuentra una excelente descripción de las influencias (o falta de ellas) entre Darwin y Mendel.

⁷⁷ Mendel 1866 [1865], p. 36 (citado en De Beer 1964).

⁷⁸ Darwin 1964 [1859], p. 7; o Darwin 2009, p. 8.

⁷⁹ Mendel 1866, p. 39 (citado en De Beer 1964).

⁸⁰ Para una discusión de las primeras respuestas del Vaticano a la evolución, véase Harrison 2001.

⁸¹ El efecto fue demostrado por Kruger y Dunning 1999. Una descripción accesible se puede encontrar en Chabris y Simons 2010.

⁸² Los antiguos hindúes creían que un ciclo de destrucción y renovación duraba 4,32 millones de años (por ejemplo, Holmes 1947, pp. 99-108).

⁸³ Teófilo de Antioquía (ca. 115-180 EC) se convirtió al cristianismo de adulto. Solo ha sobrevivido uno de sus escritos, en un manuscrito del siglo XI, citado en Haber 1959, p. 17, y en Dalrymple 1991, p. 19.

⁸⁴ Ussher (1581-1656) calculó que la Creación se había producido en el año 710 del calendario juliano; Brice 1982.

⁸⁵ La nota se eliminó a principios del siglo XX. Kirkaldy 1971, p. 5.

⁸⁶ Spinoza 1925, vol. 3, p. 98.

⁸⁷ Filón, siglo I, libro I.

⁸⁸ Kant 1754. En Reinhardt y Oldroyd 1982 aparece una traducción al inglés.

⁸⁹ La referencia es a Fontenelle, *Entretiens sur la pluralité des mondes*.

⁹⁰ Una traducción inglesa a Maillet 1748 es Carozzi 1969.

⁹¹ MacCurdy 1939, p. 342.

⁹² De Maillet 1748; Cyrano de Bergerac fue el imaginativo autor de *L'Autre Monde ou les Etats et Empires de la Lune et du Soleil*.

⁹³ Newton 1687; véase la traducción inglesa de Motte 1848, p. 486.

⁹⁴ El vigésimo volumen de la *Histoire naturelle, générale et particulière* fue titulado *Époques de la nature*. En él, dividía la historia de la Tierra en siete épocas, e intentaba estimar la duración de cada una de ellas. Puede encontrarse una buena descripción en Haber 1959, p. 118.

⁹⁵ Hutton 1788

⁹⁶ Richard Kirwan fue presidente de la Real Academia Irlandesa. Escribió una serie de artículos y un libro a favor de la descripción bíblica y en contra de Hutton. La cita incluida aquí es de Kirwan 1797.

⁹⁷ Lyell 1830-1833.

⁹⁸ Hay varias biografías detalladas de lord Kelvin. Las que me han parecido más esclarecedoras son Gray 1908, Thompson 1910 (reimpresión en 1976), Smith y Wise 1989, Lindley 2004 y Sharlin 1979. Wilson 1987 compara línea por línea la física de Kelvin y la del físico victoriano sir George Gabriel Stokes (Stokes vivió en 1819-1903, Kelvin 1824-1907). Burchfield 1990 se centra en las indagaciones de Kelvin sobre el problema de la edad de la Tierra.

⁹⁹ El «Senior Wrangler» era el estudiante de grado que obtenía las notas más altas en los exámenes extraordinarios de matemática de Cambridge, conocidos como «Tripos». La mayoría esperaba que ese honor se lo llevase William Thomson. De hecho, su tutor, el doctor Cookson, comentó que «sería una gran sorpresa para la universidad que no fuese así». El propio Thomson no estaba tan convencido. Cuando la competición comenzó, otro estudiante, Stephen Parkinson, que al parecer era más eficiente para dar una respuesta rápida y económica, se manifestó como un candidato a la victoria. Al final, Kelvin, que tenía más talento pero era más lento, quedó segundo. No obstante, Kelvin batió a Parkinson en el premio Smith, concedido al mejor desempeño en una serie de exámenes que al parecer requerían una comprensión analítica más profunda.

¹⁰⁰ Kelvin hizo este comentario en sus Conferencias de Baltimore sobre dinámica molecular y teoría ondulatoria de la luz, pronunciadas en la Universidad Johns Hopkins en 1884.

¹⁰¹ Kelvin 1864.

¹⁰² Kelvin 1862.

¹⁰³ Kelvin realizó numerosas contribuciones a la termodinámica. En 1844 publicó un artículo sobre la «edad» de las distribuciones de temperatura. Básicamente, mostró que una distribución de temperatura medida en el presente solo puede ser el resultado de una distribución de calor que existió en algún tiempo finito en el pasado. En 1848 concibió la escala absoluta de temperatura que lleva su nombre. En un artículo de 1851 titulado «On the Dynamical Theory of Heat», formuló una versión de lo que hoy conocemos como segunda ley de la termodinámica.

¹⁰⁴ Kelvin 1864.

¹⁰⁵ Una buena descripción del desarrollo de la teoría de la conductividad térmica se encuentra en Narasimhan 2010.

¹⁰⁶ Kelvin admitió que «es mucha nuestra ignorancia sobre los efectos de las altas temperaturas sobre la conductividad y calor específico de las rocas, así como sobre su calor latente de fusión». Estos tipos de incertidumbre acabaron desempeñando un importante papel en su error.

¹⁰⁷ Esta escala de tiempo se conoce hoy como escala de tiempo de Kelvin-Helmholtz.

¹⁰⁸ Kelvin 1862. Shaviv 2009 presenta una exposición muy detallada pero bastante accesible de la teoría de la estructura y evolución estelar.

¹⁰⁹ Thomson 1899. Chamberlain 1899 presenta un comentario sobre el discurso de Kelvin de 1899.

¹¹⁰ El 27 de febrero de 1868; Kelvin 1891-1894, vol. 2, p. 10.

¹¹¹ Kelvin 1891-1894, vol. 2, p. 10.

¹¹² La velocidad angular de la Tierra en su rotación alrededor de su eje es mayor que la velocidad angular de la Luna en su órbita. A consecuencia de ello, las fuerzas de las mareas tienden a frenar la rotación de la Tierra y a aumentar la distancia entre la Tierra y la Luna.

¹¹³ Kelvin 1868.

¹¹⁴ Durante su estancia en Trinity College en Cambridge, George Darwin (1845-1912) fue Second Wrangler y ganó el premio Second Smith.

¹¹⁵ Darwin repitió el resultado de su carta de 1878 considerando la rigidez de la Tierra en su discurso presidencial de 1886 ante la Asociación Británica (G. H. Darwin 1886), llegando a la conclusión de que no veía ningún derecho a «estar tan seguro sobre la estructura interna de la Tierra como para poder alegar que la Tierra no se ajusta en toda su masa casi completamente a la figura de equilibrio».

¹¹⁶ G. H. Darwin en Stratton y Jackson 1907-1916, vol. 3, p. 5.

¹¹⁷ Kelvin 1891-1894, vol. 2, p. 304.

¹¹⁸ Kelvin pronunció su discurso presidencial, titulado «Sobre el origen de la vida», en Edimburgo en agosto de 1871. Kelvin 1891-1894, vol. 2, p. 132

¹¹⁹ Kelvin 1891-1894, vol. 2, p. 132.

¹²⁰ Burchfield 1990 (sobre todo en los capítulos 3 y 4) proporciona una amplia discusión de la influencia e impacto de Kelvin.

¹²¹ El suceso tuvo lugar durante la reunión de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, que celebraba su trigésima conferencia anual del 27 de junio al 4 de julio de 1860. El principal acontecimiento del 30 de junio era una conferencia bastante larga del historiador de la ciencia John William Draper. El número de asistentes se estimó entre cuatrocientos y setecientos (según el Evening Star, número del 2 de julio). Al parecer, los comentarios del obispo Wilberforce tras la conferencia duraron una media hora. Finalizó diciendo que «las conclusiones de Mr. Darwin eran una hipótesis que de la manera menos filosófica fueron alzadas a la dignidad de una teoría causal» (según información publicada el 7 de julio en Athenaeum). El estudio más minucioso del evento está en Jensen 1988. Véase también Lucas 1979. 41. Sidgwick 1898.

¹²² Sidgwick 1898.

¹²³ Por ejemplo, el Press informó el 7 de julio: «[El obispo] le preguntó al profesor [Huxley] si preferiría tener a un mono por abuelo o por abuela». El propio Huxley le había escrito a su amigo el doctor Frederick Dryster el 9 de septiembre de 1860: «salvo desde luego la pregunta planteada sobre mis predilecciones personales en cuestión de ascendencia [...]. Si, pues, le contesté yo, se me pregunta si preferiría tener a un miserable simio como abuelo o un hombre muy bien dotado por la naturaleza y en posesión de grandes medios e influencia y que, sin embargo, emplea esas facultades con el simple propósito de introducir el ridículo en una discusión científica sería, sin ninguna duda afirmo mi preferencia por el simio». La carta se encuentra en The Huxley Papers, 15, 117 (Imperial College, Londres) y aparece citada en Foskett 1953.

¹²⁴ Moore 1979, p. 60.

¹²⁵ Huxley 1909 [1869], pp. 335-336.

¹²⁶ Tait 1869.

¹²⁷ La lista que apareció en el número de diciembre de 1999 de Physics World incluía, en este orden: Albert Einstein, Isaac Newton, James Clerk Maxwell, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Galileo Galilei, Richard Feynman, Paul Dirac, Erwin Schrödinger y Ernest Rutherford. En otras encuestas aparecen listas ligeramente distintas. (En particular, en varias listas Newton aparece en primer lugar seguido de Einstein).

¹²⁸ Véase, por ejemplo, Dalrymple 2001.

¹²⁹ Cita de Oliver Wendell Holmes, Jr. (1841-1935), jurista americano y miembro del Tribunal Supremo de Estados Unidos, conocido como «el gran inconformista». (N. del T).

¹³⁰ Huxley 1909 [1869].

¹³¹ John Perry (1850-1920) nació en Irlanda. Tras ejercer de profesor de ingeniería mecánica en el Reino Unido y en Japón, fue nombrado catedrático de ingeniería y matemáticas de Finsbury Technical College en Londres. En 1896 fue promovido a una cátedra en el Royal College de Londres. Durante su carrera, Perry introdujo nuevos métodos de enseñanza de la matemática y trabajó sobre problemas de electricidad aplicada. Véase, por ejemplo, Nudds, McMillan, Weaire y McKenna Lawlor 1988; Armstrong 1920.

¹³² Salisbury argumentó que cien millones de años no bastarían para que la selección natural transformara medusas en humanos, y repitió la objeción de Kelvin basada en el argumento del diseño. Salisbury 1894. Descrito también en Shipley 2001.

¹³³ Perry le escribió a Oliver Lodge el 31 de octubre de 1894. Añadió que si había que descartar la selección natural, la única alternativa que quedaba era apelar a alguna providencia, lo que consideraba destructivo para el razonamiento científico. Shipley 2001.

¹³⁴ A los físicos Joseph Larmor y George FitzGerald, así como a Osborne Reynolds y Peter Guthrie Tait. También le escribió a Kelvin el 17 de octubre de 1894, y de nuevo el 22 y el 23 de octubre (Cambridge University Library, Papers of Lord Kelvin Add. MS. 7342 [P56, P57, P58]).

¹³⁵ La cena se celebró el 28 de octubre de 1894. Perry le escribió a Oliver Lodge el 29 de octubre (University College London, Lodge Papers Add. MS. 89).

¹³⁶ Perry 1895a.

¹³⁷ Un extracto de la carta de Tait se incluye en Perry 1895a.

¹³⁸ Carta de Perry a Tait del 26 de noviembre de 1894. Esta carta también se incluye en Perry 1895a. Perry también observa que «hallé que muchos de mis amigos estaban de acuerdo conmigo».

¹³⁹ Carta de Tait a Perry de 27 de noviembre de 1894 (Cambridge University Library, Papers of Lord Kelvin, Add. MS. 7342, P59d). Incluida en Perry 1895a.

¹⁴⁰ Carta de Perry a Tait de 29 de noviembre de 1894. Incluida en Perry 1895a. En su carta, Perry hizo hincapié en dos argumentos: (1) que había cierto grado de fluidez en el interior de la Tierra, de manera que el calor se podía transportar por convección, y (2) que de acuerdo con los resultados de Robert Weber, la conductividad de las rocas aumentaba con la temperatura. Más tarde, lo segundo resultó ser erróneo.

¹⁴¹ Carta de Kelvin a Perry de 13 de diciembre de 1894. Incluida en Perry 1895a, p. 227. Kelvin estaba especialmente interesado en contrastar los resultados de Weber sobre la conductividad.

¹⁴² Kelvin a Perry a 13 de diciembre de 1894. Incluido en Perry 1894a.

¹⁴³ Por su parte, Perry buscó la ayuda del matemático Oliver Heaviside, y publicó un análisis matemático del problema más sofisticado; Perry 1895b.

¹⁴⁴ Thomson (lord Kelvin) 1895, Thomson (lord Kelvin) y Murray 1895. Kelvin también basó sus conclusiones en mediciones del punto de fusión de la diabasa, un basalto, realizados por el geólogo Carl Bakus.

¹⁴⁵ Perry 1895c. El debate entero se describe con todo detalle en Shipley 2001 y Burchfield 1990.

¹⁴⁶ El descubrimiento de la radiactividad está en Becquerel 1896; el descubrimiento de que se produce calor está en Curie y Laborde 1903.

¹⁴⁷ Wilson 1903. Su carta al editor solo ocupaba quince líneas.

¹⁴⁸ Darwin 1903. Especuló que la edad estimada por Kelvin se podía incrementar en un factor de diez o veinte.

¹⁴⁹ Joly 1903.

¹⁵⁰ Eve 1939 ofrece una buena biografía de Rutherford, con una descripción de sus investigaciones.

¹⁵¹ Así lo comentó en una carta al físico inglés lord Rayleigh de 24 de agosto de 1903, y también lo discutió con el propio Rutherford y con Pierre y Marie Curie durante la visita de estos a Inglaterra.

¹⁵² Kelvin 1904.

¹⁵³ El físico y premio Nobel sir Joseph John «J. J.» Thomson (sin relación con lord Kelvin), el descubridor del electrón, recordaba en 1936 que Kelvin había reconocido en una conversación que el descubrimiento del calor derivado de la radiactividad socavaba sus suposiciones para el cálculo de la edad de la Tierra; Thomson 1936, p. 420. Kelvin hizo una concesión parecida durante el congreso de la Asociación Británica; Eve 1939, p. 109.

¹⁵⁴ Comenzó con una carta de Kelvin publicada el 9 de agosto de 1906, en la que reiteraba su convicción de que la energía del Sol solo era gravitatoria y afirmaba que la radiactividad no era más que una hipótesis. A lo largo de un mes fueron apareciendo cartas de respuesta de Frederick Soddy, Oliver Lodge, Robert John Strutt (físico e hijo de lord Rayleigh) y Kelvin. En su carta del 15 de agosto, Lodge dijo de Kelvin que «su mente brillante y original no siempre se ha sometido pacientemente a la tarea de asimilar el trabajo de otros mediante el proceso de la lectura». El episodio aparece descrito en Eve 1939, pp. 140-141, Burchfield 1990, p. 165, y Lindley 2004, p. 303. Soddy 1906 hace un repaso de la controversia.

¹⁵⁵ Citado, por ejemplo, en Eve 1939, p. 107.

¹⁵⁶ Holmes 1947 hace un interesante repaso. La edad aceptada en la actualidad fue determinada originalmente por el geoquímico Clair Patterson usando datos del meteorito de Cañón Diablo (Patterson 1956). Los científicos del Laboratorio Nacional Argonne han dado un nuevo e interesante uso a la datación radiométrica. Utilizaron la desintegración del criptón 81, un isótopo muy poco abundante, para datar con éxito en 2011 el antiguo acuífero Nubio que se extiende por el norte de África.

¹⁵⁷ Eve 1939, p. 107.

¹⁵⁸ England, Molnar y Richter 2007; Richter 1986.

¹⁵⁹ El texto clásico es Festinger 1957. Estudios más recientes han revelado detalles complejos, tanto en el ámbito de la psicología como en el de la neurociencia; por ejemplo, Cooper y Fazio 1984, vol. 17, p. 229; Lee y Schwartz 2010; Van Overwalle y Jordens 2002; Van Veen et al. 2009.

¹⁶⁰ Ochs 2005 y Dein 2001 ofrecen interesantes descripciones y análisis de los acontecimientos que rodearon a la muerte de Schneerson. 32. Brehm 1956.

¹⁶¹ Olds y Milner 1954; Olds 1956 es una versión de divulgación.

¹⁶² Se han realizado numerosos estudios sobre reacciones afectivas positivas y adicciones. Véase, por ejemplo, Bozarth 1994, Fiorino, Coury y Phillips 1997, Berridge 2003 y Wise 1998. Una obra de divulgación sobre este tema es Nester y Malenka 2004, y otros libros muy accesibles sobre la experiencia del placer son Linden 2011 y Bloom 2010.

¹⁶³ Burton 2008, pp. 99-100 y p. 218.

¹⁶⁴ El razonamiento motivado implica una regulación emocional. Los estudios sugieren que el razonamiento motivado es cualitativamente distinto del razonamiento que se produce cuando la persona no tiene una fuerte implicación emocional en los resultados. Una amplia revisión del razonamiento motivado se encuentra en Kunda 1990. La implicación de la emoción en la toma de decisiones se discute, por ejemplo, en Bechara, Damasio y Damasio 2000. Un libro de divulgación es Coleman 1995. Westen et al. 2006 presentan los estudios de IRMF.

¹⁶⁵ King 1893.

- ¹⁶⁶ Stacey 2000 ofrece una buena discusión sobre la importancia de la estimación de Kelvin de la edad del Sol.
- ¹⁶⁷ El problema de la generación de energía en las estrellas se comenta en el capítulo 8.
- ¹⁶⁸ Darwin insirió esta frase en la sexta edición; Peckham 1959, p. 728.
- ¹⁶⁹ Hager 1995, p. 374, da una buena descripción del evento
- ¹⁷⁰ Watson paró en Ginebra durante su viaje de regreso desde Nápoles a Copanague, en Dinamarca, donde realizaba un posdoctorado.
- ¹⁷¹ «Chemists Solve a Great Mystery: Protein Structure Is Determined», *Life*, 24 de septiembre de 1951, pp. 77-78.
- ¹⁷² Hay bastantes biografías de Pauling. Las siguientes me han parecido especialmente útiles: Hager 1995, Serafini 1989, Goertzel y Goertzel 1995 y Marinacci 1995. Varios libros tratan muy bien diversos aspectos del trabajo de Pauling. Entre ellos, quisiera mencionar Olby 1974, Lightman 2005, Judson 1996 y, por supuesto, la fantástica página web de Oregon State University: <http://osulibrary.oregonstate.edu/specialcollections/coll/pauling>.
- ¹⁷³ Pauling 1935, Pauling y Coryell 1936. Pauling y el químico Charles D. Coryell llevaron a cabo el experimento suspendiendo entre los polos de un gran imán un tubo con sangre de vaca; Judson 1996, pp. 501-502 ofrece una buena descripción.
- ¹⁷⁴ Pauling no tenía demasiado conocimiento de las moléculas de las proteínas, de manera que convenció a Mirsky, entonces en el Instituto Rockefeller de Investigación Médica, para que fuera a Caltech durante el año 1935-1936. (¡También convenció al presidente del Instituto Rockefeller para que permitiera que Mirsky se fuera!)
- ¹⁷⁵ Mirsky y Pauling 1936. Hsien Hu ya había hecho algunos progresos en 1931.
- ¹⁷⁶ Es muy significativo con relación a los trabajos posteriores de Pauling que los autores observaran que «esta cadena está plegada es una configuración definida de manera única, sostenida por enlaces de hidrógeno». Los enlaces de hidrógeno (en los que el hidrógeno queda sostenido conjuntamente por dos átomos, con lo cual crea un puente entre ellos) se convertirían en la marca de Pauling.
- ¹⁷⁷ Astbury 1936.
- ¹⁷⁸ Pauling describió sus actividades de aquella época en un dictado realizado en 1982. La transcripción fue publicada por la ayudante de Pauling, Dorothy Munro; Pauling 1996.
- ¹⁷⁹ El papel original utilizado por Pauling sobre el que en 1948 bosquejó la estructura y luego lo dobló, no se ha encontrado nunca.
- ¹⁸⁰ Corey ya tenía una experiencia considerable con estudios de rayos X de proteínas. Muchos años más tarde, Pauling tuvo la dignidad de comentar que tal vez fuera Corey quien lo había convencido a él.
- ¹⁸¹ Pauling 1996. Debo señalar que en un escrito anterior, Pauling 1955, Pauling dice que encontró solamente una de las dos hélices en Oxford, mientras que la otra fue descubierta por Herman Branson cuando Pauling regresó a Caltech.
- ¹⁸² Olby 1974, p. 278, da una descripción excelente, aunque algo técnica, del camino que llevó a la hélice alfa.
- ¹⁸³ Pauling le escribió al químico y cristalógrafo Edward Hughes. Citado en la página web The Pauling Blog bajo el epígrafe «An Era of Discovery in Protein Structure» («Una era de descubrimientos de la estructura de las proteínas»).
- ¹⁸⁴ Pauling admitió en entrevistas posteriores que le había preocupado que el grupo de Cavendish le ganara a comprobar los modelos. Olby 1974, p. 281; Hager 1995, p. 330.
- ¹⁸⁵ Según Pauling 1955, Branson podría haber encontrado solamente una de las dos hélices, después de que Pauling le explicase todas las restricciones importantes en juego. En Pauling 1996, da la impresión de que él (Pauling) hubiera descubierto las dos hélices en Oxford y que Branson las hubiera confirmado más tarde.
- ¹⁸⁶ Bragg, Kendrew y Perutz 1950.
- ¹⁸⁷ El lector encontrará buenas descripciones de la técnica y de sus aplicaciones, por ejemplo, en McPherson 2003. Blow 2002 ofrece una descripción breve con menos física.
- ¹⁸⁸ Bragg, Kendrew y Perutz 1950.
- ¹⁸⁹ Perutz 1987.
- ¹⁹⁰ Pauling y Corey 1950.
- ¹⁹¹ Pauling, Corey y Branson 1951. Resulta un tanto triste que en 1984 Branson escribiese una carta a los biógrafos de Pauling Ted y Ben Goertzel en la que alegaba que había sido él, y no Pauling, quien había «descubierto dos estructuras espirales que se ajustaban a los datos». En 1995 añadió que Corey no había tenido nada que ver con el descubrimiento (Goertzel y Goertzel 1995, pp. 95-98). Estas alegaciones no concuerdan con los recuerdos de diversos científicos que recordaban los modelos de Pauling en Oxford, y tampoco con el hecho de que Branson hubiera accedido a ser el tercer autor del artículo. El propio Branson observó que Pauling fue «uno de los intelectos científicos más impresionantes de nuestra época que merece los premios Nobel».
- ¹⁹² Dunitz, en una conversación con el autor el 23 de noviembre de 2010.
- ¹⁹³ Perutz 1987.
- ¹⁹⁴ Dunitz 1991 contiene un resumen sucinto de los logros de Pauling.
- ¹⁹⁵ Pauling 1948a.
- ¹⁹⁶ Pauling 1939, p. 265.
- ¹⁹⁷ Francoeur 2001, p. 95. Véase también Nye 2001, p. 117.
- ¹⁹⁸ Pauling 1948b.
- ¹⁹⁹ Pauling 1948b.
- ²⁰⁰ Por ejemplo, Levene y Bass 1931. Olby 1974, pp. 73-96, contiene una buena descripción de las primeras investigaciones.
- ²⁰¹ Wilson 1925.

- ²⁰² Esta idea, conocida como «paradigma de las proteínas», está descrita, por ejemplo, en Kay 1993.
- ²⁰³ Avery, MacLeod y McCarty 1944.
- ²⁰⁴ La carta fue escrita el 13 de mayo de 1943. Forma parte de «The Oswald T. Avery Collection» en la web Profiles in Science: National Library of Medicine, en <http://profiles.nlm.nih.gov/ps/retrieve/Collection/CID/CC>.
- ²⁰⁵ El hecho de que el artículo se publicase en 1944, durante la guerra, puede haber ayudado a que tuviera poco eco.
- ²⁰⁶ P. Pauling 1973.
- ²⁰⁷ Ronwin 1951.
- ²⁰⁸ Pauling y Schomaker 1952a.
- ²⁰⁹ Escribió a Pauling para hacerle saber de un artículo publicado por el químico Ludwig Anschütz en 1927, en el que este sugería que el fósforo estaba enlazado a cinco átomos de oxígeno en algunas estructuras.
- ²¹⁰ Pauling y Schomaker 1952b.
- ²¹¹ El bioquímico Gerald Oster escribió a Pauling sobre esta cuestión el 9 de agosto de 1951. Oster interpretó el retraso de Wilkins en publicar las imágenes como una falta de interés por su parte, aunque en realidad Wilkins estaba trabajando para confirmar los resultados con mejores herramientas.
- ²¹² Aunque, como es natural, el descubrimiento de la estructura del ADN se ha contado muchas veces, los relatos autobiográficos siguen teniendo un valor especial, pese a todas las controversias. Watson 1980 (en la edición crítica de Norton) es especialmente recomendable. Incluye, además del texto original (y controvertido) de Watson, una excelente selección de revisiones y análisis. También son muy recomendables Crick 1988 y Wilkins 2003. Por desgracia, Rosalind Franklin no vivió lo bastante para escribir su autobiografía, pero hay dos biografías (Sayre 1975 y Maddox 2002) que llenan muy bien la laguna. Más recientemente, la hermana de Franklin, Jenifer Glynn, ha escrito unas maravillosas memorias (Glynn 2012). Otra interesante perspectiva sobre las experiencias de Franklin como mujer en un laboratorio dominado por hombres es Des Jardins 2010, pp. 180-195.
- ²¹³ Watson 1980, p. 13.
- ²¹⁴ Randall escribió a Franklin el 4 de diciembre de 1950. Añadió: «No estoy de este modo sugiriendo que debemos abandonar toda idea de trabajar sobre las soluciones, pero me parece que la investigación sobre las fibras tendría un provecho más inmediato, y tal vez fundamental». La carta aparece reproducida, por ejemplo, en Olby 1974, p. 346, y en Maddox 2002, p. 114. Véase también Klug 1968a, b.
- ²¹⁵ Watson 1951, citado en Olby 1974, p. 354.
- ²¹⁶ Olby 1974, p. 310.
- ²¹⁷ Watson 1980, p. 9.
- ²¹⁸ Crick 1988, p. 64.
- ²¹⁹ Crick 1988, p. 70.
- ²²⁰ Crick 1988, p. 64.
- ²²¹ John Randall le escribió a Pauling el 28 de agosto de 1951. Comenzó explicándole que, en contra de la interpretación de Gerald Oster, Wilkins estaba muy interesado en el trabajo sobre el ADN: «Me temo que Oster no está muy bien informado sobre nuestras intenciones respecto al ácido nucleico. Wilkins y otros están muy ocupados intentando descifrar las fotografías de rayos X del ácido desoxirribonucleico». Pauling respondió cortésmente el 25 de septiembre de 1951 diciendo que lamentaba haber molestado a Randall. Todos los documentos relevantes se encuentran en la página web de la Universidad Estatal de Oregón.
- ²²² Chargaff 1978, p. 101.
- ²²³ Chargaff 1978, p. 101. Chargaff añade (p. 102): «Les dije todo lo que sabía. Si ya sabían lo de las reglas de emparejamiento, se lo callaron».
- ²²⁴ Crick, en una entrevista grabada con Robert Olby; Olby 1974, p. 294.
- ²²⁵ Crick escribió un borrador en el que describía su enfoque (Olby 1974, p. 357). Crick dice claramente en el borrador que su primer modelo con Watson vino «estimulado por los resultados presentados por los investigadores de King's College, Londres, en un coloquio celebrado el 21 de noviembre de 1951». También se refiere de manera explícita al modelo de la hélice alfa de Pauling.
- ²²⁶ Franklin había encontrado ocho moléculas por nucleótido, mientras que Watson refirió cuatro moléculas por punto de la malla.
- ²²⁷ Gann y Witkowski 2010.
- ²²⁸ Gann y Witkowski 2010.
- ²²⁹ Gann y Witkowski 2010.
- ²³⁰ Una descripción excelente del trabajo de Franklin se encuentra en Klug 1968a, con algunas aclaraciones en Klug 1968b e información adicional en Klug 1974. Elkin 2003 presenta una perspectiva histórica, y Braun, Tierney y Schmitzer 2011 ofrecen una explicación pedagógica del trabajo técnico.
- ²³¹ Según Klug 1968a, la actitud de Franklin contra la hélice en mayo de 1952 era consecuencia de su incertidumbre en torno a la capacidad de sobrevivir que tendría una estructura helicoidal en la forma A del ADN. Su general renuencia a suponer cualquier cosa sobre la estructura queda reflejada en su afirmación: «No se hará ningún intento por introducir hipótesis sobre los detalles de la estructura en la fase actual». (Franklin y Golsing 1953).
- ²³² Crick 1988, p. 69.
- ²³³ La placa de rayos X del ADN obtenida por Beighton en 1951 se encuentra depositada en Special Collections, Astbury Papers, C7, en la Universidad de Leeds. Las fotografías pueden verse en línea en www.leeds.ac.uk/heritage/Astbury/Beighton_photo/index.html.

²³⁴ El episodio completo se explica detalladamente en Hager 1995, pp. 400-407. La atmósfera anticomunista imperante en aquellos tiempos está vivamente descrita, por ejemplo, en Coute 1978.

²³⁵ Pauling escribió a Harry Truman el 29 de febrero de 1952.

²³⁶ El New York Times publicó varias noticias y más tarde, el 19 de mayo de 1952, discutió sobre todo el sistema de pasaportes en relación de Pauling en un artículo titulado «El aprieto del Dr. Pauling». El Washington Post escribió el 13 de mayo de 1952: «Denegado el pasaporte a Pauling, reputado químico», y el Daily Sun-Times de Chicago publicó el 14 de mayo de 1952 un artículo titulado «La cortina de hierro de América».

²³⁷ Entrevista con el autor el 15 de noviembre de 2010.

²³⁸ Chargaff 1950, y también Chargaff, Zamenhof y Green 1950.

²³⁹ Hershey y Chase 1952.

²⁴⁰ Williams 1952.

²⁴¹ Puede verse un ejemplo de una fotografía de difracción de fibras de ADN obtenida por Florence Bell en el laboratorio de Astbury en la colección en línea de la Universidad de Leeds en www.leeds.ac.uk/heritage/Astbury/Bell_Thesis/index.html; los artículos que publicaron son Astbury y Bell 1938, y Astbury y Bell 1939.

²⁴² Pauling y Corey 1953.

²⁴³ Pauling y Corey 1953.

²⁴⁴ Judson (1996, p. 131) supo de esta reunión por un científico que aquel invierno había trabajado en Caltech. Al parecer, Pauling intentaba animarse ante los problemas políticos que entonces tenía.

²⁴⁵ La carta de Pauling a Alexander Todd se encuentra en la página web de la Universidad Estatal de Oregón en <http://osulibrary.orst.edu/specialcollections/coll/pauling/dna/corr/sci9.001.16-lptodd-19521219.html>.

²⁴⁶ Esta carta también se puede consultar en la web de la Universidad Estatal de Oregón en <http://osulibrary.orst.edu/specialcollections/coll/pauling/dna/corr/sci14.014.7-lp-moe-19521219.html>.

²⁴⁷ P. Pauling 1973.

²⁴⁸ Carta de Peter Pauling a Linus, Ava Helen y Crellin Pauling, el hermano de Peter. En <http://osulibrary.orst.edu/specialcollections/coll/pauling/dna/corr/bio5.041.6-peterpauling-paulings-19530113-01.html>

²⁴⁹ Carta de Peter Pauling a Linus y Ava Helen Pauling. La transcripción de la página web interpreta erróneamente «I am in direct manner» («estoy de manera directa») cuando debería decir (véase el original) «in an indirect manner» («de manera indirecta»). En <http://osulibrary.orst.edu/specialcollections/coll/pauling/dna/corr/bio5.041.6-peterpauling-lp-19530123.html>.

²⁵⁰ Descrito en Watson 1980, p. 94.

²⁵¹ Watson 1980, p. 95. Watson escribió: «En lugar de jerez, permití que Francis me invitara a un whisky».

²⁵² Wilkins añadió: «No es posible que haya examinado atentamente los detalles de lo que publicaron en ese artículo sobre el emparejamiento de bases; casi todos los detalles son sencillamente erróneos». Citado en Judson 1996, p. 80. El propio Pauling le admitió a Judson (1996, p. 135): «No trabajamos muy a fondo en aquello».

²⁵³ El propio Pauling menciona este extremo en su segunda Conferencia de la Fundación Hitchcock, «Chemical Bonds in Biology» («Los enlaces químicos en la biología»), pronunciada en la Universidad de California en Berkeley el 17 de enero de 1983.

²⁵⁴ Hablé con Alex Rich el 15 de noviembre de 2010, y con Jack Dunitz el 23 de noviembre de 2010.

²⁵⁵ P. Pauling 1973.

²⁵⁶ En una serie de artículos fundacionales, Kahneman y Tversky discuten a fondo este tema. Véase también, por ejemplo, Kahneman y Tversky 1973, 1982. También Kahneman, Slovic y Tversky 1982, y Cosmides y Tooby 1996. Una excelente exposición divulgativa es Kahneman 2011. Schulz 2010, pp. 115-132 ofrecen una exquisita discusión de algunos aspectos del razonamiento inductivo en relación con el error.

²⁵⁷ Entrevista para New Scientist; Else 2011.

²⁵⁸ Lehrer 2009 ofrece una detallada descripción del proceso de decisión.

²⁵⁹ Kahneman 2011, pp. 363-374 ofrece algunos ejemplos clarificadores. Es interesante que los estudios de IRMF muestran que las respuestas emocionales en la amígdala (la región del cerebro asociada con los sentimientos negativos) en las personas que se dan cuenta de que «90 por ciento magro» es lo mismo que «10 por ciento grasa» son muy parecidas a las de las personas afectadas por el efecto de encuadre. Las diferencias aparecen en la corteza prefrontal, que controla las emociones al pensar en ellas racionalmente. Véase, por ejemplo, de Martino et al. 2006.

²⁶⁰ Carta de Linus Pauling a Henry Allen Moe de 19 de diciembre de 1952. En <http://osulibrary.orst.edu/specialcollections/coll/pauling/dna/corr/sci14.014.7-lp-moe-19521219.html>.

²⁶¹ Pauling repitió en varias ocasiones este comentario de Ava Helen. Véase, por ejemplo, Hager 1995, p. 431.

²⁶² Pauling y Corey 1953, p. 96. Este es un aspecto importante, pues demuestra que Pauling relacionó la estructura con la capacidad de portar información. Pauling y Corey también se refirieron a la secuenciación de aminoácidos, observando que en términos de las dimensiones implicadas, los ácidos nucleicos son «adecuados para el ordenamiento de los residuos de aminoácidos en una proteína». Este aspecto fue claramente remarcado por Matt Meselson en su conferencia sobre Pauling. En <http://osulibrary.oregonstate.edu/specialcollections/events/1995paulingconference/video-s32-meselson.html>.

²⁶³ Carta de Linus Pauling a Peter Pauling de 27 de marzo de 1953. En <http://osulibrary.orst.edu/specialcollections/coll/pauling/dna/corr/sci9.001.33-lp-peterpauling-19530327.html>.

²⁶⁴ En el contexto del Proyecto Betula (un proyecto de investigación sobre la memoria humana), el psicólogo Lars-Göran Nilsson y sus colaboradores pasaron muchos tests de memoria a personas entre treinta y cinco y ochenta años de edad, y repitieron los tests anualmente. El proyecto comenzó en 1988, y los investigadores estudiaron un total de 4200 individuos. Una colección de los artículos que describen muchos de los resultados es Bäckman y Nyberg 2010.

²⁶⁵ Conversación de 18 de abril de 2011. Jack Szostak, premio Nobel en Psicología o Medicina, a quien también pregunté sobre el error de química de Pauling, también sugirió que Pauling debió pensar que ya encontraría el modo de que la estructura funcionara desde un punto de vista químico.

²⁶⁶ Watson y Crick 1953a.

²⁶⁷ Además, el espaciado entre puntos oscuros sucesivos indica que la distancia correspondiente a una vuelta completa de la hélice (que se encontró que era de 34 angstroms), y la distancia entre el centro de la forma de X (figura 14) hasta lo alto indica la distancia entre bases sucesivas.

²⁶⁸ Watson 1980, p. 98.

²⁶⁹ Entonces no se conocía con certeza la localización precisa de los átomos de hidrógeno en las bases. (Había varias de las formas llamadas tautoméricas). Donohue era un experto en el tema, sobre el que más tarde, en 1952 y 1955, publicaría artículos importantes. Su contribución al modelo final del ADN fue crucial.

²⁷⁰ En cristalografía, la simetría (con respecto a transformaciones como la rotación y la reflexión) se utiliza para caracterizar los cristales. A partir de la información contenida en el informe, Crick pudo deducir que la forma cristalina del ADN se podía describir mediante lo que los cristalógrafos llaman grupo espacial «monoclínico C2». Esto, a su vez, implicaba que las cadenas eran antiparalelas. En una entrevista con Robert Olby, Crick admitió: «No creo que se me hubiera ocurrido hacerlas correr en direcciones opuestas» (Olby 1974, p. 404).

²⁷¹ Gann y Witkowski 2010.

²⁷² Carta de Wilkins a Crick, probablemente del 23 de marzo. Gann y Witkowski 2010.

²⁷³ Watson y Crick 1953a.

²⁷⁴ Watson y Crick 1953b.

²⁷⁵ Crick 1988, p. 66.

²⁷⁶ Wilkins, Stokes y Wilson 1953.

²⁷⁷ Franklin y Gosling 1953a. Publicaron otro artículo en julio del mismo año, en el que pormenorizaban la distinción entre las estructuras A y B del ADN; Franklin y Gosling 1953b.

²⁷⁸ Puede leerse una crítica de la obra Photograph 51, por ejemplo, en <http://theater.nytimes.com/2010/11/06/theater/06photograph.html>.

²⁷⁹ Carta de Linus Pauling a Peter Pauling de 27 de marzo de 1953. En <http://osulibrary.orst.edu/specialcollections/coll/pauling/dna/corr/sci9.001.33-lp-peterpauling-19530327.html>.

²⁸⁰ Pauling y Bragg 1953.

²⁸¹ Watson 2000.

²⁸² Véase, por ejemplo, Reich et al. 2011 y las interesantes discusiones en el blog del paleoantropólogo John Hawks en <http://johnhawks.net>.

²⁸³ La implicación de Gamow y sus esquemas de codificación están descritos en detalle, por ejemplo, en Judson 1996. Gamow también fundó el RNA Tie Club (el Club de la Corbata de ARN), una organización que, según Gamow, aspiraba a «resolver el acertijo de la estructura del ARN y comprender de qué modo construye las proteínas».

²⁸⁴ El acontecimiento se describe a fondo en Mitton 1005, pp. 127-129. El programa se anunció en la revista británica Radio Times el 28 de marzo de 1949.

²⁸⁵ Ferris 1993.

²⁸⁶ Dos excelentes biografías de Hoyle son las de Mitton 2005 y Gregory 2005. Hoyle 1994 es una fascinante autobiografía, lo mismo Hoyle 1986a, su autobiografía anterior, más corta. También se puede encontrar información a través del Sir Fred Hoyle Project de St. John's College de la Universidad de Cambridge, en línea en http://www.joh.cam.ac.uk/library/special_collections/hoyle/project/#collection.

²⁸⁷ Hoyle 1994, p. 42.

²⁸⁸ Hoyle escribió: «Descubrí que el Inland Revenue [la agencia tributaria británica] distinguía entre estudiantes y no estudiantes por el título de doctor»; Hoyle 1994, p. 127.

²⁸⁹ Hoyle 1994, p. 235. Hoyle añadió: «Sostener una opinión popular es barato y no cuesta nada en reputación».

²⁹⁰ Hoyle 1986b, p. 446.

²⁹¹ Hubo otros químicos que concibieron sus propias versiones de la tabla periódica. La lista incluye al mineralogista francés Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtois, John Newlands en Inglaterra y, en particular, Julius Lothar Meyer en Alemania, que aportaron tablas parecidas (siguiendo los pasos pioneros de Robert Bunsen). Fue Mendeléyev, sin embargo, quien consiguió introducir los sesenta y seis elementos conocidos en su tabla, y no solo predecir elementos que todavía no se habían descubierto, sino también sus densidades y pesos atómicos. Una lectura fascinante sobre la tabla periódica es Kean 2010.

²⁹² Se puede ver la hazaña en YouTube en <http://www.geek.com/geek-cetera/periodic-tablet-etched-on-a-single-hair-as-birthdaygift-20101230>. Véase también Science 334, n.º 7 (octubre de 2011), p. 24.

²⁹³ Para una breve biografía de Prout (1785-1850), véase Rosenfeld 2003.

²⁹⁴ Eddington 1920. Por aquel entonces todavía consideraba que también la aniquilación era una posible fuente de energía. Eddington discutió la fuente de la energía estelar en Eddington 1926.

²⁹⁵ Wesemael 2009 ofrece una buena descripción de las aportaciones de Perrin (1870-1942) y del físico norteamericano William Draper Harkins (1873-1951). Véase también Shaviv 2009, capítulo 4.

²⁹⁶ Eddington 1926, p. 301.

²⁹⁷ El famoso astrofísico Subrahmanyam Chandrasekhar escuchó esta historia de los labios de Eddington. Se describe en Berenstein 1973, p. 192.

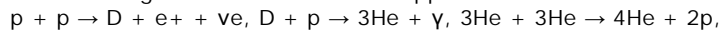
²⁹⁸ Eddington 1920. Citado también al completo en la edición de 1988 de *The Internal Constitution of the Stars* (Cambridge University Press, Cambridge), en el prefacio (de S. Chandrasekhar), p. x.

²⁹⁹ A distancias muy cortas en comparación con el tamaño del núcleo, la propia fuerza nuclear se torna repulsiva porque las partículas como los protones (fermiones) se resisten a la aglomeración. Este efecto cuántico se conoce como principio de exclusión de Pauli.

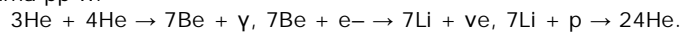
³⁰⁰ La probabilidad de traspasar la barrera creada por la fuerza de Coulomb aumenta exponencialmente al aumentar la energía de las partículas. Al mismo tiempo, la distribución de las partículas a una temperatura dada es tal que a altas energías el número de partículas decrece exponencialmente. El producto de estos dos factores da como resultado un pico (conocido como pico de Gamow) en el cual la reacción tiene una mayor probabilidad de producirse. Estas ideas se publicaron originalmente a finales de la década de 1920.

³⁰¹ Bethe 1939.

³⁰² Para los lectores con conocimientos básicos de física nuclear, las dos cadenas principales que contribuyen a la producción de energía en el Sol son la rama pp I:



y la rama pp II:



³⁰³ Bethe 1939, p. 446.

³⁰⁴ Alpher, Bethe y Gamow 1948. Gamow ya había presentado la idea sobre la nucleosíntesis en el big bang en Gamow 1942 y Gamow 1946.

³⁰⁵ En su libro *La creación del universo*, Gamow bromea: «Sin embargo, corría el rumor de que más tarde, cuando temporalmente la teoría α , β , y cayó en desgracia, el doctor Bethe consideró seriamente la posibilidad de cambiar su nombre por Zacharias» (Gamow 1961, p. 64).

³⁰⁶ Gamow 1961, p. 64.

³⁰⁷ Fermi examinó el problema junto al físico Anthony Turkevich, aunque nunca publicaron sus resultados. Una buena descripción del trabajo sobre el problema del agujero de masa se puede encontrar en Kragh 1996, pp. 128-132.

³⁰⁸ Hoyle 1946.

³⁰⁹ Hoyle pronunció su conferencia el 8 de noviembre de 1946. Margaret Burbidge era entonces Margaret Peachey; se casó con el astrónomo Geoffrey Burbidge en 1948. La cita es de una conferencia que Margaret Burbidge pronunció en St. John's College, en Cambridge, el 16 de abril de 2002. Hay una excelente descripción accesible de los trabajos de Hoyle sobre la nucleosíntesis en Mitton 2005, capítulo 8.

³¹⁰ El incidente se describe en Hoyle 1968b.

³¹¹ Öpik 1951.

³¹² Salpeter 1952. (También Bondi y Salpeter 1952). Salpeter realizaría después una distinguida carrera en astrología.

³¹³ Hoyle 1982, p. 3.

³¹⁴ Hoyle 1982, p. 3.

³¹⁵ Aunque se habían sugerido anteriormente resonancias en torno a 7,4 MeV, nunca se habían confirmado y, en cualquier caso, no se había sugerido ningún nivel resonante (antes de la predicción de Hoyle) por encima de 7,5 MeV.

³¹⁶ Tras muchos años, los participantes tenían recuerdos un tanto distintos de lo sucedido. Un buen resumen de las distintas versiones se puede encontrar en Kragh 2010.

³¹⁷ Entrevista con Charles Weiner, American Institute of Physics, en febrero de 1973. Citado en Kragh 2010.

³¹⁸ Hoyle 1982, p. 3.

³¹⁹ Descrito también en la conferencia de Nobel de Fowler, «Experimental and Theoretical Nuclear Astrophysics: the Quest for the Origin of the Elements», pronunciada el 8 de diciembre de 1983.

³²⁰ Dunbar, Pixley, Wenzel y Whaling 1953. El artículo y su significación se describen también en Spear 2002.

³²¹ Dado que la vida tal como la conocemos está basada en el carbono, es mucho lo que se ha discutido la significación antrópica del nivel resonante en el carbono. Esta cuestión cae fuera del ámbito de nuestra discusión. Debo precisar, sin embargo, que en 1989 yo y varios colaboradores demostramos que incluso si ese nivel de energía hubiese tenido un valor ligeramente distinto, las estrellas todavía habrían producido carbono (Livio et al. 1989). Esta conclusión fue confirmada más tarde por las investigaciones detalladas de Heinz Oberhummer y colaboradores (Schlattl et al. 2004). Para una revisión detallada, véase Kragh 2010.

³²² Hoyle et al. 1953.

³²³ Hoyle 1986b, p. 449.

³²⁴ Gamow 1970, p. 127. Gamow en realidad quería expresar sus objeciones a la teoría del estado estacionario (discutida en el capítulo 9) propuesta por Hoyle, Bondi y Gold, pero acabó de todos modos reconociendo la contribución de Hoyle.

³²⁵ Nota de prensa del premio Crafoord.

³²⁶ Hoyle 1954.

- ³²⁷ Burbidge, Burbidge, Fowler y Hoyle 1957. Chown 2001 ofrece un relato entretenido y accesible de la historia de la teoría de la nucleosíntesis. Tyson y Goldsmith 2004 ofrecen un viaje claro, multidisciplinario y lleno de humor de la evolución cósmica, de la cosmología a la biología.
- ³²⁸ Hoyle 1958, p. 279; Fowler 1958, p. 269.
- ³²⁹ Hoyle 1958, p. 431.
- ³³⁰ Una discusión en línea del asunto de que Hoyle no ganase el premio Nobel se puede ver, por ejemplo, en <http://thelonggoodread.com/2010/10/08/fred-hoyle-the-scientist-whose-rudeness-cost-him-a-nobel-prize>.
- ³³¹ Burbidge 2008. El astrofísico nuclear Donald Clayton también explicó la enorme importancia del artículo de Hoyle de 1954; Clayton 2007.
- ³³² Citado en Burbidge 2003, p. 218.
- ³³³ Bien descritas en una entrevista con Tommy Gold por el historiador de la ciencia Spencer Weart. La entrevista tuvo lugar el 1 de abril de 1978, para el American Institute of Physics.
- ³³⁴ Descrito en una fascinante entrevista con Fred Hoyle, en Lightman y Brawer 1990, p. 55.
- ³³⁵ Milne 1933.
- ³³⁶ Hoyle 1990. En su excelente relato de la historia de la teoría del estado estacionario, Kragh 1996 plantea dudas sobre la autenticidad del suceso de la película. Sin embargo, poco después de que el New York Times informara (el 24 de mayo de 1952) sobre una conferencia pronunciada por el Real Astrónomo, sir Harold Spencer Jones, Hoyle le escribió una carta en la que específicamente mencionaba la historia de la película. El hecho de que esta carta se escribiese en fecha tan temprana, en 1952, le da más credibilidad.
- ³³⁷ Weart 1978.
- ³³⁸ Alusión a la película de Sofia Coppola *Lost in translation*. (N. del T).
- ³³⁹ Hubble 1929a.
- ³⁴⁰ Friedmann 1922.
- ³⁴¹ Unos pocos de los artículos sobre el crédito por el descubrimiento de la expansión cósmica son Way y Nussbaumer 2011, Nussbaumer y Bieri 2011, Van den Bergh 2011, y Block 2011.
- ³⁴² Descrito, por ejemplo, en Van den Bergh 1997.
- ³⁴³ Eddington 1923, p. 162.
- ³⁴⁴ Lemaître 1927.
- ³⁴⁵ Hubble 1926.
- ³⁴⁶ Hubble 1929a.
- ³⁴⁷ Puede leerse en Livio 2011 un breve resumen de los eventos. Hay descripciones más detalladas en Nussbaumer y Bieri 2009, Kragh y Smith 2003, y Trimble 2012.
- ³⁴⁸ Lemaître 1931a.
- ³⁴⁹ Van den Bergh 2011.
- ³⁵⁰ Block 2011.
- ³⁵¹ Quiero agradecer a los Archivos Georges Lemaître en Lovaina, Bélgica, y a Mme. Liliane Moens, que me proporcionaran una copia.
- ³⁵² Block creyó que el «§1-n» de la carta debía leerse como «§1-72», por la forma en que está escrito el símbolo «n». También interpretó que el texto decía que Lemaître tenía libertad para traducir solamente los primeros setenta y dos párrafos de su artículo. Concluyó además que el párrafo setenta y tres era precisamente la ecuación de Lemaître que determinaba el valor de la constante de Hubble. Nada de esto era convincente. (Véase Livio 2011 para una discusión).
- ³⁵³ RAS 1931.
- ³⁵⁴ RAS 1931.
- ³⁵⁵ Lemaître 1931b.
- ³⁵⁶ Bondi 1990, p. 191.
- ³⁵⁷ Bondi y Gold 1948.
- ³⁵⁸ Hoyle 1948a.
- ³⁵⁹ Hoyle 1948a.
- ³⁶⁰ Hoyle 1948a.
- ³⁶¹ Popper 2006, p. 18.
- ³⁶² Hoyle 1948b, p. 216.
- ³⁶³ Greaves 1948, p. 216.
- ³⁶⁴ Born 1948, p. 217.
- ³⁶⁵ Hoyle 1994, p. 270.
- ³⁶⁶ El artículo del New York Times apareció el 24 de mayo de 1952; el del Christian Science Monitor, el 7 de junio de 1952.
- ³⁶⁷ Descrito en Proceedings of Meeting of the Royal Astronomical Society 886, pp. 104-106.
- ³⁶⁸ Gold 1955.
- ³⁶⁹ Bondi 1955.
- ³⁷⁰ Hoyle 1994, p. 410.
- ³⁷¹ Para un excelente texto de divulgación sobre el descubrimiento de los cuásares, el fondo de microondas y su significación, véase Rees 1997.
- ³⁷² Hoyle 1990.
- ³⁷³ Hoyle, Burbidge y Narlikar 2000. Livio 2000 es una reseña del libro.

³⁷⁴ Entrevista con el autor el 5 de marzo de 2012.

³⁷⁵ Entrevista con el autor de 1 de julio de 2011.

³⁷⁶ Jowett fue nombrado fellow de Balliol College en Oxford con veintiún años de edad. La sátira en cuestión es:

*First came I; my name is Jowett.
There's no knowledge, but I know it.
I am the Master of this college,
What I don't know isn't knowledge.*

(Primero vine yo; mi nombre es Jowett. / No hay conocimiento, pero yo lo sé. / Soy el maestro de este college. / Lo que yo no sé no es conocimiento).

³⁷⁷ Entrevista con el autor el 19 de agosto de 2011. Véase también Faulkner 2003.

³⁷⁸ Entrevista con el autor el 19 de septiembre de 2011. Véase también Rees 2001.

³⁷⁹ Hoyle 1994, p. 328.

³⁸⁰ Citado, por ejemplo, en Boorstin 1983, p. 345.

³⁸¹ El argumento original de Hoyle era contra la abiogénesis, la teoría del origen de la vida en la Tierra, no contra la teoría darwiniana de la evolución. Dawkins amplía la discusión sobre la falacia de Hoyle en Dawkins 2006.

³⁸² Kathryn Schulz ofrece una fascinante discusión de los sentimientos suscitados por el hecho de equivocarse en Schulz 2010.

³⁸³ Da una hermosa descripción del modelo en su libro de divulgación, Guth 1997.

³⁸⁴ La relación entre el universo estado estacionario y el universo inflacionario se discute en Barrow 2005.

³⁸⁵ En particular, Hoyle y Tayler 1964, y Wagoner, Fowler y Hoyle 1967.

³⁸⁶ Einstein 1917.

³⁸⁷ Los resultados definitivos se publicaron en Hubble 1929b.

³⁸⁸ Einstein 1917, p. 188 de la traducción inglesa.

³⁸⁹ Para los interesados en las matemáticas, la ecuación original era: $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$, donde G es la constante gravitatoria, $T_{\mu\nu}$, es el tensor de energía-impulso, y $G_{\mu\nu}$ es un tensor métrico que representa la geometría del espacio-tiempo. La ecuación modificada era: $G_{\mu\nu} - 8\pi G \rho\Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$, donde $\rho\Lambda$ puede interpretarse como una densidad de energía asociada a la constante cosmológica.

³⁹⁰ Eddington 1930.

³⁹¹ Einstein se basaba en esto en lo que se conoce como principio de Mach, por el físico y filósofo austriaco Ernst Mach, que sugirió que en un universo vacío no se puede sentir en absoluto el movimiento y la aceleración. Hay una excelente discusión de la interpretación moderna del principio de Mach en Greene 2004.

³⁹² Hay muchos libros de divulgación excelentes sobre la relatividad general y especial. Dos que me parecen estimulantes son Kaku 2004 y Galison 2003. La lectura de Einstein 2005 siempre es gratificante. En la colección de ingeniosos ensayos de Tyson 2007, aborda de manera muy interesante varios temas relacionados.

³⁹³ Chou, Hume, Rosenband y Wineland 2010.

³⁹⁴ El propio Einstein explicó los principios en Einstein 1955. Hawking 2007 presenta una colección de los artículos de Einstein. En la biografía científica de Einstein, Pais 1982 explica los principios con gran elegancia. Greene 2004 pone la teoría en el contexto de los desarrollos modernos con un lenguaje accesible.

³⁹⁵ La Conferencia Kioto fue pronunciada el 14 de diciembre de 1922. Fue traducida al inglés por Y. A. Ono a partir de notas tomadas por Yon Ishiwara (Physics Today, agosto de 1932).

³⁹⁶ Los resultados se publicaron en Dyson, Eddington y Davidson 1920.

³⁹⁷ Las nuevas generaciones de relojes mejoran continuamente la precisión; por ejemplo, Tino et al. 2007.

³⁹⁸ Earman 2001 ofrece una excelente (aunque técnica) y detallada discusión de la introducción por Einstein de la constante cosmológica, así como los primeros años de su historia. Hay una exposición clara también en North 1965 (véase también Norton 2000).

³⁹⁹ De Sitter 1917.

⁴⁰⁰ Carta de Einstein a Weyl de 23 de mayo de 1923.

⁴⁰¹ Einstein 1931.

⁴⁰² Einstein y De Sitter 1932.

⁴⁰³ Gamow 1956.

⁴⁰⁴ Gamow 1970, p. 44.

⁴⁰⁵ Gamow 1970, p. 149.

⁴⁰⁶ Segrè 2011, p. 155.

⁴⁰⁷ Fölsing 1997.

⁴⁰⁸ El episodio aparece relatado en Brunauer 1986.

⁴⁰⁹ Carta escrita el 24 de septiembre de 1946. Documento 11-331 de Albert Einstein Archives.

⁴¹⁰ Carta escrita el 9 de julio de 1948. Documentos 11-333 y 11-334 de Albert Einstein Archives.

⁴¹¹ Por ejemplo, el 4 de agosto de 1948. Documento 11-335 de Albert Einstein Archives.

⁴¹² Documento 70-960 de Albert Einstein Archives.

⁴¹³ El Departamento de Física de la Universidad de Princeton celebró un simposio sobre la relatividad para festejar el setenta aniversario de Einstein. Gamow fue uno de los muchos invitados. (Una carta del ayudante del presidente de Princeton Paul Busse, de 15 de marzo de 1949, le informa de las disposiciones para su viaje). Sin embargo, el nombre de Gamow no aparece en la lista de personas que aceptaron la invitación, de 17 de marzo de 1949.

⁴¹⁴ Einstein 1955, p. 127.

⁴¹⁵ Einstein 1955, p. 127.

⁴¹⁶ Pauli 1958, p. 220.

⁴¹⁷ Einstein 1934, p. 167.

⁴¹⁸ Carta escrita el 26 de septiembre de 1947. Documento 15-085.1 de Albert Einstein Archives.

⁴¹⁹ En su carta a Einstein de 30 de julio de 1947, Lemaître dice hacer «algún esfuerzo para modificar» la actitud de Einstein hacia la constante cosmológica. Documento 15-084.1 de Albert Einstein Archives.

⁴²⁰ Carta de Einstein a Lemaître de 26 de septiembre de 1947. Documento 15-085.1 de Albert Einstein Archives.

⁴²¹ Laloë y Pecker 1990 tampoco pensaron que Einstein hubiera utilizado esa expresión, pero las pruebas que presentaron eran mucho más débiles.

⁴²² Esta comparación fue utilizada también por Weinberg 2005.

⁴²³ Leahy 2001.

⁴²⁴ De las muchas biografías de Einstein, quiero destacar Isaacson 2007, Fölsing 1997, y un libro que presenta estupendamente otros aspectos de su personalidad: Overbye 2000.

⁴²⁵ Carta de 14 de septiembre de 1931. Documento 23-031 de Albert Einstein Archives.

⁴²⁶ Las ideas de Lemaître sobre la formación de galaxias aparecen, por ejemplo, en Lemaître 1931, 1934.

⁴²⁷ Brecher y Silk 1969.

⁴²⁸ Eddington 1952, p. 24.

⁴²⁹ Eddington 1952, p. 25.

⁴³⁰ Hay una descripción excelente en Guth 1997.

⁴³¹ McCrea 1971.

⁴³² Calder y Lahav 2008 discuten de qué modo la obra de Newton alude al menos a algunos aspectos de los efectos de la «energía oscura».

⁴³³ Norton 1999 discute este problema a fondo.

⁴³⁴ En particular, Von Seeliger 1895 y Neumann 1896. Einstein se podría haber inspirado en parte en estos trabajos para introducir la constante cosmológica.

⁴³⁵ Este modelo fue sugerido por Petrosian, Salpeter y Szekeres 1967. Sin embargo, varios años más tarde, Petrosian demostró que el modelo también predecía una reducción del brillo de los cuásares más lejanos, en contra de las observaciones.

⁴³⁶ Una vez más, para los amantes de las matemáticas, la nueva ecuación era: $G_{\mu\nu} - 8\pi G \rho \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$, donde $\rho \Lambda$ es la densidad de energía asociada con la constante cosmológica.

⁴³⁷ La ecuación es ahora: $G_{\mu\nu} = 8\pi G (T_{\mu\nu} + \rho \Lambda g_{\mu\nu})$.

⁴³⁸ Para unas excelentes explicaciones accesibles de la constante cosmológica interpretada como la energía del vacío, véase Krauss y Turner 2004, Randall 2011 y Greene 2011. Davies 2011 es un artículo breve y también accesible. Las teorías del tiempo y su relación con la expansión cósmica están explicadas de una manera fascinante en Carrol 2010 y Frank 2011.

⁴³⁹ Einstein 1919.

⁴⁴⁰ Einstein 1927.

⁴⁴¹ Enz y Thellung 1960.

⁴⁴² Lemaître 1934.

⁴⁴³ Zeldovich 1967.

⁴⁴⁴ Hay excelentes discusiones técnicas sobre los problemas de la constante cosmológica en, por ejemplo, Weinberg 1989, Peebles y Ratra 2003, y Carroll 2001 (con actualizaciones regulares).

⁴⁴⁵ Los resultados se publicaron en Riess et al. 1998 y Perlmutter et al. 1999. Overbye 1998 escribió una maravillosa descripción del descubrimiento.

⁴⁴⁶ Los textos de divulgación científica de Panek 2011, Kirshner 2002, L'Abbate 2000 y Goldsmith 2000 proporcionan vívidas descripciones del descubrimiento.

⁴⁴⁷ Se cree que son el resultado de enanas blancas que aumentan su masa por acreción hasta el máximo permitido para una estrella de este tipo (la masa de Chandrasekhar). En ese momento comienza la ignición de carbono en su núcleo. La enana blanca queda destruida por la explosión.

⁴⁴⁸ La página web del Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) proporciona información actualizada en <http://map.gsfc.nasa.gov>.

⁴⁴⁹ Kane 2000 es un bello texto de divulgación que describe los conceptos implicados en la supersimetría. Dine 2007 es un excelente texto técnico.

⁴⁵⁰ En esta presentación sigo de cerca la discusión presentada en Livio y Rees 2005. Un libro clásico sobre el razonamiento antrópico es Barrow y Tipler 1986. Vilenkin 2006, Susskind 2006 y Greene 2011 ofrecen discusiones amplias y accesibles sobre el concepto antrópico y el multiverso.

⁴⁵¹ Weinberg 1987.

⁴⁵² Carter 1974.

⁴⁵³ Mangel y Samaniego 1984 es un análisis académico del trabajo de Wald sobre la supervivencia de aviones. Wolfowitz 1952 hace una crónica de toda la obra de Wald.

⁴⁵⁴ El artículo de Wikipedia (en inglés) sobre el sesgo de Malmquist es bastante detallado y no excesivamente técnico: http://en.wikipedia.org/wiki/Malmquist_bias.

⁴⁵⁵ El modelo de Kepler se describe con cierto detalle en Livio 2002, p. 142.

⁴⁵⁶ Bien explicado en Vilenkin 2006.

⁴⁵⁷ Este «paisaje» que contendría un número ingente de universos potenciales es el asunto que trata Susskind 2006.

⁴⁵⁸ Einstein 1934. La Conferencia Herbert Spencer fue dictada el 10 de junio de 1933.

⁴⁵⁹ Infeld 1949, p. 477.

⁴⁶⁰ Lemaitre 1949, p. 443.

⁴⁶¹ Einstein 1949.

⁴⁶² Weinberg 2005 presenta algunos de los errores de Einstein. Ohanian 2008 ofrece una excelente recopilación y revisión de todos los errores de Einstein.

⁴⁶³ Einstein escribió sus últimas notas autobiográficas en marzo de 1955, y las terminó con comentarios sobre la mecánica cuántica. En Seelig 1956.

⁴⁶⁴ Russell 1951.

⁴⁶⁵ Kahneman 2011 ofrece un relato amplio y accesible de las ideas y descubrimientos sobre la toma de decisiones.

⁴⁶⁶ Darwin 1998 [1874], p. 642.