



Sobre el tiempo

*Paul
Davies*

La revolución inacabada de Einstein

Drakontos



crítica



PAUL Davies es profesor de ciencias físicas en la Universidad de Adelaide, Australia. Sus investigaciones han abarcado la mayoría de cuestiones fundamentales de la física y la cosmología, y ha obtenido el reconocimiento internacional con la publicación de sus libros anteriores, en especial: *Proyecto cósmico* (1989), *La mente de Dios* (1993), *Dios y la nueva física* (1994), *El universo desbozado: del Big Bang a la catástrofe final* (1994) y *Otros mundos* (1994³).



Sobre el tiempo



Drakontos

Directores:

Josep Fontana y Gonzalo Pontón

Sobre el tiempo

La revolución inacabada de Einstein

Paul Davies

Traducción castellana de
Javier García Sanz

Crítica

Grijalbo Mondadori

Barcelona

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

Título original:
ABOUT TIME
Einstein's Unfinished Revolution
Simon & Schuster, Nueva York

Diseño de la colección y cubierta: ENRIC SATUÉ
© 1995: Orion Productions
© 1996 de la traducción castellana para España y América:
CRÍTICA (Grijalbo Mondadori, S.A.), Aragón, 385, 08013 Barcelona
ISBN: 84-7423-798-X
Depósito legal: B. 38.988-1996
Impreso en España
1996.—HUROPE, S.L., Recaredo, 2, 08005 Barcelona

*Dedico este libro a mi paciente familia.
El tiempo que dediqué a escribirlo les pertenecía.*

Prefacio

Este es el segundo libro que escribo sobre el tema del tiempo. El primero, publicado en 1974, estaba dirigido a físicos profesionales. Siempre quise escribir otro libro sobre este tema para el público general, pero, por una u otra razón, nunca encontré tiempo. Finalmente, lo he conseguido.

La fascinación por el enigma del tiempo es tan vieja como el pensamiento humano. Los más antiguos registros escritos revelan turbación y ansiedad acerca de la naturaleza del tiempo. Buena parte de la filosofía griega estuvo dedicada a dar sentido al concepto de eternidad frente al de transitoriedad. El tema del tiempo es fundamental para todas las religiones del mundo, y durante siglos ha sido fuente de muchas controversias doctrinales.

Aunque el tiempo entró en la ciencia como una magnitud medible con la obra de Galileo y Newton, sólo en nuestro siglo se ha convertido en un tema por derecho propio. Albert Einstein, más que cualquiera otra persona, es responsable de este avance. La historia del tiempo en el siglo xx es predominantemente la historia del tiempo de Einstein. Aunque he esbozado algunos detalles biográficos donde resultaba apropiado, este libro no es una biografía de Einstein porque ya han aparecido varias desde el centenario de su nacimiento en 1979. Ni tampoco me he propuesto escribir un estudio sistemático y global sobre el tiempo. En lugar de ello, he hecho una selección de temas que personalmente encuentro especialmente sugerentes o misteriosos, y los he utilizado para ilustrar los principios generales del tiempo tal como hemos llegado a comprenderlos.

Aunque la teoría de la relatividad de Einstein ya tiene casi un siglo, sus extrañas predicciones aún no son ampliamente conocidas. Invariablemente la gente las aprende con placer, temor y perplejidad. Gran parte de este libro está dedicada a tratar las consecuencias más directas de la teoría; sin embargo, la conclusión general a la que llego es que estamos muy lejos de tener una buena noción del concepto de tiempo. La obra de Einstein desencadenó una revolución en nuestra comprensión del tema, pero sus consecuencias todavía no han sido completamente desarrolladas. Gran parte de la teoría de la relatividad sigue sien-

do un territorio inexplorado, y temas cruciales, como la posibilidad del viaje en el tiempo, sólo han recibido atención en fechas muy recientes. También existen problemas importantes que afectan a las limitaciones profundamente asentadas de la teoría; las discrepancias respecto a la edad del universo y los obstáculos para unificar el tiempo de Einstein con la física cuántica son dos de las dificultades más persistentes. Más preocupante quizá es que el tiempo de Einstein está seriamente reñido con el tiempo tal como lo experimentamos los seres humanos. Todo esto me lleva a creer que debemos asumir las ideas de Einstein, pero que hay que ir más allá. Las explicaciones ortodoxas del tiempo frecuentemente nos dejan varados, rodeados de un maremágnum de enigmas y paradojas. En mi opinión, el tiempo de Einstein resulta inadecuado para explicar por completo el universo físico y nuestra percepción del mismo.

El estudio científico del tiempo se ha mostrado perturbador, desorientador y sorprendente. También aturde. He escrito este libro para lectores sin un conocimiento matemático o científico especializado. La jerga técnica se mantiene en un nivel mínimo, y se han evitado los valores numéricos excepto donde resulta absolutamente necesario. Sin embargo, no puedo negar que el tema es complejo y plantea un desafío intelectual. Para facilitar un poco las cosas he recurrido al artificio de introducir un dócil escéptico imaginario, quien de cuando en cuando puede formular las propias objeciones o preguntas del lector. En cualquier caso, es muy probable que después de leer este libro se sienta usted más confuso incluso de lo que estaba antes a propósito del tiempo. No hay problema; yo mismo quedé más confuso después de escribirlo.

Muchas personas me han ayudado a formar mis ideas sobre el tiempo en el curso de los años. Me he beneficiado especialmente de discusiones y debates con John Barrow, George Efstathiou, Murray Gell-Mann, Ian Moss, James Hartle, Stephen Hawking, Don Page, Roger Penrose, Frank Tipler, William Unruh y John Wheeler. Otras personas cuyo trabajo ha tenido influencia sobre mí se mencionan en el texto. También debo agradecer a mis colegas y amigos inmediatos, que me han proporcionado muchas ideas e intuiciones sobre el tema. Entre ellos se incluyen a Diane Addie, David Blair, Bruce Dawson, Roger Clay, Philip Davies, Susan Davies, Michael Draper, Denise Gamble, Murray Hamilton, Angus Hurst, Andrew Matacz, James McCarthy, Jesper Munch, Graham Nerlich, Stephen Poletti, Peter Szekeres, Jason Twamley y David Wiltshire. En último lugar, pero en absoluto menos importante, debo dar las gracias a Anne-Marie Grisogono, cuya lectura crítica del manuscrito y sus estimulantes discusiones del tema se han revelado de valor inestimable.

Adelaida, Australia del Sur

La otra noche vi la Eternidad,
como un gran anillo de luz pura e incesante,
toda tranquila, mientras brillaba,
y bajo ella, el Tiempo con sus horas, días, años,
impulsado por las esferas
se movía como una vasta sombra; donde el mundo
y todo su cortejo eran arrojados...

HENRY VAUGHAN, «El Mundo»

●

Prólogo

Las vidas de los hombres grandes nos recuerdan,
que podemos hacer sublimes nuestras vidas,
y, al partir, dejar tras nosotros
huellas en la arena del tiempo.

H. W. LONGFELLOW

Todo el mundo ama a los héroes. Desde la mitología griega hasta el mundo moderno de las estrellas del pop y los ases del deporte, los logros espectaculares de unos pocos individuos se han mostrado mucho más fascinantes que los de la comunidad como un todo. La ciencia no es una excepción. Aristóteles, Galileo Galilei, Isaac Newton, Charles Darwin... estos nombres sobresalen entre la multitud como los que han desencadenado e impulsado las revoluciones científicas. En esta lista de genios científicos, un nombre simboliza mejor que ningún otro tanto la chispa intelectual como la promoción de un cambio espectacular en nuestra visión del mundo: Albert Einstein. Ya una leyenda en vida, Einstein resume todo lo que la gente asocia a la excelencia científica. Tenía un aspecto excéntrico y desmelenado, hablaba inglés con acento alemán, sus teorías se sumían en matemáticas arcanas, y aparentemente produjo sus ideas más iconoclastas casi en solitario, extrayendo nuevos y extraños conceptos de algún reino platónico abstracto y descubriendo que la naturaleza se amolda a ellos de buen grado.

Como sucede con todas las leyendas, la de Einstein el científico contiene una parte de verdad. Él era un genio, revolucionó la ciencia, y gran parte de su obra (aunque no toda ni mucho menos) fue básicamente el resultado de sus propios esfuerzos. También se obstinó y se equivocó lamentablemente en algunas de sus ideas científicas. Einstein el hombre —marido, padre, filósofo, músico y hombre público— es un individuo mucho más complejo. La idolatría que ha rodeado su enigmática figura durante décadas se está difuminando len-

tamente, casi un siglo después de su nacimiento, con la aparición de algunas biografías «con pelos y señales» que le colocan a una luz poco favorable como ser humano.

Por encima de todo, no obstante, Einstein fue un hombre de su tiempo. Con el cambio de siglo, la física había llegado a una curiosa encrucijada. Era ya una disciplina madura, con procedimientos bien ensayados y comprobados y unos logros impresionantes. En las mentes de algunos físicos entusiastas la disciplina global estaba acercándose a un estado de compleción. Era posible creer que las leyes del movimiento y de la gravitación de Newton, la teoría del electromagnetismo de Maxwell, las leyes de la termodinámica y un puñado de principios adicionales podrían dar cuenta apropiadamente de todos los fenómenos físicos. A este respecto, la física de finales del siglo xix se parecía a la física de finales del siglo xx. Una teoría definitiva y global —una Teoría de Todo— parecía estar al alcance. Por desgracia, entonces como ahora, unos pocos misterios obstinados oscurecían un, por lo demás, brillante registro de éxitos. En el frente experimental, el descubrimiento de la radiactividad apuntaba a un mundo energético dentro del átomo que estaba más allá del alcance de la gravitación o el electromagnetismo. La enorme edad de la Tierra, deducida a partir de los registros fósiles, no cuadraba con ningún proceso conocido que pudiera mantener al Sol brillante. Y las líneas perfectamente definidas en el espectro de los gases desafiaban una explicación en términos de cualquier modelo realista del átomo.

Lo que es más serio, las inconsistencias en las propias teorías básicas permanecían como arrecifes ocultos aguardando para hundir el orgulloso barco de la física «clásica». No puede construirse una teoría completa del mundo a partir de componentes que no encajan limpiamente. En relación con esto, dos hechos extraños resultaban especialmente molestos, y finalmente se introdujeron en la agenda de los físicos.

El primer problema concernía a la fusión de la teoría de la radiación electromagnética y la termodinámica. Cada una de estas disciplinas por separado tenía un éxito espectacular. Las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell explicaban de forma elegante el entretrejado de los campos eléctrico y magnético, y proporcionaban una base teórica para dispositivos prácticos tales como motores y dinamos eléctricos. También condujo a la predicción correcta de las ondas de radio, y dio cuenta convincentemente de las propiedades de la luz en términos de ondas electromagnéticas. Las leyes de la termodinámica resultaban igualmente impresionantes, al explicar no sólo el funcionamiento de las máquinas térmicas, máquinas de vapor y refrigeradores, sino también las propiedades de los gases y las reacciones químicas. Pese a ello, en la unión de estos dos grandes esquemas teóricos surgió una paradoja devastadora. Según la imagen vigente, el espacio estaba lleno de una sustancia invisible llamada éter luminífero. Los campos electromagnéticos se consideraban tensiones o distorsiones en este medio. El problema consistía en que el éter hipotético parecía tener

una capacidad calorífica ilimitada, un apetito insaciable de calor. Aparentemente, nada podía impedir que la materia ordinaria cediese progresivamente todo su calor al éter en forma de vibraciones electromagnéticas de frecuencia arbitrariamente alta. Esta inestabilidad aparentemente inevitable implicaba que los cuerpos materiales deberían ser incapaces de retener calor, o de permanecer en equilibrio térmico con su entorno, en flagrante contradicción con el sentido común y la evidencia experimental.

El segundo enigma también tenía que ver con el electromagnetismo, en este caso con la descripción de las cargas eléctricas en movimiento. Había una discordancia matemática sutil pero profunda entre la teoría del electromagnetismo de Maxwell y las leyes del movimiento de Newton. Se consideraba que las leyes de Newton eran el principio fundador de la ciencia física, y durante mucho tiempo habían servido como modelo para cualquier descripción científica del cambio. Formuladas en el siglo xvii, hacia finales del siglo xix habían superado brillantemente la prueba del tiempo. Y, pese a todo, entraban en conflicto con la teoría electromagnética no sólo en detalles técnicos, sino en la forma más básica, en el modo en que incorporaban el concepto de movimiento.

Ambas inconsistencias, como explicaré en los próximos capítulos, estaban relacionadas con la naturaleza del tiempo. La primera —el conflicto entre la teoría electromagnética y la termodinámica— nació de un intento por comprender la denominada flecha del tiempo, el hecho de que la mayoría de los procesos físicos tienen una direccionalidad intrínseca, que se manifiesta especialmente en la dirección del flujo de calor (de lo caliente a lo frío). La segunda implicaba un choque entre el concepto newtoniano de un tiempo absoluto y la relatividad del movimiento aplicada a partículas eléctricamente cargadas.

Antes de que acabara la primera década del siglo xx, estos dos problemas teóricos habían hecho saltar simplemente la física tradicional, o clásica, y habían puesto en marcha no ya una sino dos revoluciones científicas importantes. Como consecuencia del primer enigma llegó la mecánica cuántica, una teoría de la materia completamente nueva y extraordinariamente extraña —tan extraña que incluso hoy muchos la encuentran difícil de creer: Einstein se negó a aceptar sus extrañas implicaciones durante toda su vida. El segundo enigma dio lugar a la teoría de la relatividad. Einstein jugó un papel clave en ambas revoluciones, pero está asociado más estrechamente a la teoría de la relatividad.

La palabra «relatividad» se refiere aquí al hecho elemental de que la apariencia del mundo que nos rodea depende de nuestro estado de movimiento: es «relativa». Esto es obvio en algunos aspectos simples incluso en la vida diaria. Si yo estoy de pie en el andén de la estación, el tren expreso rugiente parece estar moviéndose muy rápidamente, mientras que si yo estoy a bordo del tren es la estación la que parece estar huyendo a toda velocidad. Esta relatividad del movimiento obvia e incuestionable era conocida para Galileo y fue incorporada en la mecánica de Newton en el siglo xvii. Lo que Einstein descubrió

posteriormente es que no sólo el movimiento es relativo, sino que *también lo son el espacio y el tiempo*. Esta era una afirmación mucho más perturbadora y contraintuitiva. Como veremos, el tiempo de Einstein desafía de la forma más sorprendente nuestras nociones de sentido común acerca de la realidad.

Para los científicos del siglo XIX era posible creer que la física estaría completa si pudiera dar cuenta de las fuerzas que actúan entre partículas de materia y la forma en que dichas partículas se mueven bajo la acción de dichas fuerzas. A esto se reducía todo: fuerzas y movimiento. Las propias partículas, y la dimensión espacio-temporal en el contexto que se movían, eran simplemente supuestos. Estaban dados por Dios. Si la naturaleza puede compararse a un gran drama en el que los contenidos del universo —los diversos átomos de materia— eran los actores, y el espacio y el tiempo el escenario, entonces los científicos consideraban que su trabajo se limitaba exclusivamente a desarrollar la intriga.

Hoy, los físicos no considerarían completa la tarea hasta que hubieran dado una buena explicación del conjunto: actores, escenario y obra. No aceptarían nada que no fuera una completa explicación de la existencia y propiedades de todas las partículas de materia que constituyen el mundo, la naturaleza del espacio y el tiempo, y el repertorio global de las actividades en que dichas entidades pueden comprometerse. La mayor contribución de Einstein fue el demostrar que la separación entre actores y escenario era una separación artificial. Los propios espacio y tiempo son *parte del reparto*; desempeñan un papel completo y activo en el gran drama de la naturaleza. El espacio y el tiempo, como resulta ser el caso, no están simplemente «ahí» como un telón de fondo inmutable de la naturaleza; son cosas *físicas*, mudables y maleables e, igual que la materia, están sometidas a la ley física.

Fue necesario alguien de la juventud, inexperiencia, genio y atrevimiento de Einstein para cuestionar no sólo la corrección técnica sino la propia fundamentación conceptual de la física de Newton. Después de haber sido puestos a prueba con éxito durante dos siglos, los conceptos newtonianos de espacio, tiempo y movimiento no debían desecharse a la ligera. Es una medida de la grandeza de Einstein el hecho de que su asalto frontal al edificio de la física newtoniana se haya convertido en la nueva ortodoxia en el plazo de una sola generación.

No obstante, a pesar de dedicar su vida a la tarea, Einstein no tuvo éxito en conseguir una teoría física completa. Liberó al tiempo y al espacio de las restricciones innecesariamente severas del pensamiento newtoniano, pero fue incapaz de encajar estos conceptos liberados de espacio y tiempo flexible en una teoría correctamente unificada. La búsqueda de una teoría de campos unificada —o una Teoría de Todo, como se conoce hoy— está aún en el primer lugar de la agenda científica, y el objetivo continúa siendo evasivo. Incluso dentro del propio tema del tiempo, Einstein dejó las cosas en un estado curiosamente inacabado. Desde el alba de la historia, la naturaleza del tiempo se ha mostra-

do profundamente enigmática y paradójica a los seres humanos. De alguna forma es el aspecto más básico de nuestra experiencia del mundo. Después de todo, el mismo concepto de individualidad descansa en la preservación de la identidad personal a través del tiempo. Cuando Newton introdujo el tiempo en el dominio de la investigación científica mostró un método fructífero de analizar procesos físicos, pero nos enseñó poco sobre *el propio tiempo*.

La científica y aséptica imagen del tiempo se encoge de hombros ante la sabiduría acumulada de las culturas tradicionales en las que el tiempo se conoce intuitivamente, la ciclicidad y el ritmo dominan sobre la medida, y tiempo y eternidad son conceptos complementarios. El reloj, un emblema de nuestra cultura científica, es también el símbolo de una camisa de fuerza intelectual. Antes de Galileo y Newton, el tiempo era algo orgánico y subjetivo, no un parámetro para ser medido con precisión geométrica. El tiempo era parte y parcela de la naturaleza. Newton arrancó el tiempo de la naturaleza y le dio una existencia independiente y abstracta, despojándolo de sus connotaciones tradicionales. Fue incluido en la descripción newtoniana del mundo simplemente como un modo de seguir matemáticamente la pista del movimiento; en realidad no *hacía* nada. Einstein restableció al tiempo en su lugar correcto en el corazón de la naturaleza, como parte integral del mundo físico. De hecho, el «espacio-tiempo» de Einstein es en muchos aspectos sólo un campo más, al lado de los campos electromagnéticos y de la fuerza nuclear. Fue un primer paso trascendental hacia el redescubrimiento del tiempo.

Por importante que el tiempo de Einstein resultara ser, aún no resolvía «el enigma del tiempo». La gente pregunta a menudo: ¿Qué es el tiempo? Hace muchos siglos, san Agustín de Hipona, uno de los pensadores más influyentes del mundo acerca de la naturaleza del tiempo, dio una respuesta perspicaz, aunque enigmática, a esta pregunta: «Si nadie me pregunta, yo lo sé; pero si cualquier Persona me pidiera que se lo diga, no puedo hacerlo».¹ El tiempo que interviene en la teoría física, incluso el tiempo de Einstein, mantiene sólo una vaga semejanza con el tiempo subjetivo de la experiencia personal, el tiempo que conocemos pero no podemos explicar. Para empezar, el tiempo de Einstein no tiene flecha: es ciego a la diferencia entre pasado y futuro. Ciertamente no *fluye* como el tiempo de Shakespeare o el de James Joyce, o para el caso el de Newton. Es fácil concluir que sigue faltando algo vital, alguna cualidad extra para el tiempo que se escapa de las ecuaciones, o que hay más de un *tipo* de tiempo. La revolución empezada por Einstein permanece frustrantemente inacabada.

Además, Einstein estableció contacto con otro antiguo aspecto del tiempo: la asociación tradicional entre tiempo y creación. La cosmología científica moderna es la empresa más ambiciosa de todas las que surgieron del trabajo de Einstein. Cuando los científicos empezaron a explorar las implicaciones del tiempo de Einstein para el universo como un todo, hicieron uno de los descubrimientos más importantes en la historia del pensamiento humano: que el tiem-

po, y con él toda la realidad física, debe haber tenido un origen definido en el pasado. Si el tiempo es flexible y mudable, como Einstein demostró, entonces es posible que el tiempo tenga un nacimiento —y que también tenga una muerte; puede haber un comienzo y un fin del tiempo. Hoy el origen del tiempo se denomina el «big bang». Las personas religiosas se refieren a ello como «la creación».

Pese a todo, curiosamente, Einstein el iconoclasta seguía estando tan impregnado del pensamiento newtoniano que él mismo no extrajo esta conclusión trascendental. Se aferró a la creencia de que el universo es eterno y esencialmente invariable en su estructura global, favoreciendo una cosmología estática hasta que el peso de la evidencia acumulada le obligó a aceptar lo contrario. Pero aquí encontramos la ironía suprema. Para inmovilizar su universo, Einstein introdujo en la física un tipo nuevo de fuerza, una especie de antigravedad. Cuando se demostró que el universo estaba en expansión, Einstein descartó la fuerza cósmica con pesar mal disimulado, describiéndola más tarde como el mayor error de su vida. Aceptó con reticencias que el universo quizá no haya existido siempre, sino que probablemente nació en un big bang hace algunos miles de millones de años.

Hoy, la teoría del big bang se ha convertido en la cosmología ortodoxa. De todas formas se enfrenta a un obstáculo importante para proporcionar una explicación convincente de cómo el universo puede llegar a existir a partir de la nada como resultado de un proceso físico. Un obstáculo no mayor existe en el camino de la explicación del misterio de cómo *el propio tiempo* puede originarse de forma natural. ¿Puede la ciencia abarcar *alguna vez* el comienzo del tiempo dentro de su alcance? Este desafío fue asumido gustosamente en los años ochenta por algunos teóricos, muy en especial Stephen Hawking, y sus desarrollos fueron explicados al público en una avalancha de libros de divulgación. Los intentos actuales se centran en la física cuántica —ampliada ahora de una teoría de la materia a una teoría del universo global. Pero el tiempo ha estado siempre fuera del dominio de la física cuántica y los intentos por incorporarlo terminan, paradójicamente, por eliminarlo. ¡El tiempo desaparece! Como explicaré, hay mucho del tiempo cuántico que todavía no entendemos.

Pese a su popularidad, la teoría del big bang tiene sus detractores. Desde el principio, los intentos de los astrónomos para «fechar la creación» tuvieron dificultades. La edad seguía resultando equivocada. No había tiempo suficiente para que nacieran estrellas y planetas. Peor aún, había objetos astronómicos que parecían ser más viejos que el universo: un absurdo obvio. ¿Cabría la posibilidad de que el tiempo de Einstein y el tiempo cósmico no fueran el mismo? ¿Se trata simplemente de que el tiempo flexible de Einstein no es suficientemente flexible para estirarse hacia atrás hasta la creación?

El problema de la edad cósmica resultaba algo embarazoso, y había tendencia a barrerlo bajo la alfombra, pero durante décadas seguía surgiendo una y otra vez de una forma irritante. En los primeros años del tema, los cosmólogos

podían agitar sus brazos y poner la excusa de que sus datos eran todavía tan imprecisos que un factor de dos o tres no era razón para una disputa sobre fundamentos entre amigos. Sin embargo, en años recientes, con datos mucho mejores procedentes de telescopios y satélites, la cosmología se ha hecho casi una ciencia exacta. En 1992, el Cosmic Background Explorer Satellite (COBE) proporcionó lo que para muchos científicos fue el argumento decisivo para precisar los detalles finos de la teoría del big bang. Midiendo pequeñas arrugas en el calor de fondo del universo, COBE fue capaz de introducir un nuevo nivel de precisión en la modelización cosmológica. La pega es que los datos de COBE, combinados con otras observaciones recientes, sólo han servido para resucitar el problema de la edad corregido y aumentado.

Mientras escribo esto, las dificultades son debatidas arduamente. Algunos astrónomos creen que, con algunos retoques y apaños, las escalas de tiempo pueden encajar. Otros discrepan y rechazan el escenario completo del big bang. Pero un número creciente de cosmólogos están llegando a sospechar que la respuesta quizá la proporcionó el propio Einstein. Su impopular fuerza gravitatoria, ideada para evitar enfrentarse al origen del tiempo, podría proporcionar precisamente el mecanismo necesario para reconciliarlo con las edades extremas de ciertos objetos astronómicos. Su mayor error podría todavía resultar ser su mayor triunfo. El tiempo dirá.

Una historia muy breve del tiempo

El tiempo está en el corazón de todo lo que es importante para los seres humanos.

BERNARD D'ESPAGNAT

¿De qué tiempo se trata en cualquier caso?

No hay que pensar nunca que el tiempo es algo preexistente en algún sentido; es una magnitud manufacturada.

HERMANN BONDI

En un lóbrego laboratorio en Bonn hay un cilindro metálico con forma de submarino. Mide alrededor de tres metros de largo, y descansa holgadamente en una estructura de acero rodeado de alambres, tubos y diales. A primera vista, el artefacto entero parece el interior de un gigantesco motor de automóvil. En realidad, es un reloj; o, más bien, *el* reloj. El artefacto de Bonn, y una red de instrumentos similares distribuidos por todo el mundo, constituyen en conjunto «el reloj estándar». Los instrumentos individuales, de los que el modelo alemán es actualmente el más preciso, son relojes atómicos de haces de cesio. Continuamente están siendo controlados, comparados, retocados y refinados mediante señales de radio procedentes de satélites y estaciones de televisión, para hacerles llevar un paso casi perfecto. En la Oficina Internacional de Pesos y Medidas de Sèvres, no lejos de París, los datos son recogidos, analizados y transmitidos a un mundo obsesionado por el tiempo. Así se originan los famosos bips, las señales temporales de radio con las que ponemos en hora nuestros relojes.

Así, mientras nosotros realizamos nuestro trabajo cotidiano, el reloj de haces de cesio de Bonn mantiene el tiempo. Es, por así decir, un guardián del tiempo de la Tierra. El problema consiste en que la propia Tierra no siempre

mantiene un buen tiempo. De vez en cuando nuestros relojes, todos ellos supuestamente ligados al sistema maestro en Francia como un séquito de esclavos obedientes, deben ser ajustados en un segundo para seguir los cambios en la velocidad de rotación de la Tierra. El último de estos «segundos bisiestos» fue añadido el 30 de junio de 1994. La rotación del planeta, suficientemente precisa para servir como un reloj perfectamente apropiado durante un millar de generaciones, ha dejado ahora de ser un cronómetro fiable. En esta época de cronometraje de alta precisión, la pobre vieja Tierra no da la talla. Sólo un reloj atómico, de factura humana y misterioso, sirve para dictar estos importantes tic-tacs con la precisión exigida por navegantes, astrónomos y pilotos de líneas aéreas. Ya no se define un segundo como 1/86.400 de día: ahora un segundo son 9.192.631,770 latidos de un átomo de cesio.

Pero ¿de qué tiempo nos está hablando el reloj de Bonn en cualquier caso? ¿De su tiempo? ¿De mi tiempo? ¿Del tiempo de Dios? ¿Están los científicos en el laboratorio sombrío controlando el pulso del universo, registrando meticolosamente algún tiempo cósmico abstracto con fidelidad atómica? ¿Podría haber otro reloj, quizá en otro planeta en alguna parte, marcando fielmente otro tiempo para regocijo de sus constructores?

Sabemos que los relojes no tienen por qué coincidir: el reloj de la Tierra no está sincronizado con el reloj de Bonn. Entonces, ¿cuál es el *correcto*? Presumiblemente el reloj de Bonn, porque es más preciso. Pero ¿preciso con respecto a *qué*? ¿A *nosotros*? Después de todo, los relojes se inventaron para señalar el tiempo con fines completamente humanos. Sin embargo, ¿están todos los seres humanos «en» el mismo tiempo? El paciente en la silla del dentista y la audiencia que escucha una sinfonía de Beethoven experimentan de forma muy diferente un idéntico intervalo de tiempo medido por el reloj atómico.

Así pues, mucho de lo que creemos acerca del tiempo es resultado de un condicionamiento cultural. Una vez encontré a un místico en Bombay que afirmaba que podía alterar su estado de consciencia mediante la meditación y suspender así completamente el flujo del tiempo; no se impresionó al hablarle de relojes atómicos. En una conferencia en Londres hace algunos años me encontré casualmente compartiendo el estrado con el Dalai Lama. Estábamos allí para comparar y contrastar el tiempo tal como interviene en el pensamiento científico occidental y en la filosofía oriental. El Lama hablaba con tranquila seguridad, pero por desgracia en tibetano. Aunque traté de seguir la traducción para ilustrarme, lamentablemente no saqué mucho en claro. Choque de culturas, supongo.

Después de mi conferencia, tuvimos una pausa para el té, y el Dalai Lama cogió mi brazo y salimos fuera del edificio a plena luz del Sol. Alguien se postó de rodillas y ofreció un narciso a Su Santidad, que él aceptó graciosamente. Tuve la impresión abrumadora de un hombre gentil e inteligente, con valiosas ideas para todos nosotros, pero a quien los condicionamientos de su cargo le impedían comunicarlas efectivamente a los científicos occidentales allí reunidos. Salí de allí con una profunda sensación de oportunidad perdida.

La búsqueda de eternidad

¡Eternidad! aunque placentero, ¡pensamiento terrible!

JOSEPH ADDISON

En el mundo alocado de la sociedad occidental moderna, donde el tiempo es oro, los ferrocarriles, los horarios de líneas aéreas, los programas de televisión, e incluso la cocina están sujetos a la tiranía del reloj. Nuestras agitadas vidas están firmemente engranadas en la rueda del tiempo. Somos esclavos de nuestro pasado y rehenes del futuro. Pero ¿fue siempre así? Un hilo común que atraviesa la historia del pensamiento humano, en Oriente y Occidente, en el Norte y en el Sur, es la creencia de que el paradigma entero de la temporalidad humana está enraizado en algún tipo de monstruosa ilusión; que no es sino un producto elaborado de la mente humana:

El tiempo no subsiste por sí mismo:
la existencia continua de los cuerpos
nos hace que distingamos los sentidos
lo pasado, lo presente y lo futuro;
ninguno siente el tiempo por sí mismo,
libre de movimiento y de reposo.¹

Así escribía en el siglo I el poeta-filósofo romano Lucrecio en su poema épico *De Rerum Natura*. Desde tales ideas deslabazadas no hay sino un pequeño trecho hasta la creencia en que el paso del tiempo puede ser controlado e incluso suspendido por el poder de la mente, como descubrimos en las siguientes palabras terribles del poeta místico del siglo XVII Angelus Silesius:

El Tiempo es tu propia creación,
su reloj corre en tu cabeza.
En el instante en que dejas de pensar
el tiempo se detiene abruptamente.²

Para estos relativistas temporales, la verdadera realidad está investida en un reino que trasciende el tiempo: la Tierra Más Allá del Tiempo. Los europeos la llaman «eternidad». Los hindúes se refieren a ella como «moksha» y los budistas como «nirvana». Para los aborígenes australianos es el Tiempo del Sueño. De nuevo Angelus Silesius:

No se mide la eternidad
como un simple año tras año.
La Eternidad está aquí
Un paso más allá
de esa línea llamada Tiempo.³

En nuestra lucha para tratar de entender la realidad física y mental, nada nos molesta más que la naturaleza del tiempo. La paradójica conjunción de temporalidad y eternidad ha perturbado al Hombre en todas las épocas. Platón concluyó que el mundo fugaz de la experiencia diaria es sólo semirreal, un reflejo efímero de un reino intemporal de Formas puras y perfectas que habitan el reino de la eternidad. El tiempo mismo no es sino una imperfecta «imagen móvil de la Eternidad que permanece una para siempre», pero que nosotros los seres humanos incorregiblemente reificamos: «El pasado y el futuro son especies creadas del tiempo, que nosotros transferimos inconsciente pero erróneamente a la esencia eterna».⁴

La persistente tensión entre lo temporal y lo eterno impregna las grandes religiones del mundo, y ha dado lugar a generaciones de acalorados y a veces violentos debates teológicos. ¿Está Dios dentro o fuera del tiempo? ¿Es temporal o eterno? ¿Es Devenir o Ser? Según Plotino, un filósofo griego del siglo III, existir en el tiempo es existir de forma imperfecta. El Ser Puro (es decir, Dios) debe así caracterizarse por la total ausencia de cualquier relación con el tiempo. Para Plotino, el tiempo representa una prisión para los seres humanos, algo que nos separa del reino divino —la realidad absoluta y verdadera.

La creencia en que Dios está completamente fuera del tiempo llegó a ser también la doctrina establecida entre muchos pensadores cristianos primitivos, tales como san Agustín, Boecio y san Anselmo, empezando una tradición que continúa hasta nuestros días. Como Platón y Plotino antes que él, san Agustín sitúa a Dios en el reino de la eternidad, «supremo por encima del tiempo porque es un presente inacabable». En esta existencia, el tiempo no pasa; más bien, Dios percibe todos los instantes a la vez:

Tus años están todos juntos, porque permanecen. Los que van no son excluidos por los que vienen, porque no pasan ... Tu hoy es la eternidad.⁵

De este modo, el Dios del cristianismo clásico no sólo existe fuera del tiempo, sino que además conoce el futuro tanto como el pasado y el presente. Estas trascendentales ideas han sido sometidas a análisis detallados y han recibido alguna crítica aguda por parte de la Iglesia medieval, así como por parte de los teólogos y filósofos modernos. El núcleo del debate es el inquietante problema de cómo construir un puente entre la presunta eternidad de Dios de una parte y la manifiesta temporalidad del universo físico de la otra. ¿Puede un dios que es completamente atemporal tener la más mínima relación lógica con un mundo cambiante, con el tiempo humano? ¿No es ciertamente imposible que Dios exista *a la vez* dentro y fuera del tiempo? Tras siglos de agrio debate, todavía no hay consenso entre los teólogos sobre la solución a este profundo dilema. Para los lectores que estén interesados, estas enmarañadas cuestiones se revisan con mayor profundidad en mi libro *La mente de Dios*.

Escapar del tiempo

Lo importante del tiempo es que pasa.

ARTHUR EDDINGTON

Aunque teólogos y filósofos discuten los detalles técnicos de la relación lógica entre tiempo y eternidad, muchas personas religiosas creen que no es del debate académico de donde surgen las mejores intuiciones sobre el tema, sino de la revelación directa:

Recuerdo que iba a bañarme a una playa de guijarros poco frecuentada por las pocas personas que quedaban en el pueblo. De repente, el ruido de los insectos se acalló. El tiempo pareció detenerse. Una sensación de paz y poder infinito se apoderó de mí. Lo más que puedo hacer es comparar la combinación de intemporalidad y sorprendente plenitud de existencia con la sensación que uno tiene al observar el borde de un gran volante que gira en silencio o la superficie inmóvil de un río profundo y torrencial. Nada sucedía: pero la existencia era plena. Todo era claro.⁶

Esta anécdota personal, relatada por el físico y obispo anglicano Ernest Barnes en sus Gifford Lectures en 1929, capta elocuentemente la combinación de intemporalidad y claridad que tan a menudo se dice que está asociada con experiencias místicas y religiosas. ¿Puede un ser humano escapar realmente del tiempo y vislumbrar la eternidad? En el caso de Barnes, como tan a menudo sucede en los relatos de los viajeros occidentales, la experiencia llegó totalmente caída del cielo. Pero los místicos orientales han perfeccionado técnicas especiales que supuestamente pueden inducir estos raptos intemporales. El monje tibetano Lama Govinda describe así su propia experiencia:

La secuencia temporal se transforma en una coexistencia simultánea; la existencia de las cosas una al lado de otra en un estado de interpenetración mutua ... un continuo vivo en el que el tiempo y el espacio están integrados.⁷

Se han relatado muchas descripciones similares de meditación profunda, o incluso estados mentales inducidos por drogas, en los que la consciencia humana escapa aparentemente de los confines del tiempo, y la realidad aparece como un continuo intemporal.

La filósofa india Ruth Reyna cree que los sabios védicos «tenían intuiciones cósmicas de las que carece el hombre moderno ... De ellos era la visión no del presente, sino del pasado, presente, futuro, simultáneamente, y el No Tiempo».⁸ Sankara, el exponente del siglo VIII de los Advaita Vedanta, enseñaba que Brahma —el Absoluto— es perfecto y eterno en el sentido de *intemporalidad absoluta*, y por ello lo temporal, aunque real dentro del mundo de

la experiencia humana, no tiene realidad última. Siguiendo el camino de la auto-realización a través de Advaita, puede alcanzarse una realidad verdaderamente intemporal: «intemporal no en el sentido de duración sin fin, sino en el sentido de completación, que no requiere ni un antes ni un después», según Reyna. «Es esta verdad sorprendente de que el tiempo se evapora en irrealidad y la Intemporalidad puede verse como lo Real ... la que expresa la unicidad de Advaita».⁹

El anhelo de escapar del tiempo no implica necesariamente refinadas prácticas de meditación. En muchas culturas es simplemente una influencia penetrante aunque subconsciente —un «terror de la historia», como lo expresa el antropólogo Mircea Eliade— que se manifiesta como una búsqueda compulsiva de la Tierra Más Allá del Tiempo. En realidad, esta búsqueda es *el* mito fundador de casi todas las culturas humanas. La profunda necesidad humana de dar cuenta del origen de las cosas nos arrastra irresistiblemente hacia un tiempo antes del tiempo, un reino mítico de temporalidad intemporal, un Jardín del Edén, un paraíso primordial, cuya potente creatividad brota de sus mismas contradicciones temporales. Ya sea Atenea saliendo de la cabeza de Zeus o Mitra matando al Toro, encontramos el mismo simbolismo central de un reino perdido, perfecto e intemporal que de algún modo —paradójicamente, intemporalmente— mantiene una relación creativa con el mundo inmediato de lo temporal y lo mortal.

Esta conjunción paradójica está captada en su forma más desarrollada en el concepto de «El Sueño» de los aborígenes australianos, a veces llamado el Tiempo del Sueño Eterno. Según el antropólogo W. E. H. Stanner:

Un significado central de El Sueño *es* el de un tiempo heroico y sagrado, un tiempo lejano en el que el hombre y la naturaleza llegaron a ser lo que son; pero este significado no implica «tiempo» ni «historia» tal como los entendemos. Nunca he sido capaz de encontrar ninguna palabra aborigen para *tiempo* como concepto abstracto. Y el sentido de «historia» es aquí completamente extraño. No comprenderemos completamente El Sueño excepto como un complejo de significados.¹⁰

Aunque el Tiempo del Sueño lleva connotaciones de una edad pasada heroica, es erróneo pensar en esa época como un ahora ido. «Uno no puede “fijar” El Sueño en el tiempo —observa Stanner—. Era, y es, en todo momento.» De este modo, el Sueño sigue teniendo relevancia en los asuntos aborígenes contemporáneos, porque es parte de la realidad presente; los «seres creadores» siguen estando hoy activos. Lo que los europeos llaman «el pasado» es, para muchos pueblos aborígenes, *a la vez* pasado y presente. A menudo se narran historias de creación en lo que los europeos llamarían el pasado reciente, incluso tan reciente como la era de la colonización blanca. No se siente ninguna incongruencia porque, para los aborígenes australianos, los sucesos son más importantes que las fechas. Esta sutileza se pierde en la mayoría de las mentes occidentales; hemos llegado a estar obsesionados con la racionalización y medida del tiempo

en nuestras vidas cotidianas. Stanner cita a un anciano negro australiano que expresaba líricamente esta brecha cultural:

El hombre blanco no sueña.
Sigue otro camino.
El hombre blanco, él es diferente,
su camino le pertenece.

El concepto de «tiempo del hombre blanco» como un «camino» que él recorre inconscientemente es una descripción especialmente apropiada, creo yo, del tiempo lineal occidental. Es un camino que quizá conduzca al progreso, pero el precio psicológico que pagamos por embarcarnos en él es muy alto. El temor a la muerte está en la raíz de mucho de lo que hacemos y pensamos, y con ello el deseo desesperado de optimizar la preciosa duración que se nos ha asignado, para llevar la vida a la plenitud y lograr algo de valor duradero. El hombre moderno, escribió J. B. Priestley,

... se siente sujeto a una soga que tira de él inexorablemente hacia el silencio y la oscuridad de la tumba ... Pero ninguna idea de un «tiempo del sueño eterno», en donde tienen su ser los dioses y los héroes (de quienes él no está separado para siempre), surge brillante para hacer que el hombre moderno olvide sus calendarios y sus relojes, la arena de su tiempo que corre.

Pero incluso aquellos de nosotros que estamos atrapados en la cultura occidental, que no disponemos de una ruta mágica y mística de escape del tiempo, podemos aún descubrir los poderosos símbolos antiguos en acción en el arte y la literatura, reverberando a lo largo de las épocas. Desde *El paraíso perdido* a *Narnia*, desde el Avalón del rey Arturo a la galaxia distante en el espacio y en el tiempo donde fue librada y ganada la *guerra de las galaxias*, el reino de la eternidad nunca ha estado muy lejos de la superficie. Los emblemas evocadores de eternidad yacen ahora vagos e indistintos en nuestra cultura, sirviendo meramente como una diversión seductora de la «realidad» de sentido común de un tiempo que transcurre implacable. Pese a todo, nos asegura Priestley, ellos viven:

Entre las ideas que nos persiguen —ideas de las que podemos reírnos pero que no nos abandonan, ideas que a menudo prometen una misteriosa felicidad cuando todo lo demás parece fallarnos— figura esta idea del Gran Tiempo, el tiempo del sueño mitológico que está detrás y por encima y cualitativamente diferente por completo del tiempo ordinario. Nosotros ya no creamos ningún gran sistema fundamental basado en ella. No hacemos que conforme y guíe nuestras vidas. Ha menguado y ahora parece pequeña y andrajosa, casi irrisoria; pero no se le puede expulsar de la existencia a base de risas: se niega a salir.¹¹

Mundos cíclicos y eterno retorno

Todas las cosas desde la eternidad son de formas semejantes y dan vueltas en un círculo.

MARCO AURELIO ANTONIO

En las culturas antiguas, el contacto con la eternidad se mantenía vivo introduciendo ciclicidad en el mundo. En su libro clásico *El mito del eterno retorno*, Mircea Eliade describe cómo las sociedades tradicionales se rebelan habitualmente contra la noción histórica de tiempo, y en su lugar anhelan «un retorno periódico al tiempo mítico del comienzo de las cosas, al “Gran Tiempo”». ¹² Mantiene que los símbolos y rituales de las culturas antiguas representan un intento de escapar del tiempo «profano» histórico y lineal, a una época mítica o sagrada, y cree que la suspensión del tiempo profano «responde a una necesidad profunda del hombre primitivo». ¹³ Walter Ong, un experto en el simbolismo del tiempo, también encuentra evidencia en la mitología y el folklore de un anhelo de quitarse de encima los atavíos del tiempo:

El tiempo plantea muchos problemas para el hombre, de los cuales no es el menor el de la irresistibilidad y la irreversibilidad: el hombre es arrastrado en el tiempo quiera o no, y no puede recuperar un instante del pasado. Está atrapado, llevado contra su voluntad y, por consiguiente, aterrorizado. El recurso a mitologías, que asocian sucesos temporales con lo atemporal, desarma en efecto el tiempo, pues proporciona alivio frente a su amenaza. Este combate mitológico contra los estragos del tiempo puede posteriormente ser racionalizado mediante diversas teorías cíclicas, que han perseguido al filosofar del hombre desde la Antigüedad hasta el presente. ¹⁴

La liberación del tiempo histórico puede buscarse por ritos religiosos, tales como la repetición ritual de frases o gestos que simbólicamente recrean los sucesos originales. El contacto con el tiempo sagrado se identifica a menudo con regeneración y renovación. La antigua fiesta del Año Nuevo, común a culturas tradicionales y modernas, simboliza la regeneración o el renacimiento periódico de la naturaleza. En algunos casos, representa una repetición del propio suceso de la creación: la transición mítica del caos al cosmos.

El simbolismo subyacente en estas prácticas populares ampliamente extendidas deriva de la antigua creencia en la ciclicidad temporal. Muchos ritos anuales en el mundo occidental tienen orígenes paganos que anteceden al cristianismo, pese a lo cual han sido tolerados durante siglos por la Iglesia. De hecho, los rituales cíclicos juegan también un papel importante en la Iglesia, a pesar de la implacable oposición del cristianismo al tiempo cíclico.

El arte, la poesía y la literatura occidentales, a pesar de estar fuertemente influidos por el dominio del tiempo lineal, revelan de todas formas mucha ciclicidad oculta y ocasionalmente manifiesta. La profunda preocupación por el

ciclo natural de las estaciones, el uso de un estilo repetitivo y la utilización liberal por parte de los escritores de una filosofía de nada-nuevo-bajo-el-Sol sugieren un refugio imaginario contra la despiadada flecha del tiempo. En algunos ejemplos extremos, el propio texto está estructurado de una forma distorsionada temporalmente, como en el *Finnegans Wake* de James Joyce, donde las últimas palabras del libro remiten al pasaje de apertura, o en *La flecha del tiempo* de Martin Amis, en donde la narrativa entera corre hacia atrás.

La ciclicidad mantiene un profundo atractivo para algunas personas, pero es aborrecida por otras. Como veremos, existe una variante moderna de la cosmología de Einstein que sugiere un universo cíclico, y cada vez que doy conferencias públicas sobre cosmología y dejo de mencionarla, alguien inevitablemente me pregunta por ella. Quizá el atractivo del modelo reside en la perspectiva de resurrección en ciclos subsiguientes. Existe un mundo de diferencias, sin embargo, entre un tipo general de regeneración cósmica y un universo que se repite a sí mismo indefinidamente en cada detalle. La afirmación de Platón de ciclicidad cósmica ejerció una fuerte influencia sobre el pensamiento griego, y posteriormente sobre el romano. Fue llevado a su límite lógico por los estoicos, quienes creían en la idea de *palingenesis*: la reaparición literal de las mismas personas y sucesos ciclo tras ciclo, algo que hoy choca a la mayoría de la gente como una idea completamente estéril y repugnante.

El tiempo de Newton y el universo mecánico

No puedo creer que el hombre medieval se sintiese alguna vez atrapado en una vasta maquinaria del tiempo.

J. B. PRIESTLEY

La asociación del tiempo con lo místico, lo mental y lo orgánico, por fascinante e irresistible que pudiera ser, tuvo indudablemente el efecto de dificultar un estudio científico adecuado del tiempo durante muchos siglos. Mientras que los filósofos griegos desarrollaron una geometría sistemática, y la elevaron a una visión filosófica del mundo, el tiempo permaneció para ellos algo vago y misterioso, un tema para la mitología más que para las matemáticas. En la mayoría de las culturas antiguas, la noción de *medida del tiempo* aflora sólo en algunos contextos: en la música, en la pauta rítmica de las estaciones y los movimientos de los cuerpos celestes y en el ciclo menstrual. Todos estos tópicos estaban revestidos con cualidades ocultas y profundamente místicas de un modo en que no lo estaban cualidades como la masa, la velocidad y el volumen.

El estudio de Aristóteles del movimiento de los cuerpos le llevó a apreciar la importancia fundamental del tiempo, pero pese a ello él estuvo muy lejos de introducir la noción del tiempo como un parámetro matemático abstracto. Para Aristóteles, el tiempo era movimiento. Esto apenas resulta revolucionario:

nosotros percibimos el tiempo a través del movimiento, ya sea el movimiento del Sol en el cielo o de las manecillas en la esfera de un reloj. El concepto de tiempo como *algo* existente independientemente, una entidad por sí misma, no surgió hasta la época medieval europea. La existencia de un orden en la naturaleza ha sido reconocida por todas las culturas, pero sólo con la aparición de la ciencia moderna pudo darse un significado preciso y objetivo a dicho orden. En esta cuantificación, el papel del tiempo resultó ser crucial.

El 8 de julio de 1714, el gobierno de la reina Ana determinó «Que una Recompensa sea establecida por el Parlamento para la Persona o Personas que descubran un Método de Averiguar la Longitud Geográfica que sea más seguro y practicable que cualquiera ahora en práctica». ¹⁵ El premio ofrecido era la preciada suma de 20.000 libras, para recompensar la construcción de un cronómetro que fuera capaz de determinar la longitud en el mar dentro de un margen de treinta millas tras seis semanas de viaje. Ningún otro suceso simboliza mejor la transición desde el tiempo orgánico y rítmico del folklore tradicional a la noción moderna de tiempo como un parámetro funcional con valor económico y científico.

Este reto fue aceptado por un hombre de Yorkshire llamado John Harrison, quien diseñó varios relojes capaces de funcionar en el mar. El cuarto instrumento de Harrison, que incorporaba un refinamiento que compensaba los cambios de temperatura, fue terminado en 1759 y sometido a prueba dos años después. Fue transportado en el barco *Deptford* a Jamaica, donde, unos dos meses después, se encontró que había acumulado un error de sólo cinco segundos. El Almirantazgo fue un poco cicatero a la hora de dar el premio en metálico, y en 1765 Harrison sólo había obtenido la mitad de su recompensa. Finalmente apeló al rey y al Parlamento, pero se había hecho octogenario antes de que recibiera el resto. Incluso en el siglo XVIII, los fondos para investigación eran escasos.

La historia registra que fue Galileo el primero en establecer el tiempo como una magnitud fundamental medible en la actividad reglada del cosmos. Comparando el balanceo de una lámpara con al pulso de su muñeca mientras estaba en la iglesia, Galileo descubrió la ley fundamental del péndulo: que su periodo es independiente de la amplitud de la oscilación. Pronto, la era de la precisión mecánica iba a barrer Europa, con artesanos que diseñaban piezas cada vez más precisas. El impulso para una mayor precisión en la medida del tiempo no estaba motivado por nobles consideraciones filosóficas o científicas, sino por cuestiones muy prácticas para la navegación y el comercio: los marinos necesitaban conocer la hora con precisión para ser capaces de calcular la longitud geográfica a partir de las posiciones de las estrellas; el descubrimiento de América, con la necesidad de varias semanas de viaje de este a oeste, espoleó el desarrollo de cronómetros para barcos.

La posición crucial que ocupa el tiempo en las leyes del universo no se hizo completamente manifiesta hasta la obra de Newton, a finales del siglo XVII. New-

ton prologaba su presentación con una famosa definición de «tiempo absoluto, verdadero y matemático, [que] en sí mismo, y por su propia naturaleza, fluye de la misma forma sin relación con nada externo». ¹⁶ En el esquema global de Newton era capital la hipótesis de que los cuerpos materiales se mueven a través del espacio en trayectorias *predecibles*, sujetos a fuerzas que los aceleran, siguiendo leyes matemáticas estrictas. Habiendo descubierto cuáles eran estas leyes, Newton fue capaz de calcular el movimiento de la Luna y los planetas, así como las trayectorias de proyectiles y otros cuerpos terrestres. Esto representaba un avance gigantesco en la comprensión humana del mundo físico, y el comienzo de la teoría científica tal como la entendemos ahora.

Tan acertadas se mostraron las leyes de la mecánica de Newton que muchas personas supusieron que se aplicarían literalmente a todos los procesos físicos del universo. De esta creencia surgió la imagen del cosmos como un gigantesco mecanismo de relojería, predecible en cada detalle. El universo mecánico consagró al tiempo como un parámetro fundamental en la marcha del mundo físico. Este tiempo universal, absoluto y completamente fiable era el tiempo que intervenía en las leyes de la mecánica, y que era fielmente mantenido por el mecanismo cósmico. Englobaba la regla de causa y efecto, y resumía la propia racionalidad del cosmos. Y dio al mundo la imagen poderosa del Relojero Divino.

El gran físico y matemático francés Pierre de Laplace, el hombre que dijo a Napoleón que él «no necesitaba esa hipótesis» cuando discutía la acción de Dios en el universo newtoniano, comprendió que si todo movimiento está determinado matemáticamente, entonces el estado actual de movimiento del universo basta para fijar su futuro (y su pasado) en cualquier instante. En este caso, el tiempo se hace virtualmente redundante, pues el futuro ya está contenido en el presente, en el sentido de que toda la información necesaria para crear los estados futuros del universo reside en el estado presente. Como el químico belga Ilya Prigogine observó poéticamente en una ocasión, el Relojero Divino queda reducido a un mero archivero que pasa las páginas de un libro de historia cósmica que ya está escrito. ¹⁷ Mientras la mayoría de las culturas antiguas veían el cosmos como un caprichoso organismo vivo, sujeto a ciclos y ritmos sutiles, Newton nos dio el determinismo rígido, un mundo de partículas inertes y de fuerzas vinculadas por principios reguladores de precisión infinita.

El tiempo newtoniano es matemático en su propia esencia. De hecho, partiendo de la idea de un flujo de tiempo universal, Newton desarrolló su «teoría de las fluxiones» —una rama de las matemáticas más conocida como el cálculo infinitesimal. Nuestra preocupación por la precisión cronométrica puede rastrearse hasta el concepto newtoniano de un flujo de tiempo continuo y matemáticamente preciso. Después de Newton, el paso del tiempo se convirtió en algo más que meramente nuestra corriente de consciencia; empezó a jugar un papel fundamental en nuestra descripción del mundo físico, algo que podría analizarse con precisión ilimitada. Newton hizo con el tiempo lo que los geó-

metras griegos hicieron con el espacio: lo idealizó como una dimensión exactamente medible. Ya no se podía argumentar convincentemente que el tiempo es una ilusión, un constructo mental creado por seres mortales a partir de su fracaso para atrapar la eternidad, porque el tiempo interviene profundamente en las propias leyes del cosmos, principio fundamental de la realidad física.

El tiempo de Einstein

Fue en este mundo de rígida temporalidad donde nació Albert Einstein. El tiempo de Newton había resistido durante dos siglos y apenas fue cuestionado por los occidentales, aunque siempre se ha llevado mal con el pensamiento oriental y es ajeno a las mentes de los pueblos indígenas de América, África y Australia. Pese a todo, el tiempo de Newton es el tiempo del «sentido común» (al estilo occidental). Es también fácil de entender. Para Newton no hay sino un tiempo universal que todo lo abarca. Está simplemente *ahí*. El tiempo no puede ser afectado por nada; simplemente sigue fluyendo a un ritmo uniforme. Cualquier impresión de una variación en el ritmo del tiempo se trata como una falsa percepción. Dondequiera y cuandoquiera que usted esté, ya se esté o no moviendo, y sea lo que sea lo que usted esté haciendo, el tiempo marcha fiablemente al mismo paso para todos, marcando infaliblemente los instantes sucesivos de realidad en todo el cosmos.

Entre otras cosas, el concepto newtoniano de tiempo nos invita a dividirlo en pasado, presente y futuro de una manera absoluta y universal. Puesto que el universo entero comparte un tiempo común y un «ahora» común, cualquier observador en cualquier parte, incluyendo cualquier hombrucillo verde en Marte o más allá, coincidiría en lo que se estima que ya ha pasado, y lo que todavía está por venir. Esta pulcra imagen del tiempo como algo que define una sucesión de momentos presentes individuales tiene implicaciones importantes para la naturaleza de la realidad, pues en la visión newtoniana del mundo sólo lo que sucede *ahora* puede decirse que es verdaderamente real. Así es de hecho como muchos profanos perciben incuestionablemente la realidad. El futuro se considera como «todavía inexistente», y quizá ni siquiera decidido, mientras que el pasado se ha deslizado hacia un estado sombrío de semirrealidad, posiblemente recordado pero perdido para siempre. «¡Actúa, actúa, en el presente vivo!», escribía Longfellow, pues es sólo el estado físico del mundo *ahora* el que parece ser completamente real.

Pero esta visión simple del tiempo como algo rígido y absoluto —por poderosa y de sentido común que pueda ser— es esencialmente errónea. Hacia comienzos del siglo xx, el concepto newtoniano de tiempo universal empezó a dar lugar a conclusiones absurdas o paradójicas relativas al comportamiento de las señales luminosas y el movimiento de los cuerpos materiales. En pocos años, la visión newtoniana del mundo se había colapsado espectacularmente,

arrastrando con ella la noción de sentido común de tiempo. Esta transformación profunda y transcendental fue debida fundamentalmente al trabajo de Einstein.

La teoría de la relatividad de Einstein introdujo en la física la noción de un tiempo que es intrínsecamente flexible. Aunque no restauró completamente las antiguas ideas místicas del tiempo como algo esencialmente personal y subjetivo, ligó firmemente la experiencia del tiempo al observador individual. Ya no podía hablarse *del* tiempo: sólo *mi* tiempo y *su* tiempo, dependiendo de cómo nos estemos moviendo. Para utilizar la frase tópica: *el tiempo es relativo*.

Aunque el tiempo de Einstein seguía sujeto a las restricciones de la ley física y la regulación matemática, el efecto psicológico de la abolición de un tiempo universal fue espectacular. En las décadas que siguieron al trabajo original de Einstein los científicos sondearon cada vez más profundamente en los misterios del tiempo. ¿Podrían diferentes tipos de relojes medir diferentes tipos de tiempo? ¿Existe un reloj natural, o una medida de tiempo, para el universo como un todo? ¿Hubo un comienzo del tiempo, y habrá un final? ¿Qué es lo que imprime en el tiempo una direccionalidad característica, una asimetría entre pasado y futuro? ¿Cuál es el origen de nuestra sensación de flujo del tiempo? ¿Es posible viajar en el tiempo y, si lo es, cómo pueden resolverse las paradojas asociadas con el viaje al pasado? Resulta notable que, a pesar de casi un siglo de investigación, muchas de estas preguntas todavía no han recibido una respuesta satisfactoria: la revolución iniciada por Einstein permanece inacabada. Aún esperamos una comprensión completa de la naturaleza del tiempo.

¿Está muriendo el universo?

Y así, algún día,
las poderosas murallas del poderoso universo
rodeadas de fuerza hostil,
se derrumbarán y convertirán en ruinas.

LUCRECIO

Resulta imposible separar las imágenes científicas del tiempo del ambiente cultural que impregnó Europa durante el Renacimiento y la era científica moderna. La cultura europea ha estado fuertemente influida por la filosofía griega y los sistemas religiosos del judaísmo, el islamismo y el cristianismo. El legado griego era la suposición de que el mundo es ordenado y racional, y puede ser comprendido por medio del razonamiento humano: si es así, entonces la naturaleza del tiempo puede, en principio, ser captada por los mortales. Del judaísmo vino el concepto occidental de tiempo tan capital para la visión científica del mundo. En contraste con la noción dominante de tiempo como algo cíclico, los judíos llegaron a creer en un tiempo *lineal*. Un credo central de la

fe judía, posteriormente heredado por el cristianismo y por el islam, era el de *proceso histórico*, en el que el plan de Dios para el universo se despliega siguiendo una secuencia temporal definida. En este sistema de creencias, el universo fue creado por Dios en un instante definido en el pasado y en un estado muy diferente del que existe hoy. La sucesión teológica de acontecimientos —creación, caída, redención, juicio, resurrección— corre en paralelo con una secuencia dirigida por Dios de acontecimientos físicos: orden a partir del caos primigenio, origen de la Tierra, origen de la vida, origen de la humanidad, destrucción y descomposición.

El concepto de tiempo lineal lleva consigo la implicación de una flecha del tiempo que apunta desde el pasado hacia el futuro e indica la direccionalidad de la secuencia de sucesos. El origen de la flecha del tiempo como un principio físico es aún un misterio científico curiosamente polémico, al que volveré en el capítulo 9. Científicos y filósofos han estado claramente divididos acerca del significado de la flecha del tiempo. El dilema, dicho crudamente, se reduce a esto: ¿el universo va a mejor o a peor? La Biblia narra la historia de un mundo que empieza en un estado de perfección —el jardín del Edén— y degenera como resultado del pecado del hombre. Sin embargo, un componente básico del judaísmo, el cristianismo y el islamismo es un mensaje de esperanza, de creencia en una mejora personal y en la eventual salvación de la humanidad.

A mediados del siglo XIX los físicos descubrieron las leyes de la termodinámica, y pronto quedó de manifiesto que éstas implicaban un principio de degeneración universal. La llamada segunda ley de la termodinámica se enuncia a menudo diciendo que todo sistema cerrado tiende hacia un estado de desorden total o caos. En la vida diaria encontramos la segunda ley en muchos contextos familiares: una habitación en desorden, un objeto que se rompe, una situación de tráfico intenso y caótico. Cuando se aplica al universo como un todo, la segunda ley implica que el cosmos entero se desliza rápidamente por una pendiente hacia una condición final de degeneración *total* —es decir, desorden máximo— que se identifica con el estado de equilibrio termodinámico.

Una medida del inexorable crecimiento del caos utiliza una magnitud denominada «entropía», que se define, hablando en términos generales, como el grado de desorden en un sistema. La segunda ley establece entonces que en un sistema cerrado la entropía total nunca puede decrecer; a lo sumo permanece igual. Casi todos los cambios naturales tienden a incrementar la entropía, y vemos la segunda ley en acción en todo lo que nos rodea en la naturaleza. Uno de los ejemplos más famosos lo constituye el modo en que el Sol quema lentamente su combustible nuclear, irradiando calor y luz a las profundidades del espacio de forma irrecuperable, y aumentando la entropía del cosmos con cada fotón liberado. Finalmente el Sol agotará su combustible y dejará de brillar. La misma degeneración lenta afecta a todas las estrellas del universo. A mediados del siglo XIX, este destino sombrío llegó a conocerse como la «muerte térmica del cosmos». El «agotamiento» termodinámico del cosmos representó una

ruptura importante con el concepto del universo mecánico newtoniano. En lugar de considerar el universo como una máquina perfecta, los físicos lo veían ahora como una máquina térmica gigantesca agotando lentamente su combustible. Las máquinas de movimiento perpetuo se consideraron idealizaciones irrealizables, y se sacó la conclusión alarmante de que el universo está muriendo lentamente. La ciencia había descubierto el tiempo pesimista, y una nueva generación de filósofos ateos, dirigida por Bertrand Russell, se regocijaba en la deprimente inevitabilidad del destino cósmico.

La segunda ley de la termodinámica introduce una flecha del tiempo en el mundo porque el aumento de la entropía parece ser un proceso «cuesta abajo» irreversible. Por una curiosa coincidencia, precisamente cuando las malas noticias sobre el universo moribundo estaban calando en los físicos, Charles Darwin publicó su famoso libro *El origen de las especies*. Aunque la teoría de la evolución conmocionó a la gente mucho más que la predicción de una muerte térmica del universo, el mensaje central del libro de Darwin era básicamente optimista. La evolución biológica también introduce una flecha del tiempo en la naturaleza, pero ésta apunta en dirección contraria a la de la segunda ley de la termodinámica: la evolución parece ser un proceso «ascendente» hacia el orden. La vida en la Tierra empezó en forma de microorganismos primitivos; con el tiempo ha progresado para producir una biosfera de una complejidad organizativa sorprendente, con millones de organismos intrincadamente estructurados y soberbiamente adaptados a sus nichos ecológicos. Mientras la termodinámica predice degeneración y caos, los procesos biológicos tienden a ser progresivos, produciendo orden a partir del caos. Aquí había un tiempo optimista, que aparecía en la ciencia precisamente cuando el tiempo pesimista estaba a punto de sembrar su semilla de desesperación.

El propio Darwin creía claramente que hay un impulso innato en la naturaleza hacia la mejora. «En la medida en que la selección natural trabaja únicamente por y para el bien de cada ser, todos los dones corpóreos y mentales tenderán a progresar hacia la perfección», escribió.¹⁸ Los biólogos empezaron a hablar de una «escala de progreso», con los microbios en el fondo y el hombre en la cima. De este modo, aunque la teoría de la evolución rechazaba la idea de que Dios había diseñado y creado cuidadosamente cada especie por separado, dejaba lugar para un Dios diseñador que actúa de una forma más sutil, dirigiendo o guiando el curso de la evolución durante miles de millones de años hasta llegar al hombre y quizá más allá.

Esta filosofía de progreso fue abrazada de forma entusiasta por varios pensadores europeos destacados, tales como Henri Bergson, Herbert Spencer, Friedrich Engels, Teilhard de Chardin y Alfred North Whitehead. Todos veían evidencia en el universo como un todo, no sólo en la biosfera terrestre, de una capacidad intrínseca de la naturaleza para producir orden a partir del caos. El tiempo lineal de estos filósofos y científicos era un tiempo de avance vacilante pero, en definitiva, asegurado.

Por desgracia, el progreso en la naturaleza no encajaba bien con el ciego caos termodinámico, ni con el caos sin finalidad que supuestamente subyace en la evolución darwiniana. La tensión entre el concepto de una biosfera progresiva por una parte y un universo destinado a una muerte térmica por otra produjo algunas respuestas confusas. Algunos biólogos, especialmente en Francia, minimizaron la tesis central de Darwin de mutaciones aleatorias en favor de una cualidad misteriosa denominada *élan vital*, o fuerza vital, responsable de dirigir a los organismos en la dirección del progreso y contra las tendencias caóticas de los procesos inanimados. La creencia en tal fuerza vital persiste aún hoy en ciertos círculos no científicos. Algunos filósofos y científicos, preocupados por el destino global del universo, afirmaron que la segunda ley de la termodinámica podía ser evitada bajo ciertas circunstancias, o que no debería aplicarse al universo como un todo.

La discusión aún colea. Los biólogos han abandonado hace tiempo la fuerza vital, y muchos argumentan vigorosamente que cualquier impresión de progreso en la evolución biológica es simplemente el resultado de buenos deseos y de condicionamiento cultural. El camino del cambio evolutivo, afirman, es esencialmente aleatorio: «el azar atrapado al vuelo», por utilizar la evocadora frase de Jacques Monod. Otros científicos, muchos de los cuales han sido influidos por la obra de Ilya Prigogine, reconocen la existencia de procesos *auto-organizativos* en la naturaleza, y mantienen que el avance hacia una mayor complejidad organizativa es una tendencia universal. La autoorganización espontánea no tiene por qué estar en conflicto con la segunda ley de la termodinámica: tales procesos siempre generan entropía como un producto secundario, de modo que hay un precio que pagar por conseguir orden a partir del caos. Por lo que respecta al destino final del universo, cuál de estas tendencias contrapuestas —complejidad en progresión o entropía en aumento— ganará al final depende crucialmente del modelo cosmológico adoptado. Aquellos lectores con interés en estas cuestiones escatológicas pueden leer mi libro *The Last Three Minutes*.

El retorno del eterno retorno

La historia siempre se repite.

PROVERBIO

Incluso mientras los optimistas y los pesimistas peleaban a comienzos de siglo sobre en qué dirección apuntaba la flecha del tiempo cósmica, el concepto de ciclicidad hizo una entrada sorprendente en la ciencia occidental. Los físicos se esforzaban por comprender el origen de las leyes de la termodinámica en términos de la teoría atómica de la materia. El proceso termodinámico más básico es el flujo de calor de lo caliente a lo frío, un proceso unidireccional

que resume la segunda ley. En Viena, Ludwig Boltzmann se propuso descubrir la forma de explicar matemáticamente este flujo en términos de movimiento molecular. Imaginó un enorme conjunto de moléculas microscópicas confinadas dentro de una caja rígida, moviéndose caóticamente, chocando unas con otras y rebotando en las paredes de la caja.

Boltzmann pretendía que su modelo representase un gas. Comprendió que los movimientos aleatorios de las moléculas tenderían a romper cualquier orden y servirían para mezclar la población de partículas de forma muy eficiente. Por ejemplo, la temperatura del gas está determinada por la velocidad promedio de las moléculas, de modo que, si en algún instante el gas estuviera más caliente en cierta región, las moléculas en dicha región se moverían en promedio más rápidas que el resto. Pero este estado de cosas no duraría mucho tiempo. Enseguida las moléculas de alta velocidad chocarían con las partículas más lentas a su alrededor y les cederían algo de su energía cinética. El exceso de energía de las moléculas procedentes de la región caliente se difundiría por toda la población hasta que se alcanzara una temperatura uniforme y la velocidad molecular promedio en cada región se hiciese la misma en todo el gas.

Boltzmann apoyó esta imagen física plausible con un cálculo detallado en el que aplicaba las leyes del movimiento de Newton a las moléculas y luego utilizaba técnicas estadísticas para deducir el comportamiento colectivo de grandes cantidades de moléculas. Encontró una magnitud, definida en términos de los movimientos de las moléculas, que proporcionaba una medida del grado de caos en el gas. Boltzmann demostró que el valor de dicha magnitud aumenta siempre como resultado de las colisiones moleculares, sugiriendo que se identificara con la entropía termodinámica. Si fuera así, el cálculo de Boltzmann equivalía a una derivación de la segunda ley de la termodinámica a partir de las leyes de Newton.

Inmediatamente después de este triunfo, una enorme brecha fue abierta en el argumento de Boltzmann por el matemático y físico francés Henri Poincaré, quien demostró rigurosamente que una colección finita de partículas confinada en una caja y sometida a las leyes del movimiento de Newton debe volver siempre a su estado inicial (o al menos muy próxima a él) al cabo de un periodo de tiempo suficientemente largo. Por lo tanto, el estado del gas sufre «recurrencias». El teorema de Poincaré tiene la implicación obvia de que si la entropía del gas aumenta en alguna etapa, entonces forzosamente tendrá que disminuir de nuevo para que el gas vuelva a su estado inicial. Por cada conjunto de movimientos moleculares que pueda incrementar la entropía, o caos, del gas, debe haber otro conjunto que la disminuya. En otras palabras, el comportamiento del gas en una larga escala de tiempo es cíclico. Esta ciclicidad en el estado del gas puede rastrearse hasta la simetría temporal subyacente en las leyes de Newton, que no distingue entre pasado y futuro.

Las longitudes de los ciclos de Poincaré son verdaderamente enormes: aproximadamente 10^N segundos, donde N es el número de moléculas (alrededor de

un billón de billones en 40 litros de aire). La edad del universo es de 10^{17} segundos, de modo que la duración de los ciclos es enorme, incluso para un puñado de moléculas. En el caso de un sistema macroscópico, la longitud de los ciclos de Poincaré deja pequeñas todas las otras escalas de tiempo conocidas. De todas formas, los ciclos tienen duración finita, de modo que no puede rechazarse la posibilidad de una disminución de entropía en algún momento en un futuro lejano. La conclusión de Boltzmann de que la entropía puede crecer sólo como resultado de colisiones moleculares se mostraba así falsa. Pronto iba a ser reemplazada por una afirmación estadística menos tajante: que la entropía del gas *muy probablemente* aumentaría. Los decrecimientos en la entropía son posibles, como resultado de fluctuaciones estadísticas. Sin embargo, las probabilidades de una fluctuación que haga decrecer la entropía disminuyen drásticamente con el tamaño de la fluctuación, lo que implica que decrecimientos grandes de la entropía son extraordinariamente improbables —aunque aún técnicamente posibles. El propio Boltzmann llegó a sugerir que quizá el universo como un todo está sujeto a ciclos de Poincaré de duración inmensa, y que el estado actual del universo relativamente ordenado es el resultado de un decrecimiento fantásticamente raro en la entropía. Durante la inmensa mayor parte del tiempo, el estado del universo estaría muy cerca del equilibrio —es decir, el estado de muerte térmica. Lo que estas ideas sugieren es que la muerte térmica del cosmos no es definitiva, y que la resurrección es posible dado un tiempo suficientemente grande.

Con el descubrimiento de las recurrencias de Poincaré, el concepto del eterno retorno llegó a ser parte del discurso científico, pero con un aspecto bastante diferente de la versión popular. En primer lugar, el mundo necesita un tiempo inimaginablemente largo para retornar a su estado actual. En segundo lugar, la ciclicidad implicaba no una periodicidad exacta sino simplemente una recurrencia estadística. La situación puede imaginarse en términos de un barajado de cartas. Si se baraja un mazo de cartas inicialmente ordenado por palos y en orden numérico, entonces ciertamente irá a parar a un estado menos ordenado después de barajado. Sin embargo, puesto que el mazo tiene sólo un número finito de cartas, un barajado aleatorio continuado debe hacer que cualquier estado dado aparezca y reaparezca infinitas veces. Simplemente por azar, el orden original por palos y números será eventualmente restaurado. El estado de las cartas puede considerarse análogo a los estados del gas y el barajado juega el papel de colisiones moleculares caóticas.

El argumento anterior fue captado por el filósofo alemán Friedrich Nietzsche, quien concluyó que las recurrencias cósmicas privaban a la vida humana de cualquier propósito final.¹⁹ La falta de sentido de ciclos sin fin convertía al universo en algo absurdo, opinaba él. Su desesperante filosofía del «nihilismo» despreciaba el concepto de progreso, ya sea humano o cósmico. Evidentemente, si el universo va a retornar un día a su estado inicial, todo progreso debe eventualmente invertirse. Esta conclusión dio lugar al aforismo más famoso de Nietzsche: «¡Dios ha muerto!».

El comienzo de todo

Einstein era completamente consciente de las conflictivas ideas respecto a la flecha del tiempo. De hecho, el mismo año en que formuló su teoría de la relatividad hizo también una contribución fundamental a la mecánica estadística de los movimientos moleculares. No obstante, a pesar de este conocimiento, su primer intento de construir un modelo del universo estaba basado en la hipótesis de que éste era estático e inmutable. En esto no estaba solo. Muchos astrónomos del siglo XIX creían que el universo permanecía en promedio prácticamente igual de una época a otra. La creencia en un cosmos estable y eterno en el que los procesos degenerativos están equilibrados continuamente por regeneración datan de la época de la Grecia antigua. Tales modelos sobreviven hasta el día de hoy, bajo la máscara de la llamada teoría del estado estacionario y sus variantes.

Las cosmologías pueden entonces dividirse en cuatro clases. La primera es el modelo científico ortodoxo de un universo que nace en un tiempo finito en el pasado y degenera lentamente hacia una muerte térmica. La segunda es un universo que tiene un origen definido pero progresa a pesar de la segunda ley de la termodinámica. En tercer lugar está el universo cíclico sin comienzo ni fin global, lo que implica o bien estricta repetición o bien recurrencias estadísticas. Finalmente existe el universo estático o en estado estacionario, en el que los procesos locales pueden ser degenerativos o progresivos pero el universo como un todo permanece más o menos igual para siempre.

No hay duda de que la amplia aceptación del primero de estos modelos cosmológicos debe mucho a la cultura occidental y a siglos de creencia atrincherada en un universo creado. Esta creencia trajo consigo la noción de un tiempo universal —el tiempo de Dios— de lo que se seguía que debe haber una *fecha* definida para la Creación. Los intentos por deducir la fecha a partir de un examen de la Biblia daban inevitablemente una respuesta de algunos miles de años antes de Cristo. En la Europa renacentista una cifra semejante no era irrazonable. Poco se sabía sobre procesos geológicos o cambio biológico, y aún menos sobre la verdadera configuración astronómica del universo. Era posible creer que el universo tenía sólo algunos milenios de edad. Cuando los geólogos del siglo XIX señalaron los fósiles como evidencia de la enorme edad de la Tierra, algunos eclesiásticos respondieron que estas imágenes fueron creadas deliberadamente por el diablo para confundirnos. En nuestros días hay fanáticos religiosos que declaran que no podemos confiar en nuestros relojes o nuestros sentidos. Ellos creen firmemente que el universo fue creado por Dios hace tan sólo unos miles de años, y que simplemente *parece* viejo.

¿Podrían estar en lo cierto? ¿Podemos estar seguros de que el universo es realmente viejo? Consideremos esto. La estrella Sanduleak 69.202 estalló hace 160.000 años, según el tiempo de la Tierra. Nadie supo esto hasta que un asistente técnico que trabajaba en el Observatorio de Las Campanas en Chile lo

vio ocurrir la noche del 23 al 24 de febrero de 1987. La explosión fue claramente visible a simple vista en la oscuridad del cielo nocturno. Las noticias tardaron tanto tiempo en llegarnos debido a que Sanduleak 69.202 está a una distancia de aproximadamente 1.5 trillones de kilómetros, en la cercana minigalaxia conocida como la Gran Nube de Magallanes, y la luz procedente de la explosión viaja a una velocidad finita.

Si el universo fue creado hace algunos miles de años, debe haberlo sido con Sanduleak 69.202 ya en una condición explosionada: una estrella creada muerta. Pero eso no sería todo. En el espacio entre la estrella siniestrada y la Tierra hay un haz de luz que se extiende continuamente desde nuestros ojos a la estrella. Y en el haz, marchando inexorablemente hacia nosotros, está el registro de los sucesos que acontecieron en la estrella. Imaginemos este haz, de 160.000 años-luz de largo, el día de la creación. El haz estelar, que debe haber sido creado intacto junto con todo lo demás, transporta, en la mayor parte de su longitud, la imagen de una estrella muerta, que ha explotado en pedazos y residuos que salen despedidos. Pero a corta distancia la Tierra, en un segmento de sólo algunos miles de años-luz de largo, el haz lleva codificada una curiosa ficción: las imágenes de una estrella viva que nunca existió. El artificio global está hecho simplemente para que *parezca* que hubo una vez una estrella viva, mientras que de hecho Dios creó una estrella muerta.

Pero ¿cómo sabemos que este extraño y artificioso acto de creación sucedió hace unos pocos miles de años? Si Dios puede crear un universo joven que parezca viejo, ¿cómo podemos estar seguros de que Él no lo creó, digamos, hace dos mil años, quizá para coincidir con el nacimiento de Jesús? Esto hubiera supuesto crear algunos registros humanos, tales como el Antiguo Testamento, así como los registros fósiles tales como los dinosaurios, y los registros estelares como el curioso haz de luz fijo desde Sanduleak 69.202. ¿Pero entonces qué? Un Ser que puede hacer estrellas muertas seguramente puede falsificar unos pocos manuscritos. De hecho, ¿cómo podemos estar seguros de que el universo no fue creado hace cien años, con todo dispuesto para que parezca *que sea* mucho más viejo? O, para el caso, quizá el mundo empezó hace cinco minutos, y todos hemos sido creados ya con recuerdos consistentes de actividades anteriores en nuestros cerebros. (Más interesante aún sería el que nuestros recuerdos difiriesen un poco, para desatar controversias como la del número de tiradores que asesinaron al presidente Kennedy.)

Sucede cuando sucede

El tiempo es sólo una condenada cosa después de otra.

ANÓNIMO

Cuando era niño, a menudo solía quedarme despierto por la noche, con el temor anticipado de algún suceso desagradable del día siguiente, tal como una

visita al dentista, y deseaba poder presionar alguna especie de botón que tuviera el efecto de transportarme instantáneamente veinticuatro horas hacia el futuro. La noche siguiente me preguntaba si el botón mágico fue real, y si el truco había funcionado de verdad. Después de todo, *era* veinticuatro horas más tarde, y aunque yo podía recordar la visita al dentista, en ese instante era sólo un *recuerdo* de una experiencia, no una experiencia.

Por supuesto, otro botón me llevaría también hacia atrás en el tiempo. Este botón restauraría mi estado cerebral y mi memoria para dejarlos tal como eran en esa fecha anterior. Una presión, y podría volver a mi primera infancia, experimentando *una vez más, por primera vez*, mi cuarto cumpleaños...

Con estos botones desaparecería la ordenada secuencia de sucesos que aparentemente constituyen mi vida. Simplemente podría saltar de aquí a allá al azar, hacia atrás y hacia adelante en el tiempo, escapándome rápidamente de cualquier episodio desagradable, repitiendo frecuentemente los buenos momentos, evitando siempre la muerte, por supuesto, y continuando *ad infinitum*. No tendría sensación subjetiva de aleatoriedad, puesto que en cada etapa el estado de mi cerebro tendría codificada una secuencia de sucesos consistente.

Desde esta fantasía desbocada sólo hay un pequeño paso hasta la sospecha de que quizá algún otro —quizá un demonio o una deidad de estilo fundamentalista— está presionando esos botones en mi nombre, y yo, pobre loco, soy totalmente inconsciente del truco. Por el contrario, en tanto que el misterioso presionador de botones sigue en ello, parece como si yo disfrutara de algún tipo de inmortalidad, aunque una inmortalidad restringida a un conjunto fijo de sucesos. ¿Quizá esto sea mejor que la mortalidad? «En la eternidad no hay nada pasado ni nada futuro, sino sólo presente», escribió Filón de Judea.²⁰ Pero eso fue en el siglo I. Nosotros tenemos que ser prudentes; los tiempos han cambiado desde entonces.

Lo sorprendente de los anteriores «experimentos mentales» es, ¿hasta qué punto sería diferente mi vida si este asunto de presionar el botón estuviese sucediendo realmente? ¿Qué sentido tiene siquiera decir que yo estoy experimentando mi vida en una especie de forma aleatoria y a saltos? Cada instante de mi experiencia *es* esa experiencia, cualquiera que sea su relación temporal con otras experiencias. Mientras los recuerdos sean consistentes, ¿qué significado puede darse a la afirmación de que mi vida *sucede* en una secuencia confusa? En su novela *October the First Is Too Late* (El 1 de octubre es demasiado tarde), el astrónomo y escritor de ciencia ficción británico Fred Hoyle imaginó también un tipo de presionador de botón cósmico, pero uno que rompía el mundo en fragmentos de tiempo y los desordenaba. La gente cruzaba «zonas de tiempo» y se sorprendía al encontrar comunidades que vivían en diferentes periodos históricos. El científico ficticio de Hoyle atrapado en esta pesadilla no creía en la noción de tiempo como «una corriente en eterno movimiento» y la desechaba como «una ilusión grotesca y absurda». Dice: «Si de algo podemos estar bastante seguros en física es de que todos los tiempos existen con

la misma realidad».²¹ Se nos invita a pensar en los sucesos en el universo en términos de una metáfora inusual: una serie de casillas numeradas que contienen mensajes referentes a las casillas vecinas. Los mensajes describen de forma precisa los contenidos de las casillas con números pequeños («el pasado»), pero son vagos sobre aquellas que tienen números grandes («el futuro»). Esto remeda la causalidad y la asimetría entre nuestro conocimiento seguro del pasado y las vagas predicciones del futuro. Pero no hay «flujo» de tiempo. En su lugar hay un funcionario metafórico que inspecciona una a una las casillas. Cada acto de inspección crea un instante de consciencia en el mundo: «En cuanto un estado particular es elegido, en cuanto un funcionario imaginario echa una ojeada a los contenidos de una casilla particular, usted tiene la consciencia subjetiva de un instante particular, al que llama el presente», explica el científico.

La característica curiosa de esta ficción es que el funcionario no necesita examinar las casillas siguiendo una secuencia numérica. Podría saltar caprichosamente de un lugar a otro, incluso al azar, y nosotros no lo notaríamos; todos seguiríamos teniendo la impresión del tiempo como una corriente continua y que fluye para siempre. Cada instante de consciencia humana activado por el funcionario implica una experiencia-recuerdo de los «contenidos de las casillas» situadas antes en la secuencia numérica, incluso si el funcionario no hubiera examinado dichas casillas durante un rato. Además, no hay nada que impida al funcionario volver a examinar la misma casilla un millón de veces. Desde el punto de vista subjetivo de la consciencia ligada a dicha casilla, el mundo aparece igual cada vez. «No importa el orden en que tomes las casillas —dice el científico—, aunque escogieras alguna o todas ellas un millón de veces, nunca sabrías nada diferente del simple orden secuencial.»

La cosa empeora. El científico imagina dos hileras de casillas. Una es para usted (es decir, las casillas contienen sucesos que pertenecen a su consciencia), la otra para mí. El funcionario es reemplazado en esta etapa de la narrativa de Hoyle por un punto luminoso móvil menos antropomorfo. «Nuestra consciencia corresponde simplemente al punto donde cae la luz, mientras danza entre las casillas», se nos dice. Pero la luz no tiene que examinar (es decir, alumbrar) pares de casillas, una de cada hilera, simultáneamente. Podría pasearse de un lado a otro entre las hileras. Realmente habría sólo una consciencia, pero dos hileras de casillas, de modo que la consciencia activada en una hilera tendría *sensaciones* diferentes —y se consideraría a sí misma como una persona diferente— de la de la otra hilera. Por extensión, todos los seres conscientes del universo, humanos, animales y alienígenas, serían realmente la *misma* consciencia, pero activada en diferentes contextos y en diferentes instantes. Incluso si el proceso fuera totalmente aleatorio, crearía la impresión de una secuencia ordenada de sucesos que es experimentada por miríadas de mentes distintas.

De vuelta al mundo real, el papa Gregorio XIII presionó un botón metafórico (es decir, promulgó un decreto) en 1582 y la fecha saltó del 4 de octubre al 15 de octubre de la noche a la mañana. Al menos lo hizo en los países católi-

cos. Los protestantes sospechaban de este juego de manos romano. ¿Podrían serles robados diez días de sus vidas? Algunas gentes desconcertadas no podían distinguir *fechas* de *tiempos*. Los británicos y los norteamericanos no adoptaron el calendario gregoriano hasta el siglo XVIII; los rusos lo evitaron, sorprendentemente, hasta 1917. El ajuste del papa era necesario porque la Tierra no tarda un número exacto de días en dar una vuelta alrededor del Sol; de aquí la necesidad de años bisiestos. El viejo calendario romano no tenía en cuenta de forma suficientemente precisa los años bisiestos, y la fiesta de la Pascua se hacía cada vez más calurosa a medida que el año del calendario se desincronizaba progresivamente respecto a las estaciones. El papa Gregorio decretó que los últimos años de cada siglo no fueran años bisiestos a menos que fueran divisibles por 400. Esta regla fija las cosas para 3.300 años. Correcciones más recientes de la regla nos han puesto en hora para otros 44.000 años. No obstante, existe el rumor de que los habitantes de una isla en las Hébridas Exteriores no tienen aún intención de adoptar el moderno calendario gregoriano.

Dejaré al margen por el momento la cuestión del tiempo casillero psicológico, y trabajaré con el tiempo físico y medible como si fuera real. En efecto, esta es la hipótesis fundadora de la ciencia: que existe un mundo real ahí fuera al que podemos dar sentido. Y ese mundo incluye al tiempo. Dado un universo racional, podemos buscar respuestas a preguntas racionales sobre el tiempo, tales como la fuente de la flecha del tiempo y la fecha en que empezó el universo, si es que realmente tuvo un comienzo. Sin embargo, la cosmología mecánica racional de Newton, y la cosmología termodinámica moribunda que vino tras ella, se basaban en una visión del tiempo muy simplista. Aunque adecuado durante doscientos años, el concepto newtoniano del tiempo era esencialmente erróneo. Fue necesario alguien del genio de Albert Einstein para exponer sus defectos.

Tiempo de cambio

A partir del momento en que llegó a cuestionar la idea tradicional de tiempo, sólo necesitó cinco semanas para escribir su artículo, pese a que trabajaba todo el día en la Oficina de Patentes.

G. J. WHITROW

Un regalo del cielo

A mil quinientos años-luz de distancia, en la constelación del Águila, hay un extraño sistema astronómico. Conocido crípticamente como PSR 1913+16, o más simplemente «el púlsar binario», consiste en un par de estrellas consumidas y colapsadas que se mueven una alrededor de la otra en una lenta danza de muerte. Cada una de estas estrellas contiene más materia que nuestro Sol, aunque comprimida en un volumen tan pequeño que apenas cubriría Manhattan.

Mi historia del tiempo de Einstein comienza con una de estas estrellas. Está girando a varias revoluciones por segundo, y mientras da vueltas, también lo hace su campo magnético —un billón de veces más intenso que el de la Tierra— de modo que crea una poderosa dinamo cósmica. Electrones perdidos se mezclan en el campo magnético y son impulsados a casi la velocidad de la luz. Acelerados en trayectorias circulares, los electrones emiten radiación electromagnética en un haz estrecho. Cuando rota la estrella, el haz barre el universo como un faro. Cada vez que cruza la Tierra, nuestros radiotelescopios pueden detectar un bip instantáneo. El bip, bip, bip regular de PSR 1913+16 lo señala como un objeto muy especial: un púlsar. Cuando se descubrió el primer púlsar, en 1967, se consideró medio en broma que era una señal de radio alienígena, por lo precisos que eran los pulsos. Pero los púlsares son objetos naturales al 100 por 100, y los científicos pronto llegaron a apreciar que sus precisas emisiones de radio les hacían los relojes más exactos del universo. Por ejemplo, el 1 de

septiembre de 1974, inmediatamente después de su descubrimiento, se determinó que el periodo de pulsación de PSR 1913+16 era de 0,059029995271 segundos.

En el púlsar binario, la estrella reloj hace más que sólo estar allí girando y emitiendo señales: también da vueltas alrededor de su estrella acompañante en una órbita de gran velocidad. Este movimiento orbital deja una huella característica en el murmullo incesante de pulsos de radio. El ritmo de pulsación, tan regular para un púlsar estático, sufre entonces una deriva en frecuencia. Los astrónomos han analizado minuciosamente cada mínimo detalle de esta variación, examinando las señales intermitentes con una precisión de cincuenta microsegundos. Consideran a PSR 1913+16 una joya astronómica —tan útil e inesperada que ha sido descrita como un regalo del cielo.

Este regalo particular fue entresacado de los datos obtenidos en una búsqueda rutinaria de nuevos púlsares llevada a cabo por un estudiante graduado, Russell Hulse, de la Universidad de Massachusetts en Amherst. Hulse había sido enviado por su director de tesis, un joven profesor de Amherst llamado Joseph Taylor, para pasar el verano en Arecibo en Puerto Rico, en donde se encuentra esculpido el mayor radiotelescopio del mundo. Hulse tuvo fortuna al registrar una débil señal el 2 de julio, ya que estaba apenas por encima del umbral de registro. Despertada su curiosidad por los bips regulares, Hulse regresó en agosto para observar de nuevo el objeto, y al momento quedó estupefacto al descubrir que el periodo había cambiado, y seguía cambiando mientras él observaba. Si el objeto era un púlsar se suponía que sus pulsos serían absolutamente regulares. En septiembre, Hulse había descubierto que las variaciones en el periodo seguían una pauta y comprendió que el púlsar debía formar parte de un sistema binario de estrellas y que la deriva de periodo se debía al movimiento orbital del púlsar. Pronto supo que el cuerpo acompañante era, al igual que el púlsar, otra estrella colapsada, y que en PSR 1913+16 los astrónomos tenían un laboratorio natural casi perfecto para poner a prueba la teoría de la relatividad de Einstein. El descubrimiento fue juzgado lo suficientemente valioso como para que Hulse y Taylor recibieran el premio Nobel de Física de 1993.

Las variaciones meticulosamente registradas de los pulsos procedentes del púlsar binario serían completamente incomprensibles si no fuera por el trabajo de Einstein. Genio arquetípico, jugó un papel único en la historia de la ciencia. De hecho, también él podría ser descrito como un regalo del cielo. Las imágenes populares le retratan con ropas holgadas, una cabellera gris despeinada y una mirada soñadora. Pero el Einstein de nuestra historia actual era un joven de veintiséis años apuesto y vivo, indudablemente prometedor, pero que por el momento no tenía ningún logro verdaderamente sobresaliente en su haber. Y, contrariamente a la leyenda, no era un genio matemático. De hecho, Hermann Minkowski, el tutor de matemáticas de Einstein en la universidad, se quejaba incluso de su pobre dominio de las matemáticas, hasta el punto de describirle como un «perro holgazán». Sin embargo, Einstein poseía una penetrante intuición para la física.

Einstein nació el 14 de marzo de 1879 en la ciudad alemana de Ulm. Su madre, Pauline, era una mujer de buena educación, y su padre, Hermann, era un hombre de negocios de mente práctica. La familia era judía, aunque no practicante, y Albert no recibió una rígida formación religiosa. De hecho, a la edad de cinco años fue a una escuela católica local en Munich, a donde los Einstein se habían trasladado en 1880. Albert no se sintió especialmente a gusto en su escuela elemental y no destacó. El director advirtió a Hermann que era poco probable que Albert tuviera éxito en algo. Aunque era seguro y metódico en matemáticas, Albert no daba ninguna señal real de las formidables proezas científicas que estaban por venir.

A la edad de 10 años, Albert fue trasladado al Luitpold Gymnasium de Munich. Una vez más, no se adaptó bien. Los métodos de instrucción excesivamente formales y el fuerte énfasis en los clásicos no se adecuaban a su temperamento. De hecho, sacó más inspiración de su tío Jakob, el socio de su padre en un negocio bastante precario de ingeniería eléctrica. Jakob fue capaz de despertar la imaginación del muchacho con conversaciones y libros sobre ciencia y matemáticas. En 1894, cuando Albert apenas tenía quince años, Hermann y Jakob decidieron trasladar su negocio a Milán, y dejaron a Albert interno en el Gymnasium para que completara sus tres últimos años de instituto. Duró sólo seis meses. Desanimado e infeliz, decidió escapar. Como consecuencia, fue expulsado formalmente del Gymnasium con el pretexto de que era molesto en clase y poco respetuoso con los profesores.

Presentándose de forma inesperada en Italia, el rebelde Albert anunció a sus atribulados padres que pretendía renunciar tanto a su ciudadanía alemana como a su fe judía. Con respecto a su educación, asistiría al muy respetado ETH —el Eidgenössische Technische Hochschule— en Zurich. Por desgracia suspendió el examen de ingreso y fue enviado en su lugar a una pequeña escuela cantonal en la ciudad suiza de Aarau para un año de clases preparatorias. A finales de 1896, Albert había conseguido finalmente ingresar en el ETH para estudiar ciencia y matemáticas. Al cabo de unos años generalmente agradables como un estudiante típico, brillante pero inclinado a ser testarudo, obtuvo un diploma el 28 de julio de 1900. Su nota media fue un estimable pero no sensacional 5 sobre 6.

En esta época Einstein se convirtió en ciudadano suizo, pero quedó exento del servicio militar a causa de sus pies planos y sus venas varicosas. Tras una breve reunión con su familia en Italia, aceptó un puesto de maestro temporal en una escuela cerca de Schaffhausen. Mientras tanto se había enamorado de una joven serbia llamada Mileva Maric, una estudiante del ETH. A decir de todos, no fue una buena unión. En julio de 1901, Mileva anunció que estaba embarazada y se produjo un gran altercado familiar. En su momento dio a luz a una niña, Lieserl, que pronto fue cedida en adopción y permaneció en un oscuro secreto. Finalmente, Albert y Mileva se casaron y tuvieron dos hijos.

En medio de las dificultades personales que rodearon el embarazo de Mileva, Albert preparaba una tesis doctoral y solicitó con éxito un trabajo permanente en la Oficina de Patentes Suiza en Berna. Desde esta situación inverosímil inició Einstein la fase de su vida científica activa que, dos o tres años más tarde, iba a conmover los fundamentos de la ciencia física. En 1905 —su *annus mirabilis*— Einstein hizo aportaciones significativas en el espacio de unos pocos meses a tres revoluciones importantes en la física. La primera de éstas era la teoría cuántica; la segunda, la mecánica estadística. Las fecundas contribuciones de Einstein se contenían en artículos que explicaban el efecto fotoeléctrico y el movimiento browniano, respectivamente. (El movimiento browniano es el zigzagueo errático de partículas minúsculas suspendidas en un fluido como resultado del bombardeo molecular. Recibe su nombre del biólogo Robert Brown, quien fue el primero en observar el efecto en granos de polen.)

Sin embargo, es por el tercer artículo, y en muchos aspectos el de más largo alcance, por el que Einstein es recordado principalmente. Titulado inocentemente «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento», fue publicado en la revista *Annalen der Physik*. El artículo consistía en varias páginas de razonamiento matemático elemental y se proponía elucidar el comportamiento de las cargas eléctricas en movimiento. Aquellas pocas páginas estaban destinadas a conmocionar a toda la comunidad científica, y a poner en marcha una transformación en nuestra comprensión del mundo que aún no está acabada. En el ojo de la tormenta conceptual que inició Einstein está el tema del *tiempo*. Veremos enseguida que nuestra visión intuitiva y de sentido común del tiempo choca, sin remedio y flagrantemente, con el bip, bip, bip insistente del púlsar binario. Estos pulsos reveladores, tan irregulares como mecánicos, mueven y tejen su pauta matemática en un mensaje tan claro como las doce cifras decimales de precisión que están ligadas a su medida: *el tiempo universal de Newton es una ficción*.

El propio púlsar es un residuo muerto, el corazón de una estrella en otro tiempo brillante que engulló apresuradamente su combustible nuclear, y luego, privada de la fuente vital de calor necesaria para mantener su presión interna, se colapsó. El núcleo continuó colapsándose hasta que su densidad llegó a ser de mil millones de toneladas métricas por centímetro cúbico. Esta es la densidad de materia en el núcleo de un átomo, y el púlsar es esencialmente un núcleo atómico gigantesco: una bola de neutrones. En la jerga, es una «estrella de neutrones». Las estrellas de neutrones son tan compactas que su gravedad es enorme. En su superficie, ¡justed pesaría miles de millones de veces más que en la Tierra! Esta es la razón de que una estrella de neutrones pueda girar frenéticamente sin disgregarse: se conocen algunas que giran a más de mil revoluciones por segundo.

El púlsar binario es inusual porque consiste en *dos* estrellas de neutrones girando cada una alrededor de la otra. Cada una de ellas tiene una masa de 1,4 soles aproximadamente. Habrá muchos otros sistemas binarios semejantes

en el universo, e incluso otros en los que una estrella de neutrones describe una órbita alrededor de un agujero negro. La importancia de PSR 1913+16 para nosotros reside en que el púlsar —el reloj por excelencia— está en un entorno en el que se ve sometido a dos efectos que son profundamente importantes para nuestra comprensión del tiempo: el movimiento y la gravitación.

Adiós al éter

Newton no suponía que el movimiento pudiera afectar al tiempo. Después de todo, si el tiempo es universal no puede depender de que usted, el observador, decida moverse o no. En la visión newtoniana del mundo, el movimiento (como el de las manecillas de un reloj) puede ser utilizado para *calibrar* un tiempo ya existente y que todo lo llena, pero no crearlo ni modificarlo en lo más mínimo.

La hipótesis de Newton de solidez temporal estaba destinada a pasar por graves dificultades. Más pronto o más tarde, sus deficiencias se hubieran hecho manifiestas a los científicos de una forma u otra. Lo que realmente sucedió es que algunos sucesos alrededor de comienzos de siglo, tanto rarezas experimentales como paradojas teóricas, llevaron las cosas a un punto decisivo en el campo del electromagnetismo. Se trataba del movimiento de partículas eléctricamente cargadas que intrigó a Einstein en aquellos primeros años en la Oficina de Patentes. Para apreciar cuál era el problema, usted tiene que comprender un concepto que para Newton era tan importante como su tiempo universal: la *relatividad* del movimiento.

Imagínese que está dentro de una caja en el espacio exterior. Usted no tiene peso, y no tiene sensación de movimiento. ¿Qué significa decir que usted se está moviendo? Usted puede mirar a través de una ventana de la caja y quizá vea una cápsula espacial que cruza veloz. ¿Significa esto que usted se está moviendo, o es la cápsula espacial la que se está moviendo, o ambos? Una conversación por radio con el astronauta de la cápsula no sirve de ayuda: «Yo tampoco tengo sensación de movimiento», nos dice. Usted está rodeado por el espacio, pero no hay modo de que usted pueda decir que se está moviendo *a través* del espacio, porque el espacio no contiene ningún mojón respecto al que usted pueda calibrar su movimiento. Tiene un sentido preciso decir que usted se está moviendo *con respecto* a la cápsula espacial, pero no parece haber ningún significado ligado a la noción de que usted se está moviendo *absolutamente a través del espacio*.

Newton, y Galileo antes que él, comprendió que el movimiento a velocidad uniforme en una dirección fija es puramente relativo. Por el contrario, los *cambios* en el movimiento tienen efectos absolutos. Si la caja dentro de la que usted se encuentra es acelerada repentinamente, o gira hacia un lado, usted saldrá lanzado y sentirá la acción de varias fuerzas; será muy apreciable. Pero ninguno de estos efectos acompañan a un movimiento uniforme en línea recta. Por

ejemplo, cuando usted está dentro de un avión no puede decir si éste está en reposo en el suelo o si está volando en el aire a velocidad constante. Aparte de la vibración, la sensación es exactamente la misma. Sólo mirando a través de la ventana y viendo si usted se está moviendo con respecto al suelo puede distinguir la diferencia.

Newton incorporó este «principio de relatividad» en sus leyes del movimiento, y seguía siendo fundamental para la teoría física a comienzos de siglo. Para Einstein también representaba un principio básico de la física que debía ser mantenido a toda costa. Pero había una pega. Las leyes del electromagnetismo, que describen el comportamiento de partículas eléctricamente cargadas y el movimiento de ondas electromagnéticas tales como la luz y las ondas de radio, no parecían acomodarse al principio de relatividad, pese a que dichas leyes funcionaban de forma espectacularmente buena. Elaborada por Michael Faraday y James Clerk Maxwell a mediados del siglo XIX, la teoría electromagnética había conducido a la unificación de la electricidad, el magnetismo y la óptica, y presagiaba la moderna era de la electrónica. ¿Cómo algo tan *correcto* podía fallar en un aspecto tan básico?

El conflicto alcanzó su apogeo con el tema de la propagación de la luz. El principio de relatividad implicaba que la velocidad de la luz debería variar de acuerdo con el movimiento del observador respecto a un pulso de luz: si usted corre hacia el pulso, debería encontrarlo más rápido que si usted trata de alejarse de él. La velocidad del pulso de luz debería tener significado sólo con respecto al sistema de referencia del observador. Por el contrario, la teoría electromagnética daba un valor fijo específico para la velocidad de la luz —alrededor de trescientos mil kilómetros por segundo— sin lugar para variaciones dependientes del movimiento del observador. La confusión reinaba. Curiosamente, Einstein se había sentido intrigado con este problema ya cuando era un quinceañero, imaginando que podía correr junto a una onda luminosa. Si mantenía el paso con la onda, ¿no sería capaz de observar los campos eléctrico y magnético ondulantes congelados en el espacio a su alrededor? Pero eso tenía que ser absurdo, puesto que semejantes campos *estáticos* no pueden existir en el espacio vacío sin que haya cargas eléctricas o imanes próximos que los produzcan. (Los campos eléctricos *variables* pueden producir campos magnéticos, y viceversa.)

La solución favorita para este conflicto consistía en apelar al éter, un concepto que mencioné brevemente en el Prólogo. Se suponía que este medio hipotético permeaba todo el cosmos, llenando el espacio entre los cuerpos materiales. Los físicos podían afirmar entonces que las ondas de luz viajaban a la velocidad constante citada respecto a este éter, de forma similar a como las ondas sonoras viajan a una cierta velocidad a través del aire. Ahora bien, este éter era evidentemente algo muy peculiar, puesto que aparentemente no ejercía ningún efecto mecánico notable —ninguna fuerza o arrastre por fricción— sobre los cuerpos que se movían a través de él. La Tierra, por ejemplo, podía atrave-

sar felizmente el éter en su viaje alrededor del Sol sin sentir la más mínima resistencia; y era bueno que así fuera, o se frenaría y caería al interior del Sol. Además de ser algo misterioso, el éter era también un concepto poco atractivo porque violaba el principio de relatividad: implicaba que a un cuerpo podría atribuírsele un tipo de movimiento absoluto en el espacio, incluso cuando se movía uniformemente, si se medía a qué velocidad se movía a través del éter.

Fea o no, la idea de un éter estaba ampliamente aceptada. Incluso hoy la gente se refiere a veces a las señales de radio como «ondas en el éter», y los espiritualistas hablan deliberadamente de «cuerpos etéreos». Pero si el éter dejaba de afectar al movimiento de los objetos físicos, ¿cómo iba a demostrarse su existencia? Hay una regla en la ciencia que dice que no se deberían introducir entidades adicionales a menos que ejerzan algún efecto físico observable. Una sustancia invisible que nunca se manifiesta en *ningún* experimento es un concepto completamente redundante. Sin embargo, en el caso del éter parecía haber un modo de revelar su presencia fantasmal. Aunque no afectaba al movimiento de la Tierra a través del espacio, la existencia de un éter era relevante para el movimiento de la luz. Imaginemos la Tierra deslizándose en silencio a través del éter invisible, a una cierta velocidad en una dirección particular. Supongamos ahora que hay dos haces de luz en direcciones opuestas, uno que avanza de frente hacia la Tierra a través del éter, y el otro que se aleja de la Tierra en la misma dirección en la que marcha ésta. Debido al movimiento terrestre, la velocidad del primer haz luminoso, medida desde la Tierra, debería ser mayor que la del segundo haz. Por supuesto, nadie podría decir a qué velocidad se está moviendo la Tierra a través del espacio (es decir, a través del éter), pero sabemos que da vueltas alrededor del Sol a aproximadamente 100.000 kilómetros por hora, de modo que era posible una velocidad a través del éter de al menos este orden.

A finales de los años noventa del siglo pasado, el físico norteamericano Albert Michelson, ayudado por Edward Morley, se propuso medir la velocidad de la Tierra a través del espacio utilizando haces luminosos. Para conseguir esta hazaña construyeron un aparato que dividía un simple haz de luz en dos haces perpendiculares. Cada uno de estos haces era dirigido hacia un espejo y reflejado de vuelta. Los haces reflejados se recombinaban luego y se examinaban a través de un microscopio. La teoría era esta. La Tierra viaja a través del éter, de modo que el éter deja una especie de estela continua al cruzarse con nosotros. Nosotros no lo sentimos, pero la luz sí lo hace. Un haz luminoso que viaja contra la corriente de éter se moverá más lento con respecto a la Tierra, tal como he explicado, que uno enviado a favor de la corriente. Un haz de luz perpendicular a la corriente iría a una velocidad intermedia. Generalmente, cuando se envían pulsos de luz de ida y vuelta en diferentes direcciones, éstos volverán en instantes ligeramente diferentes, debido a estas diferencias de velocidad relativa, al laboratorio.

Michelson necesitaba comparar los tiempos de viaje de los haces para me-

dir la velocidad de la corriente de éter. Así es como lo hizo. La luz consiste en ondas. Cuando el haz se divide, las ondas de cada haz parten en fase: cresta con cresta, valle con valle. Pero cuando regresan, si los tiempos de viaje son ligeramente diferentes, irán en oposición de fase. En el peor de los casos, volverán cresta con valle, valle con cresta. Cuando los haces se recombinan, este desajuste se manifiesta: las crestas cancelan los valles, y los valles cancelan las crestas. El efecto es reducir drásticamente la intensidad de la luz. Este fenómeno se denomina «interferencia destructiva». Así, registrando la intensidad de la luz, y orientando el aparato en diferentes direcciones (los experimentadores no tenían idea de en qué dirección estaba fluyendo la corriente de éter), Michelson esperaba ver interferencia destructiva y medir la velocidad de la estela del éter. Esto permitiría, a su vez, atribuir un valor a la velocidad de la Tierra a través del espacio.

El resultado del experimento de Michelson-Morley es ahora un clásico en la historia de la ciencia. El experimento no pudo revelar *ninguna evidencia en absoluto* de una corriente de éter. Más exactamente, la velocidad de la corriente de éter no difería de cero de forma medible. Si existe un éter, la Tierra está más o menos en reposo en el mismo. Puesto que esto implica que el Sol y las estrellas tendrían que girar alrededor de la Tierra, al modo de la cosmología precopernicana, no pasó mucho tiempo antes de que los físicos, siguiendo el camino de Einstein, decidieran que el éter simplemente no existía.

Una solución a tiempo

¿No era esto una revolución? ¿Se puede afirmar realmente que el tiempo estaba maduro para una revolución tan radical como esta? Probablemente es la mayor mutación nunca habida en la historia del pensamiento humano.

JEAN ULLMO

¿Cómo puede reconciliarse, en ausencia de un éter, el principio de relatividad con el comportamiento de la luz y otros fenómenos electromagnéticos? Aquí fue donde Einstein dejó su huella. Antes de describir su extraña y revolucionaria solución al enigma, permítaseme decir algo sobre su forma de abordar los problemas físicos. Einstein era en el sentido más profundo un físico teórico. Aunque, por supuesto, él conocía la física experimental, valoraba mucho más el razonamiento abstracto. No está claro que él conociese, o que le preocupase mucho, el ahora famoso experimento de Michelson y Morley. Simplemente mencionaba de pasada en su artículo de 1905 sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento «los infructuosos intentos para descubrir cualquier movimiento de la Tierra relativo al “medio luminífero”».¹

Einstein ha sido descrito como un pensador «deductivo». Con esto se quie-

re decir que él partía de algunos grandes principios de carácter general, que creía que deben ser verdaderos en el mundo real debido a su atractivo filosófico o su imperativo lógico, y luego intentaba proyectarlos en el desordenado mundo de la observación y el experimento para deducir las consecuencias de dichos principios. Si las consecuencias aparecían extrañas y poco intuitivas a primera vista, entonces tanto mejor. La humanidad no tiene la garantía de la Madre Naturaleza de que sus secretos se adecuarán a la intuición humana o a las nociones de sentido común. Tanto confiaba Einstein en la superioridad del razonamiento humano sobre la observación empírica que cuando en cierta ocasión se le preguntó qué hubiera dicho si su teoría no hubiera sido confirmada por la observación respondió: «Lo hubiera sentido por el Señor. La teoría es correcta de todas formas».²

En 1905, Einstein estaba convencido de que el principio de relatividad debía ser mantenido a toda costa. En esto estaba muy influido por la obra del filósofo y científico austriaco Ernst Mach, más conocido por dar su nombre a los «números de Mach», que relacionan las distintas velocidades con la velocidad del sonido. Mach pertenecía a la denominada escuela positivista de filosofía, que sostenía que la realidad debe ser investida sólo de aquellas cosas que pueden ser inequívocamente observadas o detectadas de algún modo. Para Mach, *todo* movimiento tenía que ser relativo (no sólo el movimiento uniforme). La idea de que un cuerpo tal como la Tierra pudiera estar moviéndose «realmente» a través del espacio invisible se desechaba como carente de significado. Decimos que un cuerpo se está moviendo, afirmaba Mach, comparando su posición con otros cuerpos, no imaginándolo deslizándose a través de la nada.

Por el contrario, Einstein no quería rechazar la bella y exitosa teoría de la electrodinámica, con su valor único para la velocidad de la luz. De este modo dio un paso atrevido y retuvo *tanto* la relatividad del movimiento uniforme *como* la constancia de la velocidad de la luz como principios fundadores de una teoría completamente nueva de la relatividad. Ahora bien, estos dos requisitos parecían ser completamente contradictorios. Si el movimiento es relativo, entonces un pulso luminoso debería tener una velocidad que varía en relación al movimiento del observador; pero entonces no tendría una velocidad constante. La única forma de llevar a cabo una reconciliación era abandonar algo que había sido asumido sin cuestionamiento desde el comienzo de la ciencia: la universalidad del espacio y el tiempo. Es fácil ver por qué es necesario este paso: es la única forma en la que dos observadores que se están moviendo uno con respecto al otro pueden ver el *mismo* pulso luminoso moviéndose a la *misma* velocidad con respecto a cada uno de ellos.

Permítanme tratar de ilustrar este punto en detalle. Imaginemos que se enciende un flash luminoso momentáneamente y se envía un pulso luminoso al espacio. La luz se alejará a 300.000 kilómetros por segundo. Ahora salta usted al interior de un cohete espacial y parte tras él. Supongamos que el cohete alcanza una velocidad de 200.000 kilómetros por segundo con respecto a la Tie-

rra. El sentido común diría que el pulso luminoso se está alejando ahora de usted a sólo 100.000 kilómetros por segundo. Pero, según Einstein, no es así: el pulso se aleja a 300.000 kilómetros por segundo *tanto* cuando usted perme- nece en la Tierra *como* cuando está corriendo tras el pulso a 200.000 kilóme- tros por segundo. Cualquiera que sea el sistema de referencia en el que mide la velocidad del pulso —ya sea la Tierra o el cohete—, ¿usted obtiene la misma respuesta! Por mucho esfuerzo que ponga en perseguir al pulso luminoso, us- ted no puede reducir su velocidad relativa ni siquiera en un kilómetro por se- gundo. Análogamente, si el pulso luminoso viene hacia usted, se cruzará a la misma velocidad ya esté usted en reposo en la Tierra o avanzando hacia el pul- so luminoso a gran velocidad. Un corolario muy importante de esta hipótesis es que el cohete espacial no puede de ninguna manera viajar más rápido que la luz, pues ello requeriría que el cohete alcance a un pulso luminoso que se aleja, contradiciendo la hipótesis de que la luz siempre se aleja del cohete a la misma velocidad. Puesto que el mismo principio se aplica a todos los obser- vadores y sistemas de referencia, la teoría de Einstein implica que ningún obje- to físico puede romper la barrera de la luz.

¿Cómo podemos dar sentido al aparentemente absurdo estado de cosas des- crito hasta ahora? La velocidad es la distancia recorrida por unidad de tiempo, de modo que la velocidad de la luz sólo puede ser constante en todos los siste- mas de referencia si las distancias y los intervalos de tiempo son de algún modo *diferentes* para diferentes observadores, dependiendo de su estado de movimien- to. Las cuestiones técnicas no nos interesan por el momento. De hecho, las ma- temáticas son bastantes elementales (de un nivel de escuela secundaria), y en su artículo de 1905 Einstein presentaba un conjunto de fórmulas que relacio- nan las longitudes e intervalos de tiempo tal como se miden en un sistema de referencia con sus valores (diferentes) correspondientes cuando se observan desde otro sistema de referencia. Más adelante daré algunos ejemplos explícitos de cómo funcionan estas fórmulas.

El principal resultado de su nueva teoría de la relatividad fue así la predic- ción de que el tiempo y el espacio no están simplemente *ahí*, como Newton había proclamado, fijos de una vez por todas de una forma absoluta y univer- sal que comparten todos los observadores. En lugar de ello, son en cierto senti- do *malleables*, capaces de estirarse y contraerse según el movimiento del obser- vador. Einstein llegó a esta idea de tiempo flexible y espacio elástico de forma bastante repentina. Había estado meditando sobre el problema del movimiento de partículas cargadas durante algunos meses, y un día fue a ver a Michele Bes- so, su buen amigo de la Oficina de Patentes, para utilizarle como una caja de resonancia. Después de su extensa discusión con Besso, Einstein descubrió que él «podía repentinamente comprender la cuestión». Visitó a Besso al día siguiente y le dijo: «Gracias. He resuelto completamente el problema». Lo que Einstein había decidido era que la noción de tiempo basada en el sentido común necesi- taba ser reemplazada:

Mi solución concernía realmente al propio concepto de tiempo, esto es, que el tiempo no está absolutamente definido sino que existe una conexión inseparable entre el tiempo y la velocidad de la señal [luminosa].³

Cinco semanas más tarde, el artículo seminal fue escrito y presentado para su publicación.

¿Tenía razón Einstein? El púlsar binario no fue ni mucho menos la primera oportunidad de verificar la teoría de la relatividad de Einstein, pero decididamente es una de las mejores. El propio púlsar se mueve a aproximadamente 300 kilómetros por segundo con relación a su compañera. El sistema como un todo se mueve mucho más lentamente con respecto a la Tierra, de modo que la estrella de neutrones que nos interesa avanza a veces hacia nosotros, y a veces se aleja. Puesto que los pulsos de radio que envía viajan a la velocidad de la luz (la radio y la luz son ondas electromagnéticas y viajan a la misma velocidad), aquí hay un sistema que combina todas las características relevantes de un experimento para comprobar la teoría de la relatividad de Einstein: cambios de movimiento relativo, señales luminosas, relojes. Las señales confirman que, incluso después de viajar durante 1.500 años, los pulsos procedentes de la estrella cuando se está acercando a nosotros no alcanzan a los que proceden de la porción de la órbita en que se está alejando, lo que demuestra que la velocidad de la luz es independiente de la velocidad de la fuente. Los efectos de las distorsiones del espacio y del tiempo predichos por la teoría de Einstein son también fácilmente medibles en la pauta precisa de los bips. El análisis de las señales es complicado, puesto que se ven afectadas por la gravitación tanto como por el movimiento, pero los astrónomos lo han calculado todo y pueden desenredar los diversos efectos. El resultado final es que las fórmulas de Einstein quedan confirmadas con una precisión muy alta. El tiempo es realmente relativo y puede ser distorsionado por el movimiento.

INTERLUDIO

El correo de la mañana reposa abierto en mi mesa. Dispongo de media hora de precioso tiempo para ojearlo. Entre el montón usual de cartas, circulares y memoranda hay tres gruesos manuscritos que llevan remites privados: Inglaterra, California y Australia Occidental. Todos han llegado sin ser solicitados y acompañados de cartas que empiezan con el mismo tono: «Aunque yo no soy científico ...». Hojeo las páginas de estos manuscritos con cautela. Como muchos colegas, recibo varios cada mes. Hoy son similares en su estilo y contenido. Dos tienen algunas matemáticas, manuscritas, a un nivel de escuela primaria. El mensaje es el mismo: «Einstein se equivocó; yo tengo razón. Por favor, ayúdeme a contarlo al mundo».

Un examen más atento revela las profundas ansiedades de los autores a pro-

pósito del tiempo. ¿Cómo puede ser relativo algo tan básico para nuestra experiencia?, protestan. Eso llevaría seguramente a una paradoja. Algo debe estar equivocado. Los manuscritos contienen diagramas complicados que muestran observadores a toda velocidad provistos de relojes, y cuestiones angustiosas sobre sobre qué tiempo es el correcto y quién está siendo confundido.

El problema consiste en que la cultura occidental no puede despojarse de la creencia en la existencia del tiempo como una entidad real independiente, absoluta y dada por Dios. La gente puede aceptar que los relojes hagan cosas extrañas, y que la mente humana pueda hacer trucos. Pero no quiere atribuir tales fenómenos al propio tiempo, sino sólo a la forma en que experimentamos o medimos el tiempo. ¿Es este el legado de «vivir para el reloj», que es tan característico de la sociedad moderna? En los viejos tiempos, hombres y mujeres estaban en armonía con los ciclos y los ritmos de la naturaleza. No necesitaban relojes digitales para fijar sus citas. Los horarios de trenes son responsables de muchas cosas: llevaron el cronometraje de precisión universal a las vidas de la gente común. Ahora, un error de unos pocos segundos en su reloj podría provocar que usted no llegue al punto importante de las noticias de la tarde, o (al menos en Japón) al tren de la tarde.

Cada vez que leo opiniones discordantes sobre el tiempo, no puedo dejar de pensar en Herbert Dingle, un filósofo británico irascible pero generalmente bien considerado que escribió un libro sobre la teoría de la relatividad de Einstein, titulado Relatividad para todos y publicado en 1922. Llegó a ser catedrático de Historia y Filosofía de la Ciencia en el University College de Londres, y aún debía seguir allí cuando yo era estudiante en el Departamento de Física del UC entre 1964 y 1970. No recuerdo haberme cruzado nunca con el profesor Dingle, aunque probablemente lo hiciese.

En sus últimos años, Dingle empezó a dudar seriamente del concepto de tiempo de Einstein. Tuvo pocas dificultades en convencer a un variopinto grupo de seguidores de lo absurdo del tiempo relativo, y el profesor se propuso aprovechar cualquier ocasión para atacar al estamento científico por su adhesión a la teoría de la relatividad. Se enviaban cartas a los editores en respuesta a rutinarios e inocuos artículos sobre relatividad. Los editores se exasperaron y rechazaron las cartas. Dingle sospechó una conspiración. Escribió artículos para revistas señalando los errores de Einstein y también fueron rechazados. Se habló de oscuras amenazas de acciones legales. La campaña terminó abruptamente con la muerte de Dingle, pero el talante de disenso que él apadrinó sigue vivo, ampliamente extendido y enconado. Yo me pregunto por qué. Einstein debe haber tocado una fibra sensible.

Estirar el tiempo

Como físico teórico que soy, raramente me veo realizando demostraciones en las clases, pero de vez en cuando me llevo un contador Geiger. La demostra-

ción es tan fácil que ni siquiera yo puedo equivocarme. Enciendo el aparato, conecto el volumen y espero. Pronto la audiencia empieza a oír una secuencia aleatoria de clics. Esto es todo. Les digo que el contador Geiger está registrando radiación de fondo, la mayor parte de la cual está producida por rayos cósmicos. Éstos son partículas extraordinariamente energéticas que proceden del espacio y bombardean la Tierra incesantemente. Nadie está absolutamente seguro de qué es lo que las produce, pero si no fuera por la atmósfera que actúa como un escudo, la intensidad sería tan grande que la radiación nos mataría enseguida. Tal como es, la radiación cósmica de fondo induce mutaciones en los organismos biológicos, y eso ayuda a impulsar la evolución, de modo que en cierto sentido nosotros no estaríamos aquí sin ella. Pero demasiada radiación sería una mala cosa.

En cualquier caso, cuando estas partículas energéticas golpean los núcleos de los átomos en la atmósfera superior, producen todo tipo de residuos subatómicos en grandes chaparrones. La mayoría de las partículas creadas se desintegran inmediatamente, pero entre las que viven más tiempo se encuentran las que llevan el nombre de «muones». Un muón es como un electrón, sólo que más pesado. Los muones no interaccionan muy fuertemente con la materia ordinaria y la mayoría de ellos lo hacen cerca del suelo, o a cierta profundidad bajo el suelo. Una buena parte de los clics del contador Geiger son producidos por el paso de muones.

La importancia de mi pequeña demostración en el aula es esta. Si usted tuviera un recipiente de muones recién creados en su banco de laboratorio, entonces al cabo de algunas millonésimas de segundo casi todos ellos se habrían desintegrado en electrones. ¿La razón? Los muones son intrínsecamente inestables y se desintegran con una vida media de unos dos microsegundos. Ahora bien, he mencionado que ningún objeto material puede romper la barrera de la luz, y esto se aplica a los muones tanto como a cualquier otra cosa; la máxima velocidad a la que pueden viajar es a la velocidad de la luz. En algunas millonésimas de segundo la luz viaja menos de un kilómetro, de modo que, comparados con ella, los muones creados por los impactos de los rayos cósmicos a aproximadamente veinte kilómetros de altitud no deberían llegar muy lejos en su camino hacia la Tierra. Pese a todo, el contador Geiger los detecta sanos y salvos al nivel del suelo.

La explicación reside en la dilatación del tiempo. Según la teoría de la relatividad de Einstein, cuando un muón se mueve a una velocidad próxima a la de la luz su tiempo se distorsiona fuertemente. En nuestro sistema de referencia fijo en la Tierra, el tiempo del muón móvil queda considerablemente estirado (dilatado) —quizá en mil veces. En lugar de desintegrarse en unos pocos microsegundos de tiempo terrestre, un muón de rayos cósmicos de alta velocidad puede vivir durante mucho tiempo, lo suficiente como para llegar al suelo. De este modo, los clics del contador Geiger son un testimonio para la audiencia de la realidad de las distorsiones del tiempo.

Al revisar la confirmación experimental del efecto de dilatación del tiempo, quedé sorprendido al descubrir que la primera prueba directa no se realizó hasta 1941, unos treinta y seis años después de que Einstein hubiera predicho este efecto por primera vez. El experimento, una versión mucho más precisa del asunto del muón descrito antes, fue realizado por Bruno Rossi y David Hall de la Universidad de Chicago en dos lugares próximos a Denver, Colorado. Rossi y Hall querían establecer que los muones más rápidos viven más tiempo (tal como los observamos nosotros en el sistema de referencia de la Tierra). Para conseguir esto, desplegaron escudos metálicos con diferentes poderes absorbentes para filtrar los muones lentos, y luego detectaron los supervivientes a dos altitudes diferentes, utilizando un banco de contadores Geiger conectados. Fueron capaces de demostrar que las partículas lentas —a las que curiosamente denominaron «mesotrones»— se desintegraban en un tiempo aproximadamente tres veces menor que las rápidas. Este trabajo pionero fue llevado a cabo mucho después de que otros aspectos de la relatividad especial hubieran sido completamente comprobados y la teoría hubiera sido hace tiempo aceptada por la comunidad física. En particular, la famosa fórmula de Einstein $E = mc^2$, un subproducto bien conocido de la teoría, estaba firmemente establecida en 1941; de hecho, la idea de la bomba atómica, que se basa en esta fórmula, estaba ya bajo investigación en Gran Bretaña.

Por supuesto, los escépticos no van a convencerse de la dilatación del tiempo por unos pocos clics en un contador Geiger. Usted tiene que hacer algo mejor que eso. Dingle, por ejemplo, no estaba impresionado por los experimentos. «No creo que Einstein hubiera considerado estas observaciones en rayos cósmicos como evidencia a favor de su teoría», presumía él.⁴ En 1972, Dingle publicó un angustiado y cáustico ataque a la creencia en el efecto de dilatación del tiempo en particular, y al engaño del estamento científico en general, en un libro titulado *Science at the Crossroads* (Ciencia en la encrucijada), enteramente dedicado a arrojar basura sobre el tiempo de Einstein. «Es imposible creer que hombres con inteligencia para conseguir los prodigios de la moderna tecnología pudieran ser tan estúpidos», decía con rabia.⁵ Uno de los «hombres» que tanto irritaban a Dingle era nada menos que el eminente ganador del premio Nobel sir Lawrence Bragg, durante algún tiempo director del Laboratorio Cavendish en Cambridge y de la Royal Institution en Londres. Bragg era un físico australiano tranquilo y metódico, formado en la Universidad de Adelaida, donde yo trabajo ahora, que emigró a Inglaterra en 1908. Junto con su padre, William Henry Bragg, Lawrence Bragg desarrolló la importante técnica de cristalografía de rayos X, que se mostró de valor incalculable para develar la estructura de los cristales y, más tarde, de las moléculas orgánicas. El pobre sir Lawrence, en el curso de su correspondencia con Dingle, cometió la imprudencia de aludir al hecho de que los rayos cósmicos parecían durar lo suficiente, para los observadores en la superficie de la Tierra, como para llegar al suelo. Esto desató la ira de Dingle, quien se opuso con firmeza al «error ele-

mental» de Bragg, señalando lo fácil que era caer en el hábito de utilizar palabras como «masa», «longitud» y «tiempo» para «partículas hipotéticas» de la misma forma que en la vida diaria. «Los físicos han olvidado que su mundo es metafórico —corregía— e interpretan el lenguaje literalmente.»⁶

Hay que admitir que muchos profanos comparten el escepticismo de Dingle acerca de sacar inferencias profundas de una cadena de razonamientos matemáticos, en este caso concerniente a partículas «hipotéticas» que no pueden ver y que sólo pueden ser detectadas con la ayuda de complicada tecnología. Si el tiempo se dilata realmente, dicen ellos, observémoslo en relojes *reales*. Quiso la suerte que tan sólo algunos meses antes de que apareciese el polémico opúsculo de Dingle, un par de físicos norteamericanos consiguiesen hacer precisamente eso.

En octubre de 1971, J. C. Hafele, de la Universidad Washington en San Luis, y Richard Keating consiguieron tomar en préstamo cuatro relojes atómicos del Observatorio Naval de los Estados Unidos, donde Keating trabajaba. Se trataba de relojes de haces de cesio contruidos por Hewlett-Packard, semejantes a los que se utilizan para producir nuestras señales horarias. Difícilmente puede uno acercarse más al lenguaje «cotidiano» de Dingle. Hafele y Keating cargaron los relojes en aviones de líneas aéreas comerciales e intrépidamente volaron con ellos alrededor del mundo, primero hacia el este y luego hacia el oeste. Puesto que los aviones vuelan a menos de una millonésima de la velocidad de la luz, la distorsión del tiempo a bordo era realmente muy pequeña —aproximadamente de un microsegundo por día de vuelo. De todas formas, una variación de este orden era perfectamente detectable por los relojes atómicos, y el experimento, que probablemente causó consternación entre los otros pasajeros y perplejidad entre la tripulación, dio los siguientes resultados. En el viaje hacia el este, los cuatro relojes regresaron a América con un retraso promediado de 59 nanosegundos (milmillonésimas de segundo) con respecto a un conjunto de relojes atómicos estándar que permanecieron en el Observatorio. En el viaje hacia el oeste, los relojes fueron en promedio 273 nanosegundos más rápidos. La razón para la diferencia este-oeste es que, como Einstein señaló en su artículo original, la rotación de la Tierra produce también una dilatación del tiempo. Cuando se eliminó el efecto de la rotación de la Tierra, la dilatación del tiempo producida por el movimiento de los aviones confirmó la fórmula de Einstein.

Para aquellos lectores que estén interesados, la citada fórmula es fácil de dar. Usted toma la velocidad, la divide por la velocidad de la luz, eleva el resultado al cuadrado, lo resta de uno y finalmente extrae la raíz cuadrada. Por ejemplo, supongamos que la velocidad es de 240.000 kilómetros por segundo. Dividiendo ésta por la velocidad de la luz se obtiene 0,8; elevándolo al cuadrado da 0,64, restándolo de 1 se obtiene 0,36 y sacando la raíz cuadrada se obtiene la respuesta de 0,6. De este modo, a una velocidad de 240.000 kilómetros por segundo, o el 80 por 100 de la velocidad de la luz, los relojes se frenan en un

factor de 0,6, lo que significa que van al 60 por 100 de su velocidad normal, o a 36 minutos a la hora. He escogido estos números porque los cálculos pueden hacerse de memoria.

El problema con los relojes reales, incluso los relojes atómicos, es que son molestos y complicados. Una vez que ha decidido aceptar que el efecto de dilatación del tiempo es real, usted puede creer que los rayos cósmicos y otras partículas de alta velocidad también se manifiestan como se ha afirmado. Es decir, que, diga lo que diga Dingle, nuestro uso cotidiano de palabras tales como «reloj» y «tiempo» puede ser realmente fiable aplicado a estas entidades subatómicas indirectamente observadas. Entonces tiene sentido verificar la fórmula de Einstein utilizando muones en lugar de relojes atómicos, debido a las velocidades y precisión mayores que pueden alcanzarse. En 1966, un grupo de físicos del laboratorio europeo del acelerador de partículas cerca de Ginebra, conocido como CERN, produjo algunos muones artificialmente y los inyectó en un tubo de vacío en forma de anillo donde circulaban al 99,7 por 100 de la velocidad de la luz. Esto tenía el efecto de estirar el tiempo de los muones en un factor de aproximadamente doce con respecto al laboratorio, de modo que vivían unas doce veces más de lo que lo hubieran hecho en reposo. La naturaleza controlada del experimento significaba que la fórmula de dilatación del tiempo de Einstein podía ser verificada con una precisión de un 2 por 100. Por supuesto, dio la respuesta correcta. En 1978 se llevó a cabo una versión mejorada del experimento con muones que se movían aún más próximos a la velocidad de la luz, siendo estirado su tiempo de vida en un factor de veintinueve.

Los experimentos no dejan la menor sombra de duda: los relojes se ven afectados por el movimiento. Pero ¿por qué los físicos insisten en concluir que *el tiempo* está estirado? La respuesta simple es: el tiempo (al menos para el físico) es lo que miden los relojes. Por supuesto, para ser consistentes debemos suponer que todos los relojes son afectados por el movimiento exactamente de la misma forma; de otro modo estaríamos inclinados a atribuir el efecto a los relojes más que al propio tiempo. Bien; por lo que podemos decir, todos los relojes se ven igualmente afectados (incluyendo la actividad cerebral y, por lo tanto, la estimación temporal de los observadores humanos). Esto debe ser así si el principio de relatividad es válido; de lo contrario, no tendríamos medio de determinar si algunos relojes se están moviendo o no —porque los relojes que fueran afectados de forma diferente por el movimiento perderían la sincronía. Si usted quiere abandonar *dicho* principio, entonces todas las apuestas sobran.

El enigma de los gemelos

Hasta aquí todo va bien. Pero ahora tropezamos con un enigma. Si el movimiento de los relojes es relativo, entonces ¿no será también relativo el efecto de dilatación del tiempo? Supongamos que tenemos dos relojes, A y B, cada

uno de ellos llevado por un observador humano que se mueve con respecto al otro. En el sistema de referencia de A, es el reloj B el que se está moviendo y, por lo tanto, se retrasa por la dilatación del tiempo. Pero en el sistema de referencia de B, es A el que se está moviendo, y por consiguiente se retrasa. De modo que cada observador ve que ¡el *otro* reloj se retrasa! ¿Cómo puede ser esto? Parece una paradoja. Si A se retrasa, debe ir por detrás respecto al reloj B. Pero si B se retrasa, A debe *adelantar* con respecto a B. ¿Cómo puede A estar al mismo tiempo retrasado y adelantado con respecto a B?

Esta era, en pocas palabras, la dificultad de Dingle. Como sarcásticamente señaló, «no se requiere ninguna superinteligencia para ver que esto es imposible».⁷ El problema se conoce a menudo como «la paradoja de los gemelos», debido a la siguiente manera de expresarlo. Imaginemos un par de gemelas Ann y Betty. Betty parte en un cohete espacial a una velocidad próxima a la velocidad de la luz y vuelve a la Tierra algunos años más tarde. Ann ha permanecido aquí. Visto desde la Tierra, el tiempo de Betty se ha frenado, de modo que, cuando Betty regresa, Ann debería ser más vieja que Betty. Pero visto desde el cohete espacial, es la Tierra la que se está moviendo, de modo que el tiempo de Ann se ha frenado, y a su regreso Betty debería encontrar que es *ella* la más vieja. Sin embargo, ambas explicaciones no pueden ser correctas: cuando las gemelas se reúnen de nuevo, Betty debería ser o bien más joven o bien mayor que Ann, pero no las dos cosas. De aquí la afirmación paradójica.

De hecho, no hay paradoja, como comprendió rápidamente Einstein, quien planteó de pasada por primera vez el problema de los gemelos en su artículo de 1905. La resolución viene del hecho de que las dos perspectivas, la de Ann y la de Betty, no son en realidad completamente simétricas. Para llevar a cabo su viaje, Betty debe acelerar a partir de la Tierra, navegar a velocidad uniforme durante un tiempo, luego frenar, dar la vuelta, acelerar de nuevo, navegar algo más, y finalmente frenar otra vez para aterrizar en la Tierra. Ann simplemente permanece inmóvil. Todas las maniobras de Betty, aceleración y deceleración, rompen la simetría entre los dos conjuntos de observaciones. El principio de relatividad, recordémoslo, se aplica al movimiento *uniforme*, y no a las aceleraciones. Una aceleración no es relativa: es absoluta. Teniendo esto en cuenta, es *Betty* quien envejece menos. A su vuelta, Ann será más vieja.

Es importante darse cuenta de dos cosas. Primera, el efecto de las gemelas es un efecto real, no sólo un experimento mental. Segunda, esto no tiene nada que ver con el efecto del movimiento sobre el proceso de envejecimiento. Usted no debe imaginar que los años pasados en el cohete espacial son de algún modo más agradables para Betty debido a su confinamiento o movimiento a través del espacio. Supongamos para conveniencia del argumento que Betty parte el año 2000 y regresa el 2020. Ann habrá experimentado veinte años durante la ausencia de Betty, y por supuesto habrá envejecido veinte años como resultado. Si Betty hubiera viajado a 240.000 kilómetros por hora, entonces, según la fórmula de Einstein, el viaje sólo duraría *doce* años en su sistema de referencia.

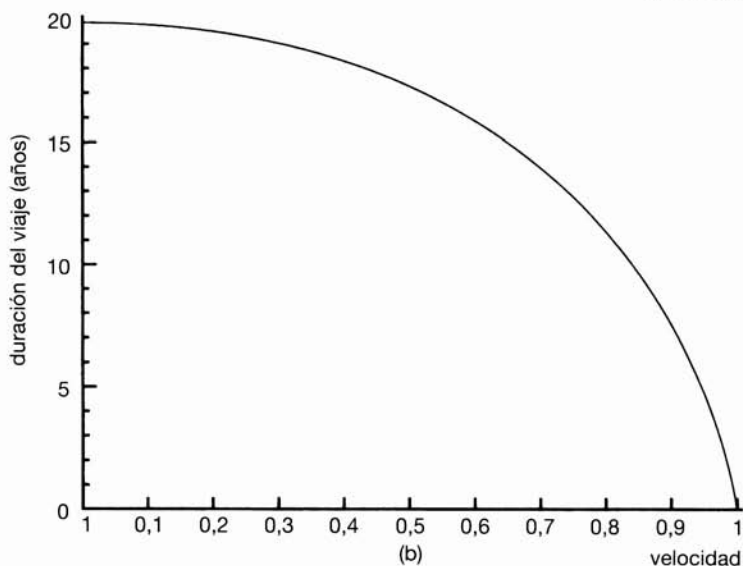
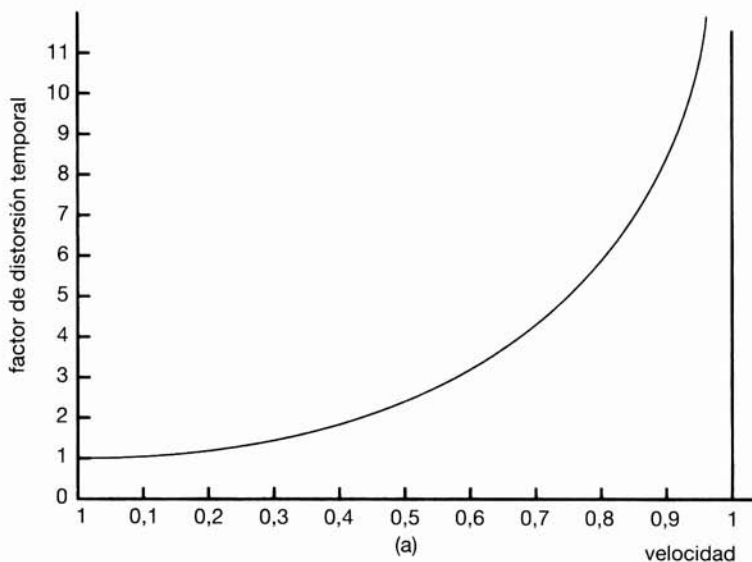
Betty regresaría habiendo experimentado realmente doce años, y habiendo envejecido precisamente doce años, en el año 2020 de la Tierra. Ella se sorprendería de que hayan pasado veinte años terrestres durante *sus* doce años, pero el envejecimiento de su hermana se lo manifestaría.

La mejor manera de ver el experimento de las gemelas es en términos de sucesos. Hay dos sucesos delimitadores: la partida de Betty de la Tierra y el regreso de Betty a la Tierra. Ambas, Ann y Betty, deben de estar de acuerdo en cuándo suceden estos sucesos, puesto que las dos juntas son testigos. Se da entonces el caso de que veinte años separan los sucesos para Ann, mientras que para Betty los separan doce años. No hay inconsistencia en esto, a pesar de lo que Dingle pueda haber dicho. Usted sólo tiene que aceptar que diferentes observadores experimentan diferentes intervalos de tiempo entre los mismos dos sucesos. No hay una diferencia de tiempo fija entre los sucesos, no hay duración «real», sólo diferencias de tiempo *relativas*. Hay un tiempo de Ann y un tiempo de Betty, y no son iguales. Ni Ann ni Betty tienen razón ni están equivocadas en sus cálculos; sucede simplemente que difieren entre sí.

Permítame tratar de darle una idea mejor de los números implicados. Supongamos que usted, el lector, es cordialmente invitado a realizar un viaje semejante en cohete, partiendo en el 2000 y regresando en el 2020. A usted se le da la oportunidad de elegir lo rápidamente que quiera «llegar» a la Tierra el año 2020, lo que determinará su velocidad con respecto a la Tierra. Si a usted le apetece tardar diez años (es decir, comprimir veinte años en diez), tiene que viajar a un 86 por 100 de la velocidad de la luz. Para reducir la duración a dos años, usted tiene que conseguir un 99,5 por 100 de la velocidad de la luz. He representado gráficamente esta relación en la figura 2.1. Nótese cómo, cuanto más se acerca usted a la velocidad de la luz, más corto es el «viaje» entre la Tierra en el año 2000 y la Tierra en el año 2020. Los muones en el anillo de almacenamiento del CERN podrían hacerlo en unos pocos meses —si pudieran vivir tanto tiempo.

¡Altol, protesta el escéptico con una consideración cómplice para los Dingle de este mundo, introduzcamos un poco de sentido común. Supongamos que usted hiciera realmente este viaje en cohete; ¿qué vería en realidad? ¿Parecería que el reloj de la Tierra va más lento, o más rápido, o qué? ¿Cómo saben los relojes que el cohete sale de viaje y regresa finalmente, rompiendo de este modo la simetría? ¿Cuál de los relojes es el correcto?

Resulta notable que, casi un siglo después de que Einstein descubriera la relatividad del tiempo, la gente aún se asusta con la idea y sigue planteando las mismas objeciones. Incluso cuando obtienen una explicación completa, muchos profanos simplemente no la creen. De modo que vamos a echar una buena mirada a un ejemplo específico para tratar de clarificar la cuestión de una vez por todas. Si a usted no le gustan las discusiones técnicas, le sugiero



2.1. Efecto de dilatación temporal. El gráfico (a) muestra el factor de distorsión temporal (es decir, el factor en el que se frena un reloj) en función de la velocidad, expresada ésta como una fracción de la velocidad de la luz. Para velocidades lentas la distorsión temporal es pequeña, pero a medida que la velocidad se aproxima a la velocidad de la luz, la curva se dispara hacia el extremo superior del gráfico, haciéndose infinita en la propia velocidad de la luz. El gráfico (b) muestra cómo la duración del vuelo de un cohete, experimentado en la nave, disminuye con la velocidad. El vuelo dura veinte años observado desde la Tierra.

que se salte el resto de esta sección. Sin embargo, sólo se necesita alguna noción de aritmética elemental más un poco de imaginación.

Betty va a dejar la Tierra en el año 2000 y viaja en un cohete espacial hasta una estrella situada a ocho años-luz (medidos en el sistema de referencia de la Tierra) a una velocidad de 240.000 kilómetros por segundo. Para simplificar los cálculos, despreciaré los periodos que pasa la nave acelerando y frenando (es decir, trataré estos periodos como si fueran instantáneos), y también supondré que Betty no dedica ningún tiempo a hacer turismo cuando llega a la estrella. Alcanzar el 80 por 100 de la velocidad de la luz en un tiempo despreciable implica una aceleración enorme, que sería fatal para un ser humano real, pero esto es accidental para el argumento. Podría incluir fácilmente un tratamiento más realista de la aceleración, pero sería al precio de hacer la aritmética más complicada: las conclusiones globales no se verían afectadas.

En primer lugar, déjenme calcular la duración total del viaje tal como la predice Einstein para cada gemela. Al 80 por 100 de la velocidad de la luz, se necesitan diez años para recorrer ocho años luz, de modo que Ann, en la Tierra, encontrará que Betty regresa a la Tierra el año 2020. Betty, a su regreso, está de acuerdo en que es el año 2020 en la Tierra, pero insiste en que sólo han pasado doce años para ella, y su reloj del cohete —un reloj atómico estándar cuidadosamente sincronizado antes de despegar con un reloj idéntico al de Betty en la Tierra— confirma esta afirmación: en él se lee 2012.

Supongamos ahora que equipamos a nuestras gemelas con potentes telescopios de modo que cada una de ellas puede observar el reloj de la otra durante el viaje y ver por sí mismas lo que está pasando. El reloj terrestre de Ann funciona regularmente, y Betty lo mira a través de su telescopio mientras ella viaja por el espacio. Según Einstein, Betty debería ver el reloj de Ann marchando al 60 por 100 del ritmo de su propio reloj. En otras palabras, se supone que Betty ve que durante una hora de tiempo del cohete, el reloj de la Tierra avanza sólo treinta y seis minutos. En realidad, ella ve que marcha incluso más lento. La razón reside en un efecto extra, no directamente relacionado con la relatividad, que normalmente se deja fuera de las discusiones de la paradoja de los gemelos. Resulta fundamental incluir el efecto extra si usted quiere entender lo que ven realmente las gemelas.

Permítanme explicar qué causa este frenado extra. Cuando Betty mira a la Tierra, ella no la ve como es en ese instante, sino como era cuando la luz dejó la Tierra algún tiempo antes. El tiempo que necesita la luz para viajar desde la Tierra al cohete se incrementará continuamente a medida que el cohete se aleja más en el espacio. Así pues, Betty verá los sucesos de la Tierra cada vez más retrasados, debido a que la luz tiene que atravesar un espacio cada vez mayor entre la Tierra y el cohete. Por ejemplo, al cabo de una hora de vuelo medida desde la Tierra, Betty está a 0,8 horas-luz (48 minutos-luz) de distancia, de modo que ella ve lo que estaba sucediendo en la Tierra 48 minutos antes, pues este es el tiempo (medido en el sistema de referencia de la Tierra) que

necesita la luz, que transporta las imágenes de la Tierra a Betty, para alcanzarla en ese punto del viaje. En particular, a Betty le parecería —me estoy refiriendo a su apariencia visual real— que el reloj de Ann se frena en cualquier caso, independientemente de la teoría de la relatividad. Al cabo de dos horas de vuelo, a Betty le parecería que el reloj de la Tierra aún se ha quedado más atrás. Este frenado «ordinario» de los relojes y de los sucesos en general, vistos por un observador en movimiento, se denomina el «efecto Doppler», llamado así por un físico sueco que fue quien lo utilizó por primera vez para describir una propiedad de las ondas sonoras.* *Sumando* el efecto Doppler al efecto de dilatación temporal, usted obtiene el factor de frenado combinado.

Ann también verá que el reloj del cohete de Betty es frenado por el efecto Doppler, debido a que la luz procedente del cohete tarda cada vez más en llegar de vuelta a la Tierra. Además, ella verá el reloj de Betty frenado por el efecto de dilatación temporal. Por simetría, el factor de frenado combinado del otro reloj debería ser el mismo para ambas.

Permítanme calcular el factor de frenado combinado, primero desde el punto de vista de Ann y luego desde el punto de vista de Betty. Para hacer eso, me centraré en el gran suceso de la llegada de Betty a la estrella. El viaje de ida necesita diez años medidos en la Tierra. Sin embargo, Ann no *verá* realmente que el cohete llega a la estrella en el año 2010, puesto que para entonces Betty está a ocho años-luz de distancia. Puesto que la luz necesitará otros ocho años para volver a la Tierra, no será hasta el año 2018 cuando Ann pueda ser testigo visual de la llegada de Betty a la estrella.

¿Cuál es el tiempo del suceso de llegada tal como lo registra el reloj de Betty? La fórmula de Einstein nos dice que el reloj de Betty marcha a 0,6 veces la velocidad del reloj de la Tierra, así que diez años de tiempo terrestre implican seis años en el cohete. Por lo tanto, el reloj del cohete marca seis años a la llegada de Betty a la estrella. De modo que cuando Ann es testigo de esta llegada en el 2018, el reloj del cohete marca 2006. Así pues, por lo que respecta a la apariencia visual del reloj del cohete, Ann ve que sólo han pasado seis años en sus dieciocho años —es decir, el reloj del cohete de Betty ha estado marchando a *un tercio* de la velocidad del reloj terrestre de Ann. Ahora Ann es perfectamente capaz de separar los efectos de dilatación temporal y Doppler, y de computar la velocidad «real» del reloj de Betty, habiendo factorizado el efecto del retraso de la luz. Ella encontrará que la respuesta es 0,6, de acuerdo con la fórmula de Einstein. Así pues, Ann deduce (pero no ve realmente) que durante el viaje de ida de Betty el reloj de Betty estaba marchando a 36 minutos por cada hora del de Ann.

Desde la perspectiva de Betty, las cosas son de otra forma. Por supuesto,

* En realidad, Doppler era austriaco y publicó su trabajo siendo profesor en la Universidad de Praga. El trabajo se refería explícitamente a las ondas luminosas y trataba de ligar, erróneamente, el color de las estrellas con su velocidad. (N. del t.)

ella está de acuerdo en que su reloj del cohete marca 2006 cuando ella llega a la estrella, pero ¿qué ve ella que registra el reloj de la Tierra en ese momento? Sabemos que en el sistema de referencia de la Tierra el suceso de llegada ocurre en el 2010, pero, puesto que la estrella está a ocho años-luz de distancia, la luz que realmente llega al cohete en ese momento habrá salido ocho años antes —o sea, en el 2002. Así pues, cuando llegue a la estrella, Betty mirará a la Tierra y verá que el reloj terrestre registra 2002. *Su* propio reloj marca 2006. Por lo tanto, por lo que respecta a la apariencia real del reloj terrestre, éste registra que han pasado dos años por los seis años de Betty. De este modo, Betty concluye que el reloj terrestre ha estado marchando a un tercio de la velocidad de su propio reloj en el cohete durante el trayecto de ida del viaje. Este es el mismo factor en el que Ann percibía que el reloj de Betty se frenaba, de modo que la situación es en verdad perfectamente simétrica. También Betty puede separar el efecto Doppler del efecto de dilatación temporal y deducir que el reloj de Ann ha estado marchando «realmente» a 0,6 de la velocidad del suyo.

Sin demora, Betty se embarca para el viaje de regreso. Puesto que ahora Betty se está aproximando a la Tierra en lugar de alejarse, el efecto de retraso de la luz (es decir, Doppler) se opone ahora al efecto de dilatación temporal. El primero hace que los sucesos parezcan *acelerados*, aunque la dilatación temporal sigue trabajando para frenarlos. Pongámoslo en números. En primer lugar, ¿qué ve Ann mientras Betty viaja de vuelta hacia la Tierra? Puesto que estamos de acuerdo en que Betty vuelve a la Tierra en el año 2020, y Ann ve realmente que Betty llega a la estrella en el 2018, a ella le parecerá que el trayecto de vuelta del viaje, viendo la aproximación del cohete desde la Tierra, se comprime precisamente en dos años de tiempo terrestre. Hemos determinado ya que, cuando, en el 2018, Ann ve el reloj de Betty en el punto medio del camino, éste registra 2006, y que cuando Betty regresa a la Tierra registrará 2012. De este modo, en los dos años terrestres durante los que Ann ve que el cohete viaja de vuelta, ella será testigo de que el reloj del cohete avanza los restantes seis años. En otras palabras, en el trayecto de regreso del viaje Ann ve que el reloj de Betty marcha tres veces *más rápido* que su propio reloj de la Tierra. Este es un punto clave: durante el viaje de regreso el reloj del cohete parecerá *acelerado* visto desde la Tierra, y no frenado. El efecto Doppler vence al efecto de dilatación temporal. De nuevo, Ann puede separar los efectos de dilatación temporal y de retardo de la luz y *deducir* que el reloj del cohete está marchando «realmente» al 0,6 de la velocidad de su reloj —es decir, aunque a Ann le *parece* que el reloj del cohete está acelerado, ella *deduce* que «realmente» está frenándose a exactamente la misma velocidad reducida (0,6) como lo estaba en el viaje de ida. De este modo, aunque la apariencia visual del reloj del cohete es completamente diferente en los dos tramos del viaje, el factor de dilatación temporal de 0,6 permanece constante en todo el viaje.

Finalmente, permítanme examinar el viaje de regreso tal como lo observa Betty en el cohete. Ella ha experimentado seis años para el viaje de ida, y expe-

rimenta otros seis años para la vuelta, llegando a la Tierra en el 2012 tal como lo registra su propio reloj. Durante el viaje de regreso, sin embargo, Betty también observa el reloj de la Tierra. Ella ve (realmente, visualmente) que está en el 2002 en el momento que llega a la estrella. Sabemos que estará en casa en el 2020, de modo que Betty verá que el reloj de la Tierra avanza dieciocho años durante los seis años que está a bordo del cohete. Así pues, a Betty le parece que el reloj de la Tierra está marchando tres veces *más rápido* que su propio reloj del cohete. Este es el mismo factor en el que Ann veía acelerado el reloj de Betty: hay una completa simetría también en la parte de regreso del viaje. Betty puede de nuevo factorizar el efecto de retardo de la luz y deducir que el reloj de la Tierra «realmente» se está *frenando* —al 0,6 de la velocidad de su reloj en el cohete.

El punto crucial que debe destacarse de todo esto es que durante los periodos en los que el cohete está viajando a una velocidad fija, Ann *deduce* que es el reloj de Betty el que se está frenando, y Betty *deduce* que es el reloj de Ann el que se está frenando. En el trayecto de ida del viaje, cada una *ve* realmente que el reloj de la otra está marchando (incluso más) lentamente, pero en el trayecto de vuelta del viaje cada una *ve* que el reloj de la otra se acelera. Todas las deducciones y experiencias encajan consistentemente y rechazan la afirmación de que hay una paradoja unida al enunciado de que «cada uno de los relojes se frena con respecto al otro».

Para los lectores que han vadeado esta aritmética, ella contiene una conclusión oculta sobre las distancias. Si se utiliza el hecho de que en el sistema de referencia de Betty la Tierra se aleja al 0,8 de la velocidad de la luz, y el viaje a la estrella requiere precisamente seis años de cohete, entonces la *distancia* a la estrella tal como la mide Betty debe ser $0,8 \times 6 = 4,8$ años-luz. Así pues, aunque Ann mide que la estrella está a 8 años-luz de distancia, Betty mide que la distancia a la estrella es de sólo 4,8 años-luz. La distancia está contraída en el mismo factor (0,6) en el que el tiempo está dilatado.

Adiós al presente

El momento presente es una diosa poderosa.

JOHANN GOETHE

Aunque al final del viaje las experiencias de Ann y Betty encajan de forma consistente, usted puede aún hacerse un lío planteando preguntas tales como: ¿qué está haciendo Betty cuando el reloj de Ann marca 2007? O: ¿qué tiempo marca el reloj de Ann cuando Betty llega a la estrella? Cuando los sucesos ocurren en lugares espacialmente separados e involucran observadores en diferentes estados de movimiento, no puede darse ningún significado inequívoco a estas cuestiones. Para hacerlas precisas, usted tiene que especificar exactamente a qué ob-

servador y a qué tipo de observación se está refiriendo. Cuando los relojes pierden el paso, no existe un «ahora» universal o momento presente sobre el que puedan coincidir los diferentes observadores. Ann tiene su definición de «ahora» en, digamos, el 2007, y Betty tiene la suya. Generalmente no encajan. Por ejemplo, usted no puede esperar respuestas consistentes a especulaciones como la siguiente:

Ann: «Es el 2007 aquí en la Tierra. Me pregunto si Betty ha llegado ya a su estrella. Sé que eso le llevará sólo seis años de su tiempo y ella partió hace siete años de mi tiempo. Por supuesto, si yo miro a través del telescopio veré al cohete aún muy lejos de su destino, pero sé que el telescopio no me tiene al día debido al hecho de que la luz procedente del cohete necesita un tiempo para llegarme aquí a la Tierra. Lo que quiero saber es dónde está Betty *ahora*».

En el sistema de referencia de Ann, Betty está a $7 \times 0,8 = 5,6$ años-luz de distancia, y está desayunando en ese instante (el 2007 «ahora» de Ann) pero, por supuesto, para Betty ese desayuno concreto no ocurre en el 2007. Su propio reloj marca $7 \times 0,6 = 4,2$ años después de la salida. Si mira hacia la Tierra, verá realmente que el reloj de la Tierra está marcando $4,2 \times 1/3 = 1,4$ años, pero por supuesto ella sabe que este no es «realmente el tiempo» en la Tierra en dicho instante. Para calcular *esa* fecha tiene que añadir el retardo temporal, que es de 5,6 años medidos por Ann en la Tierra. De este modo, Betty calcula $1,4 + 5,6 = 7$, deduciendo correctamente la fecha de 2007 en la Tierra, que Ann considera simultánea con ese desayuno concreto en el cohete espacial. Sin embargo, la propia Betty ve las cosas de forma diferente. Ella ha salido sólo hace 4,2 años en su sistema de referencia, de modo que la luz no puede haber necesitado 5,6 de sus años para llegarle desde la Tierra —ni siquiera había partido entonces. Puesto que Betty ve que la Tierra se aleja al 80 por 100 de la velocidad de la luz, al cabo de 4,2 años estará a 3,36 años-luz de distancia en su sistema de referencia. Hacen falta 3,36 de sus años para que la luz llegue al cohete procedente de la Tierra. Pero puesto que Betty ve que el reloj de la Tierra marcha a 1/3 de la velocidad del suyo propio, estima que sólo han pasado $3,36/3 = 1,12$ años en la Tierra desde que la luz fue emitida a los 1,4 años. Esto significa, por lo que respecta a Betty, que la fecha del «ahora» de la Tierra (es decir, tal como ella contempla esta difícil cuestión sobre esa comida concreta) es $1,4 + 1,12 = 2,52$ años después de la partida —lo que decididamente *no* es el 2007. La misma cifra puede calcularse sin preocuparse sobre las señales de luz notando simplemente que el tiempo que ha transcurrido en la Tierra desde la partida de Betty es 0,6 de su propio tiempo —es decir, $4,2 \times 0,6 = 2,52$. La misma aritmética aplicada a la fecha de la llegada de Betty a la estrella (tras seis años de cohete) nos dice que este suceso es simultáneo con el año 2003,6 en la Tierra. Por el contrario, Ann considera el mismo suceso simultáneo con el 2010. La conclusión de todo esto es que Ann y Betty no comparten el mismo «ahora». Un «suceso de Betty» B puede ser considerado *por Ann* como simultáneo con un «suceso de Ann» A, incluso si Betty *no* considera A y B simultá-

neos, sino que escoge algún suceso de Ann enteramente diferente (en este caso anterior) para dicho papel.

Pero eso no tiene sentido, interrumpe nuestro escéptico. ¿Qué sucede si Ann llama a Betty y simplemente le pregunta qué está haciendo «ahora»?

¡Ella no puede hacer eso! La misma teoría de la relatividad que predice el efecto de los gemelos también prohíbe que cualquier cuerpo o influencia física viaje a velocidad mayor que la de la luz, de modo que *no* puede haber comunicación instantánea entre Ann y Betty. El hecho de que Ann y Betty tengan «ahoras» o definiciones de simultaneidad inconsistentes en lugares distantes no es por lo tanto una causa de preocupación. Ningún significado físico puede ligarse a sucesos que suceden «ahora» en un lugar remoto, porque nunca podemos conocer o afectar a tales sucesos de ninguna forma. Calcular «sucesos-ahora» distantes es un puro ejercicio de contabilidad. En cuanto Ann y Betty se reúnen, ellas pueden comparar sus notas y, como hemos visto, encuentran entonces que sus respectivas historias son perfectamente consistentes. Si la no existencia de un «ahora» global, universal y coincidente le choca a usted como una idea loca, eso no es nuevo. En 1817, el ensayista inglés Charles Lamb escribió, con asombrosa presciencia: «Tu “ahora” no es mi “ahora”; y tu “entonces” tampoco es mi “entonces”: pero mi “ahora” puede ser tu “entonces”, y viceversa».⁸

He analizado la pareja Ann-Betty porque continuamente recibo cartas pidiendo una clarificación del efecto de los gemelos, o manuscritos que afirman que es falso porque hay una inconsistencia. Para aquellos lectores que han tenido la paciencia de seguir mis cifras, espero que estén de acuerdo en que todo encaja perfectamente. No hay paradoja. Espero sinceramente que esta sea la última palabra que haya que decir sobre la cuestión, aunque sin duda algunos acérrimos antirrelativistas se sentirán incentivados a escribir sus objeciones a mis cálculos.

El tiempo es oro

¿Cómo podemos estar *seguros* de que Einstein tiene razón sobre el efecto de dilatación temporal? En mi opinión, el test decisivo de cualquier teoría extraña es este: ¿puede usted hacer dinero de ella? Una razón por la que yo siempre he sido escéptico sobre lo llamado paranormal es que creo que si algunas personas pueden, digamos, predecir el futuro, entonces pueden aventajar al agente medio del mercado de valores. Incluso si el efecto es muy débil, las ganancias deberían superar a las pérdidas con el tiempo. Alguien estaría ahora comercializando la técnica y haciéndose muy rico. Darwin nos enseñó cómo una ventaja muy ligera puede crecer exponencialmente con el tiempo hasta te-

ner un éxito fantástico. Desgraciadamente, no hay la más mínima evidencia de un éxito financiero paranormal entre los médiums cualificados (aparte de su habilidad para separar a los clientes de su dinero, por supuesto). De hecho, recientemente supe de un clarividente que regularmente aconseja a hombres de negocios y políticos, pero que se las arregló para perder la fortuna familiar en el casino local. Sin embargo, doy un margen de confianza a los zahoríes porque ellos pueden hacer con éxito una forma de vida del hallazgo de agua, a su manera no muy ortodoxa.

En contraste con la clarividencia, la gente sí que hace dinero regularmente de dilatar el tiempo. La ingeniería del manejo de las dilataciones del tiempo ha llegado a ser una operación comercial en varios países. La máquina que lo hace para usted se denomina «sincrotrón». Trabaja haciendo dar vueltas a los electrones a velocidad muy próxima a la de la luz dentro de un tubo circular en el que se ha hecho el vacío. Puesto que los electrones están obligados a seguir una trayectoria curva, emiten una intensa radiación electromagnética, concentrada en un haz estrecho. (Dicho sea de paso, es esta «radiación sincrotrón» la que explica los bips del púlsar.) Cuando se encontró por primera vez, la radiación sincrotrón era una molestia. Los sincrotrones se diseñaron originalmente para acelerar partículas subatómicas, no para producir radiación. La radiación cuesta energía, y por lo tanto dinero. Una razón de que los aceleradores de partículas sean tan grandes es la de reducir la curvatura de las trayectorias de las partículas para minimizar las pérdidas por radiación. Pero, como sucede tan a menudo en la ciencia, un pecado puede convertirse en una virtud, y hoy día varios gobiernos han construido sincrotrones para producir la radiación. La radiación sincrotrón es muy intensa, abarca un continuo y amplio espectro de frecuencias desde la luz visible hacia arriba, y se manipula fácilmente.

Su gran ventaja deriva de las frecuencias muy altas que pueden conseguirse —dentro de la región de rayos X del espectro. Los rayos X del sincrotrón se utilizan con muy buenos resultados para elucidar la estructura atómica de materiales complicados, tales como vidrios o grandes moléculas biológicas. Las imágenes se obtienen con tanta rapidez que los científicos pueden seguir a veces los detalles de los cambios químicos en el curso del tiempo. Recientemente, un grupo de Wellcome Biotech y la Universidad de Oxford calcularon la estructura del virus que produce la fiebre aftosa en el ganado utilizando la instalación de sincrotrón británica de Daresbury en Cheshire. También se han conseguido análisis acertados en el campo del diseño de fármacos, termoplástica y cerámica, y la litografía por sincrotrón se ha utilizado para hacer micromáquinas de menos de un milímetro de tamaño. Las empresas están dispuestas a pagar varios miles de dólares por día para utilizar un sincrotrón, y estas máquinas generan millones de dólares cada año en actividad comercial.

Los electrones del sincrotrón viajan típicamente a un 99,99999 por 100 de la velocidad de la luz, y el secreto que hay detrás de su éxito reside en el factor de dilatación temporal, que llega a ser de varios millares. Esto aumenta enor-

mamente la frecuencia de la radiación que se observa en el sistema de referencia del laboratorio. A bajas velocidades, cuando pueden despreciarse los efectos relativistas, los electrones en un sincrotrón emiten radiación a una frecuencia igual a la frecuencia de su circulación alrededor de la máquina. Sin embargo, a velocidades altas los efectos de la dilatación temporal y otros efectos relativistas relacionados producen una diferencia espectacular. El sincrotrón de Daresbury tiene una circunferencia de noventa y seis metros, y los electrones completan tres vueltas cada microsegundo en el sistema del laboratorio: esto está en el rango de frecuencias del megahertzio, correspondiente a la región de radioondas del espectro electromagnético. Una fuente de esta frecuencia sería inútil para estudiar la estructura atómica de los materiales. Pero en el sistema de referencia de los electrones, el viaje se completa con mucha mayor rapidez, debido a la dilatación temporal, y es radiación a esta frecuencia más alta la que se emite. En resumen, los efectos relativistas incrementan la frecuencia de la radiación observada en el laboratorio hasta un billón de megahertzios.

Usted no tiene que viajar hasta su sincrotrón más próximo para ser testigo de la dilatación del tiempo en acción. Sus extraños efectos se manifiestan sutilmente en el mundo cotidiano que nos rodea, puesto que estamos rodeados de objetos que se están moviendo a velocidades extraordinariamente altas. Estos objetos son los electrones que circulan dentro de los átomos. Un electrón típico describe órbitas en un átomo de hidrógeno a alrededor de 200 kilómetros por segundo, menos de un 1 por 100 de la velocidad de la luz. Sin embargo, la velocidad es mucho más alta para átomos más pesados, debido a la mayor carga eléctrica del núcleo. Los electrones más internos dentro de átomos como el oro, plomo o uranio pueden girar en torno al núcleo a una fracción apreciable de la velocidad de la luz. En consecuencia, la influencia de la dilatación temporal y otros efectos relativistas modificarán de forma importante el comportamiento de estos electrones.

Para tener una comprensión completa de las propiedades eléctricas y ópticas de materiales sólidos tales como el oro, los físicos deben tener en cuenta la dilatación temporal de los electrones atómicos, incluyendo los que están cerca del núcleo. Por ejemplo, tomemos el color del oro. La mayoría de los metales tienen una apariencia plateada, pero no el oro. Su brillo característico y atractivo puede explicarse por los efectos de la relatividad sobre los movimientos de los electrones dentro del metal que son los responsables de reflejar la luz. Por lo tanto, no hay exageración en decir que este precioso metal es precioso —y financieramente valioso— en parte como resultado de la dilatación temporal que actúa dentro de los átomos de oro.

Muchas áreas de alta tecnología también dependen, o se ven afectadas de una u otra forma, por la dilatación temporal. Los transmisores de radar, los sistemas de navegación de satélites y los dispositivos de estado sólido, son todos ellos sensibles a los efectos de la relatividad. Incluso los humildes bips que anuncian la señal del tiempo, producidos como lo están por relojes atómicos

finamente ajustados, tendrían una deriva importante si se hubiera pasado por alto el efecto de la dilatación temporal dentro de los propios relojes. Así es como el estiramiento del tiempo y otros aspectos relacionados de la teoría de la relatividad se introducen en nuestras vidas, en un montón de formas muy prácticas e incluso comerciales.

Si la dilatación temporal es un fenómeno real y que da dinero, entonces yo estoy obligado a aceptar (concede el escéptico) que el ahora de Ann y el ahora de Betty pueden estar desplazados. Eso significa que mi ahora y su ahora pueden estar desplazados también. Pero si hay más de un ahora, ¿no hay más de una realidad? ¿Qué sucede, entonces, con el orden del universo?

¡Buena pregunta! ¿Qué sentido podemos dar a una realidad física cuando hay una multiplicidad de ahoras?

Paisaje temporal

La diferencia entre pasado, presente y futuro es sólo una ilusión,
por persistente que sea.

ALBERT EINSTEIN

La mayoría de los occidentales crecen con la firme convicción de que la realidad está investida de los sucesos del momento presente. La división básica del tiempo en pasado, presente y futuro parece tan fundamental como lo que más para nuestra experiencia de la realidad. Estimamos que el pasado, aunque recordado, ha salido de la existencia, mientras que el futuro, desconocido y misterioso, aún tiene que ser conjurado al ser. Es una visión del mundo muy bien captada por el filósofo alemán Arthur Schopenhauer, quien escribió: «El presente más insignificante tiene sobre el pasado más insignificante la ventaja de la realidad».⁹ No hay que desechar a la ligera una creencia semejante. Después de larga y profunda deliberación, un pensador tan grande sobre cuestiones temporales como san Agustín llegó precisamente a esta conclusión de «sentido común»:

Pero estos dos tiempos, pasado y futuro, ¿cómo pueden existir si el pasado ya no es y el futuro no existe todavía? En cuanto al presente, si siempre fuera presente y no se convirtiera en pasado, ya no sería tiempo sino eternidad.¹⁰

El problema con el sentido común es que a veces puede fallar. Después de todo, el sentido común sugiere que el Sol y las estrellas dan vueltas alrededor de la Tierra. Einstein comentó en cierta ocasión que «el sentido común es esa capa de prejuicios establecidos en la mente antes de los dieciocho años».¹¹

La teoría de la relatividad no implica que usted pueda utilizar un viaje espacial para saltar a su *propio* futuro, sino sólo al de algún otro. Usted no puede «alterar su *aquí-y-ahora* cambiando su estado de movimiento, sino sólo su *allí-y-ahora*. El desajuste entre los «ahoras» de Ann y Betty se refiere a lo que cada una deduce que la *otra* está haciendo «en ese momento» en un lugar distante. Cuando las gemelas se juntan, sus *ahoras* coinciden una vez más.

Usted no necesita un cohete espacial para dislocar su *allí-y-ahora* de forma violenta, si el «*allí*» está suficientemente lejos, porque el efecto se incrementa con la distancia. Supongamos que usted deja este libro, se levanta de su silla y camina por la habitación. ¡Usted ha cambiado su *allí-y-ahora* en la galaxia Andrómeda en un día entero! Lo que quiero decir con esto es que, mientras usted está sentado, puede deducir que cierto suceso E en algún planeta de Andrómeda está sucediendo en el mismo instante (tal como lo juzga usted, en su sistema particular de referencia) que el acto de «su lectura de este pasaje». Cuando usted camina por la habitación, el suceso en este planeta distante que es simultáneo con su deambular cambia repentinamente de ser «inmediatamente después de E» a ser algún otro suceso que difiere de E en un día. Salta o bien al futuro o bien al pasado de E, dependiendo de si usted camina acercándose o alejándose de Andrómeda en ese momento. Así pues, la simultaneidad, como el movimiento, es relativa.

¿Así que el orden temporal de dos sucesos puede cambiarse a capricho? ¿No significa eso que tenemos el poder de invertir el tiempo simplemente andando?

Sí y no. Si dos sucesos ocurren en diferentes lugares (por ejemplo, uno en la Tierra, otro en Andrómeda), entonces la secuencia temporal de los dos sucesos *puede* ser invertida, pero sólo si los dos sucesos espacialmente separados ocurren suficientemente próximos en el tiempo para que la luz no pueda ir de uno a otro durante el intervalo disponible. En consecuencia, no puede haber relación causal entre los sucesos, porque, según Einstein, ninguna información o influencia física puede viajar entre los sucesos a velocidad mayor que la luz para conectarlos causalmente. De este modo, el invertir el orden temporal en este caso particular no es grave: no se puede invertir causa y efecto, produciendo paradojas causales, puesto que los sucesos en cuestión son por completo independientes causalmente. Sin embargo, esta ambigüedad limitada en el orden temporal de sucesos espacialmente separados tiene una consecuencia importante. Si la realidad está investida realmente en el presente, entonces usted tiene el poder de cambiar dicha realidad a lo largo del universo, hacia atrás y hacia adelante en el tiempo, por simple deambulación. Pero, entonces, también lo hace igual una mancha verde sensible de Andrómeda. Si la mancha rezuma hacia la izquierda y luego hacia la derecha, el momento presente en la Tierra (juzgado por la mancha, en su sistema de referencia) dará bandazos enormes hacia atrás y hacia adelante en el tiempo.

A menos que usted sea un solipsista, sólo hay una conclusión racional que extraer de la naturaleza relativa de la simultaneidad: los sucesos en el pasado y en el futuro tienen que ser exactamente tan reales como los sucesos en el presente. De hecho, la misma división del tiempo en pasado, presente y futuro parece no tener significado físico. Para acomodar los ahora de todo el mundo —el de Betty, el de Ann, el de la mancha verde, el suyo y el mío—, los sucesos y los momentos tienen que existir «todos a la vez» en un lapso de tiempo. Coincidimos en que usted no puede ser testigo realmente de aquellos diferentes sucesos allí-y-ahora «cuando suceden», puesto que la comunicación instantánea es imposible. En lugar de ello, usted tiene que esperar hasta que la luz los haga llegar en su firme progresión a 300.000 kilómetros por segundo. Pero para dar sentido a las nociones de espacio y tiempo, es necesario imaginar que aquellos sucesos allí-y-ahora están realmente de algún modo «ahí fuera», llenando días, meses, años y, por extensión (usted puede magnificar la travesura incrementando sus cambios en velocidad y la distancia a «allí»), *todo* el tiempo.

La idea de que los sucesos en el tiempo están establecidos «todos a la vez» motivó a Einstein para escribir las palabras citadas al comienzo de esta sección. Pero este concepto en modo alguno se originó con la teoría de la relatividad; recupera un débil eco de la noción de eternidad robada a la humanidad occidental por Newton. Su profunda fascinación para escritores y poetas está captada explícitamente en las palabras de William Blake: «Veo el Pasado, Presente y Futuro existiendo todos a la vez, ante mí»,¹² y elocuentemente reflejada en los versos de T. S. Eliot:

Y el fin y el comienzo siempre estuvieron ahí
antes del comienzo y antes del fin.
Y todo es siempre ahora.¹³

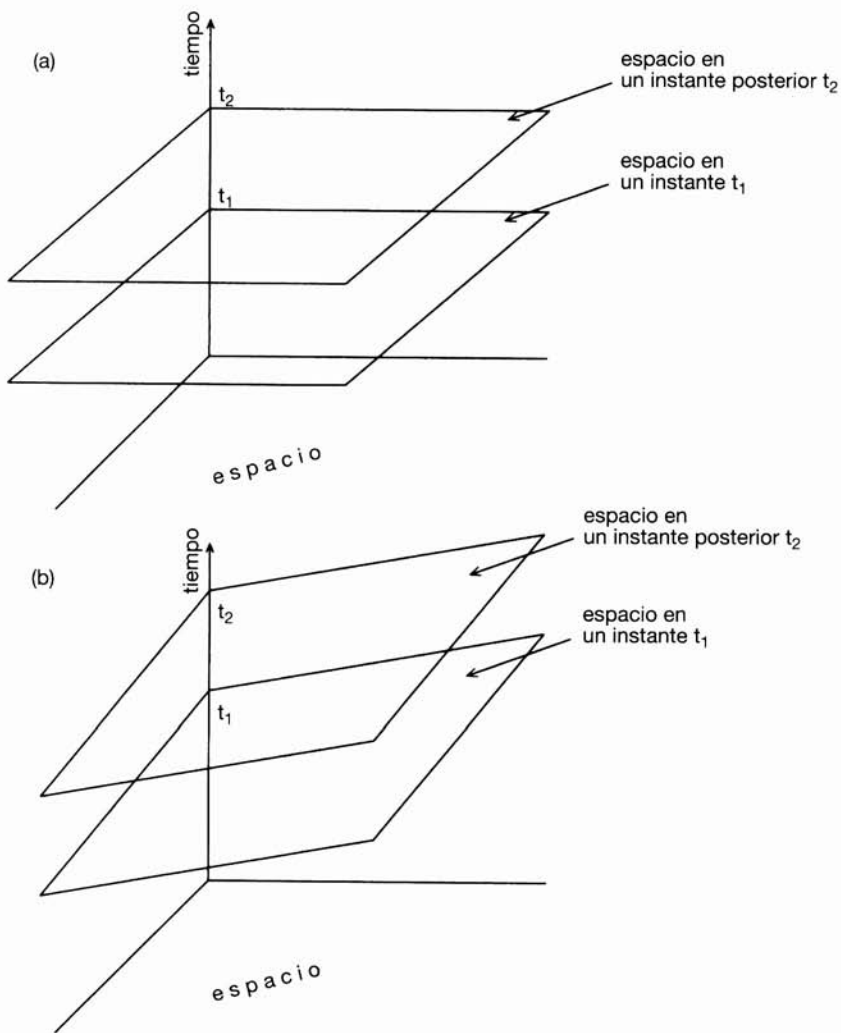
Se requería, sin embargo, algo de la potencia y verificabilidad de la teoría de la relatividad para forzar a los científicos a un replanteamiento radical de su concepción del tiempo —en particular, a desgajarla de la noción de «cosas sucediendo» en una secuencia ordenada y universal, y empezar a considerar al tiempo, como el espacio, simplemente «ahí». Igual que podemos ver el espacio como un paisaje extendido ante nosotros, también podemos ver el tiempo (al menos a los ojos de nuestra mente) como un *paisaje temporal* establecido para siempre. Los filósofos se refieren al concepto de paisaje temporal como un «tiempo en bloque», para distinguirlo de las ideas filosóficas (y de sentido común) de «el presente fugaz».

El tiempo en bloque sugiere que representemos el tiempo de modo semejante al espacio. El primer físico en sugerir esto fue Hermann Minkowski, quien había sido profesor de Einstein en el ETH. En 1908, Minkowski dio una conferencia en Colonia sobre el tema de la notable y nueva teoría de la relatividad de su antiguo alumno, que empezaba con la espectacular afirmación: «En lo

sucesivo el espacio por sí mismo, y el tiempo por sí mismo, están condenados a desvanecerse en meras sombras, y sólo un tipo de unión de los dos preservará una realidad independiente».¹⁴

La «unión» a la que Minkowski aludía era idea suya. Si el tiempo puede ser espacializado, al menos para los propósitos de representación matemática, entonces debe tratarse como una *cuarta* dimensión, porque existen ya tres dimensiones del espacio. Esto suena más bien arcano, pero la espacialización del tiempo ha tenido lugar desde que la humanidad ha utilizado la representación simbólica. El escritor Anthony Aveni señala en su fascinante libro *Empires of Time* que nuestros antepasados paleolíticos señalaban los intervalos de tiempo mediante secuencias de muescas en huesos hace al menos 20.000 años, y esto es ciertamente una representación espacial del tiempo. Incluso la terminología «la cuarta dimensión» se utilizaba para describir el tiempo años antes de que la teoría de la relatividad irrumpiese en la escena. En su ensayo de 1880 «¿Qué es la cuarta dimensión?», el científico británico Charles Hinton nos invitaba a imaginar «cierta totalidad fantástica, en la que coexiste todo lo que ha sido o va a ser», que es una descripción justamente vívida del tiempo en bloque.¹⁵ Además, esta construcción, «deja en esta titubeante consciencia nuestra, limitada a un espacio estrecho y a un solo instante, un registro tumultuoso de cambios y vicisitudes que sólo son nuestros».¹⁶ En otras palabras, Hinton afirma que el ahora de nuestra percepción consciente es meramente un fenómeno subjetivo —del que hablaremos más adelante.

Lo que había de nuevo en el tiempo de Einstein era el hecho de que conecta el tiempo con el espacio *físicamente*, y no sólo metafóricamente. La teoría de la relatividad entrelaza el espacio y el tiempo de una forma bastante precisa e íntima. He mencionado cómo se contrae el espacio y se expande el tiempo. Matemáticamente estas distorsiones están mezcladas en el mismo conjunto de fórmulas. Minkowski resaltaba que él no estaba simplemente empalmando una dimensión temporal extra a las tres dimensiones espaciales por diversión, sino porque la entidad resultante formaba un «continuo espacio-temporal» *unificado*, en el que los aspectos puramente espacial y puramente temporal no podían ser desenredados. La teoría de la relatividad no nos permite separar el tiempo del espacio haciendo cortes espaciales, a tiempo constante, a través del espacio-tiempo de una forma absoluta y universal. Cada observador tendrá su corte particular, pero ellos no coincidirán en general. Una imagen del espacio-tiempo podría ser útil en este punto. La figura 2.2 muestra lo que se conoce como diagramas de Minkowski, que representan al espacio y el tiempo juntos. Uno de los problemas con estos diagramas es que no es posible dibujar cuatro dimensiones en una hoja de papel, de modo que al menos una dimensión espacial tiene que quedar fuera. El espacio se representa horizontalmente mientras que el tiempo corre verticalmente. El diagrama muestra cómo observadores diferentes seccionan el espacio-tiempo en «espacio» y «tiempo» de formas diferentes.



2.2. El espacio-tiempo según la teoría de la relatividad de Einstein. En estos diagramas, denominados diagramas de Minkowski, el tiempo se dibuja en vertical, y dos dimensiones del espacio se dibujan en horizontal. Las secciones horizontales en (a) representan el espacio en los dos instantes t_1 y t_2 visto por un observador particular. Todos los puntos en una sección dada son juzgados simultáneos por dicho observador. En (b) el mismo espacio-tiempo está seccionado de forma diferente, correspondiente a la perspectiva de un segundo observador en movimiento con respecto al primero. Son los puntos de los planos inclinados los que son considerados simultáneos por el segundo observador. Por consiguiente, no hay una manera única y concordante de seccionar el espacio-tiempo en «espacio» y «tiempo». El método (a) puede parecer más natural, debido a que las secciones son horizontales, pero esto se debe simplemente a que he dibujado arbitrariamente los ejes del diagrama de modo que correspondan al sistema de referencia del primer observador.

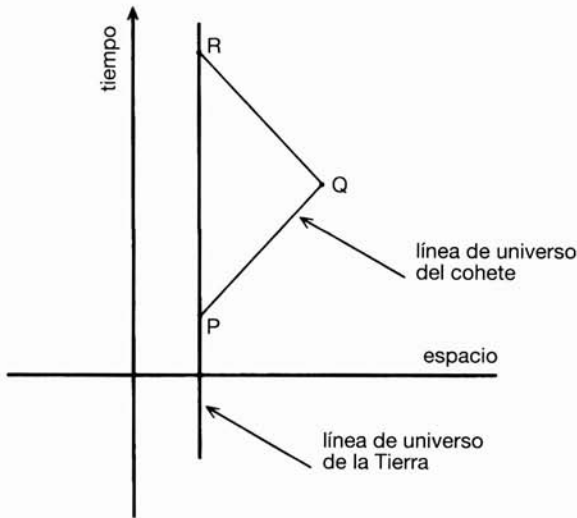
Hermann Weyl, un colega cercano de Einstein, expresaba la nueva visión del «espacio-tiempo» como sigue:

El escenario de la realidad es ... un mundo tetradimensional en el que el espacio y el tiempo están indisolublemente unidos. Por profundo que sea el abismo que separa la naturaleza intuitiva del espacio de la del tiempo en nuestra experiencia, nada de esta diferencia cualitativa entra en el mundo objetivo que la física se propone cristalizar a partir de la experiencia directa. Es un continuo tetradimensional, que no es «tiempo» ni «espacio».¹⁷

El propio Einstein no se sintió al principio demasiado seducido con la idea del espacio-tiempo unificado, despreciando la nueva geometría tetradimensional de Minkowski como una pedantería «superflua», pero volvió a la idea a su debido tiempo. La verdadera significación de este *espacio-tiempo* tetradimensional unificado es que posee una geometría común que mezcla completamente los fragmentos de espacio y los de tiempo. Minkowski elaboró rápidamente las reglas de la geometría espacio-temporal. Por desgracia, éstas no son una generalización simple de la geometría tridimensional de la geometría escolástica para acomodar una dimensión extra (aunque tampoco son difíciles). Daré más detalles en el capítulo 8, pero para el propósito de la presente discusión simplemente quiero apuntar que cuando dibujamos diagramas en el espacio-tiempo (en oposición al espacio) nuestra intuición normal sobre distancias y ángulos puede confundirnos.

Los diagramas de Minkowski pueden ser de gran ayuda, sin embargo. Permítanme ilustrar las experiencias de Ann y Betty utilizando uno (véase la figura 2.3). Por conveniencia artística he retenido sólo una dimensión espacial. Notemos primero que un suceso, tal como Betty dejando la Tierra, corresponde a un simple punto en el espacio-tiempo. Un objeto, tal como una persona o un cohete, describe una trayectoria en el espacio-tiempo llamada su «línea de universo». La línea de universo de Ann, que coincide con la de la Tierra, es simplemente una línea recta. La línea es vertical porque he escogido dibujar este diagrama para representar sucesos tal como se observan en el sistema de referencia de la Tierra. En su sistema de referencia, Ann no se mueve, de modo que conforme «pasa» el tiempo ella describe simplemente una línea con coordenadas espaciales fijas. Por el contrario, Betty marcha en el cohete a lo largo de una línea de universo que se inclina hacia la derecha, luego se invierte y regresa de nuevo a la Tierra. Los sucesos que representan la partida de Betty desde la Tierra, la llegada a la estrella y el regreso a la Tierra están indicados P, Q y R respectivamente.

Ahora, el punto crucial es este. La duración entre los dos sucesos P y R no está fijada, sino que depende de la *longitud* de la línea de universo que sigue el observador entre ellos. El dibujo hace obvio que la distancia entre P y R medida a lo largo de las líneas de universo será diferente: Ann tiene una línea



2.3. Diagrama de Minkowski del efecto de las gemelas. Betty deja la Tierra en el suceso P. La línea inclinada es la «línea de universo» de su cohete, que llega a la estrella lejana en el suceso Q. El cambio abrupto de pendiente de la línea de universo en Q representa el punto de regreso de Betty. La reunión en la Tierra ocurre en el suceso R. Las distancias a lo largo de los caminos espacio-temporales alternativos PR y PQR son obviamente diferentes, lo que indica diferentes duraciones experimentadas entre los sucesos P y R. De hecho, debido a las reglas extrañas de la geometría minkowskiana, PQR es la ruta más corta.

de universo recta pero la de Betty es quebrada vía Q. Usted podría pensar que esto haría que la estimación que hace Betty de la duración sea mayor, pero aquí el diagrama le engaña, como yo advertí. La geometría torcida del espacio de Minkowski difiere aquí de la geometría «normal» en que las líneas que se inclinan respecto de la vertical deben ser multiplicadas por un factor especial de acortamiento. Cuando se ha hecho esto, resulta que el tiempo *más largo* entre los dos sucesos es realmente el tiempo que marca un reloj que tiene una línea de universo *recta* que une los sucesos. De este modo Betty «llega al» suceso R en un tiempo más corto que Ann. Nótese que yo no digo «Betty llega a R primero», porque R no es un lugar sino un suceso. Un suceso que implica tanto a Ann como a Betty (en este caso su reunión) no puede ser experimentado en momentos diferentes, incluso si Ann y Betty discrepan sobre las respectivas *duraciones* desde el instante de partida (suceso P).

El espacializar el tiempo de este modo puede hacer avanzar nuestra comprensión de la física, pero se ha pagado un alto precio. La vida humana gira en torno a la división del tiempo en pasado, presente y futuro; la gente no re-

nuncia a estas categorías sólo porque los físicos digan que están desacreditadas. T. S. Eliot coincidía poéticamente con Minkowski:

El tiempo presente y el tiempo pasado
están quizá presentes los dos en el tiempo futuro
y el tiempo futuro contenido en el tiempo pasado.

Pero él seguía para señalar la consecuencia:

Si todo tiempo es eternamente presente
todo tiempo es irredimible.¹⁸

Esto es quizá lo que más perturba a la gente a propósito del tiempo en bloque. Si el futuro está de algún modo «ya ahí», entonces no está en nuestra mano conformarlo. El proverbio «Lo que ha pasado, ha pasado» parecería aplicarse con la misma fuerza al futuro que al pasado. Weyl escribió una vez: «El mundo no sucede, simplemente es». ¹⁹ Suceder, devenir, flujo del tiempo, despliegue de los sucesos —todos son una ficción, si usted cree a Weyl. Einstein lo hacía; de ahí la cita al comienzo de esta sección, escrita para consuelo de la viuda de Besso después de la muerte de éste (sólo unas pocas semanas antes de la propia muerte de Einstein).

En sus vidas profesionales la mayoría de los físicos aceptan sin cuestionarlo el concepto de paisaje temporal, pero fuera de su trabajo actúan como cualquier otro, basando sus pensamientos y acciones en la suposición de un momento presente móvil. Pues ¿puede alguien estar convencido realmente de que el futuro no va a *suceder*, sino que de algún modo estará simplemente (cuando llegue su tiempo...)? ¿Que cualquier impresión en sentido contrario es algún tipo de ilusión? Supongamos que su estado físico requiriese una operación y su médico le informara de que un anestésico sería peligroso. ¿Consentiría en seguir adelante en cualquier caso sin anestesia, sobre la base de que, una vez la operación haya pasado, el dolor sería «meramente un recuerdo»? Probablemente no. Sin embargo, hay un fármaco denominado midazolam que tiene el efecto de borrar la memoria a corto plazo. Si un paciente se despierta accidentalmente durante la operación y experimenta un gran dolor, el fármaco asegura que, tan sólo un instante después, él será totalmente ignorante de la horrible experiencia; para el paciente postoperatorio es como si el anestésico hubiera actuado perfectamente. La cuestión es, supongamos que a usted se le ofreciera ese fármaco en lugar de un anestésico: ¿lo aceptaría usted? O ¿preferiría correr el riesgo del anestésico, sobre la base de que la experiencia del dolor sería real en el tiempo (incluso si usted no tuviera recuerdo de ello después) y que la dolorosa experiencia aún está en el futuro —no «habría sucedido» aún? Yo sé cuál sería mi respuesta.

Incluso Einstein confesó, próximo al fin de sus días, que el problema del

ahora «le preocupaba seriamente». En una conversación con el filósofo Rudolf Carnap admitió que hay «algo esencial sobre el ahora», pero expresó la creencia en que, cualquier cosa que fuera, queda «justamente fuera del dominio de la ciencia».²⁰ Quizá sí, quizá no. Esto es todo lo que quiero decir por ahora sobre el tema del ahora. Pero volveré a él más adelante...

Distorsiones del tiempo

¿Es la teoría de Einstein una loca extravagancia? Seguramente lo es.

Una edición de 1921 de *The New York Times*

La barrera de la luz

A unos quinientos kilómetros al norte de Adelaida, en Australia del Sur, se encuentra uno de los lugares más desolados de la Tierra. El suelo es un desierto, pero no existen las dunas movedizas de arena dorada del Sahara. Aquí la tierra es de un color rojo intenso y el terreno, casi completamente llano, está decorado con matorrales de aspecto desesperado que de algún modo consiguen aferrarse a la vida en condiciones ardientes y áridas.

Parece extraño encontrar aquí una ciudad; el agua es transportada por tuberías desde el río Murray, a varios cientos de kilómetros de distancia. El nombre de la ciudad es Woomera, que significa «arrojar palos» en el idioma aborígen australiano. Fui allí a ver con mis propios ojos, y con una curiosidad infantil de teórico, la evidencia experimental de las mayores distorsiones del tiempo medidas en el mundo. Cuando menos, yo había ido para ver el equipo. Más exactamente, había ido para observar la última mejora del equipo «inaugurada» por el Ministerio de Ciencia. El nuevo sistema lleva jocosamente el rancio acrónimo de CANGAROO, que significa Collaboration between Australia and Nippon for Gamma Ray Observations in the Outback* (Colaboración entre Australia y Japón para Observaciones de Rayos Gamma en el Interior).

La estación científica no está situada en la ciudad, sino a un corto trecho por una carretera oculta entre la maleza, cerca del lugar desde donde se lanzaban cohetes. No mucha gente sabe que Australia fue la cuarta potencia espacial (Francia aventaja por muy poco a Australia en el tercer lugar). Un satélite

* The Outback es el nombre por el que se conoce la zona desértica de Australia. (N. del t.)

construido en Adelaida fue puesto en órbita a bordo de un cohete comercial de los Estados Unidos en 1967. En cierta época la base de Woomera estuvo probando o lanzando docenas de cohetes al año, principalmente para Gran Bretaña, y luego para sus socios europeos. La financiación sufrió un parón a comienzos de los años setenta, y el gobierno australiano, evidentemente de la opinión de que no había futuro en la tecnología espacial, ordenó que las instalaciones fueran desmanteladas. Aún sigue habiendo una base militar en Woomera, y quizá algún día los cohetes vuelen de nuevo, pero por ahora la principal actividad científica está relacionada con la radiación cósmica. Para estudiarla es para lo que se ha diseñado CANGAROO.

La existencia de una forma de radiación penetrante procedente del espacio fue sospechada por primera vez hace un siglo, y desde entonces ha sido fuente de asombros y descubrimientos. A lo largo de los años se han identificado varias nuevas partículas subatómicas por primera vez entre los residuos de rayos cósmicos. Como expliqué en el capítulo anterior, las partículas que se detectan cerca de la superficie de la Tierra son fragmentos subatómicos producidos cuando partículas de alta velocidad procedentes del espacio (que resultan ser fundamentalmente protones) chocan con los núcleos atómicos en la atmósfera.

El equipo de Woomera detecta los rayos cósmicos de un modo ingenioso. Cuando incide una partícula primaria de alta energía crea un chaparrón de partículas secundarias que, a su vez, tienen también energías enormes. Este chaparrón está dirigido hacia abajo debido al momento lineal de la partícula primaria incidente, y se abre un poco en abanico antes de llegar al suelo. Algunas de las partículas eléctricamente cargadas incluidas en estos chaparrones se mueven realmente a velocidades muy próximas a la velocidad de la luz. De hecho, se mueven a más velocidad de lo que la luz se mueve en el aire. Este es un punto importante. La teoría de la relatividad prohíbe que una partícula subatómica vaya a una velocidad mayor que la velocidad de la luz en el vacío. Pero la luz viaja más lentamente en el aire, de modo que es posible que una partícula nuclear, que sólo puede ser frenada ligeramente por el aire, tenga velocidad superlumínica en la atmósfera. Si la partícula está eléctricamente cargada, crea una especie de onda electromagnética de choque, algo parecido a un boom sónico, pero con luz en lugar de sonido. Esta luz se conoce como «radiación Cherenkov», por su descubridor ruso. La radiación Cherenkov es fácil de identificar por el ángulo de su haz, de modo que los científicos de Woomera han construido ingeniosamente un dispositivo que hace precisamente eso.

El sistema trabaja explorando el oscuro cielo nocturno y registrando los minúsculos destellos Cherenkov que revelan el paso de un chaparrón de rayos cósmicos. No puedo resistirme a contar la historia de un sistema anterior, localizado en Buckland Park, mucho más cerca de Adelaida, y, como CANGAROO, diseñado para estudiar chaparrones de rayos cósmicos en el aire. El investigador principal era Roger Clay, un físico experimental de talento y un veterano intérprete de trombón que ha dedicado la mayor parte de su carrera a la investi-

gación de los rayos cósmicos. En 1974, Clay y sus colegas se sobresaltaron por algunos datos inusuales de Buckland Park. Tomada al pie de la letra, la información parecía sugerir que algunas de las partículas de los chaparrones en el aire no sólo estaban llegando al suelo por delante de la luz, sino que realmente viajaban a mayor velocidad que la luz *in vacuo*.

Esto era un asunto sensacional. Como he resaltado, la teoría de la relatividad prohíbe que cualquier partícula rompa la barrera de la luz. Si hiciera eso, las consecuencias para la naturaleza del tiempo serían profundas. Incluso hay un chascarrillo que nos advierte:

Había una señorita llamada Mariluz
que viajaba más rápida que la luz;
salió de casa un día
por relativa vía,
y regresó la noche anterior.

En resumen, viajar más rápido que la luz puede significar retroceder en el tiempo, con todos los enigmas y paradojas que de ello se siguen (véase el capítulo 10).

De hecho, la teoría de la relatividad no dice que «nada pueda ir más rápido que la luz», como a menudo se afirma. Ella permite que los objetos viajen a velocidades superlumínicas, incluso en el vacío, pero sólo si tales objetos nunca pueden viajar *más lentos* que la luz. En otras palabras, según la teoría de Einstein nada puede *cruzar* la barrera de la luz, ya sea aumentando o disminuyendo la velocidad. Los físicos han inventado un nombre para las partículas superlumínicas: se llaman «taquiones», por la palabra griega para «velocidad». Roger Clay y sus colegas creían haber encontrado taquiones.

Aunque los taquiones no están realmente descartados por la teoría de la relatividad, constituyen una molestia para los físicos, sobre todo porque pueden utilizarse para enviar señales al pasado. (La señorita Mariluz no puede viajar físicamente al pasado, en la forma recién descrita, sin violar la teoría de la relatividad, pero quizá podría manipular los taquiones para enviar un mensaje hacia un tiempo pasado. Cuando se trata de paradojas del viaje en el tiempo, esto es más o menos igual de grave, como veremos.) Hay también otros problemas, de naturaleza más técnica, para la incorporación de los taquiones en la estructura de la teoría física actual. Si usted hiciera una encuesta entre los físicos, calculo que encontraría aproximadamente un 90 por 100 en contra de la idea de los taquiones, un 1 por 100 a favor y el resto «no sabe/no contesta». (Curiosamente, Lucrecio sugirió la posibilidad de partículas más rápidas que la luz, aunque no era consciente de sus implicaciones temporales.) Recuerdo muy bien los comentarios sensacionalistas que se hicieron cuando el grupo australiano anunció su descubrimiento de posibles taquiones. Hubiera sido excitante. Pero un examen más prudente de los datos les llevó a quitar importancia a la afirmación, y dirigir su atención a otras cosas.

Entre estas otras cosas están algunas de las partículas ordinarias (es decir, no taquiones) más rápidas conocidas en el universo. A los físicos les gusta describir las partículas de alta velocidad por su energía más que por su velocidad. Esto se debe a que, puesto que la velocidad de la luz constituye una barrera, todas las partículas muy rápidas se mueven más o menos a la misma velocidad —apenas algo inferior a la velocidad de la luz *in vacuo*. De modo que una partícula puede tener una energía cinética diez veces mayor que una partícula similar, pero moverse sólo una pizca más rápida. La descripción en términos de energía resulta más natural cuando se llega a la discusión de la dilatación del tiempo.

Para desarrollar este punto, permítanme ponerlo en números. Las energías de las partículas se miden en una curiosa unidad llamada «electrón-voltio». Esta es la energía que adquiriría un electrón si fuera acelerado en un campo eléctrico con una diferencia de potencial de un voltio. Para hacerse una idea de ello, nótese que la energía cinética típica de un electrón que circula dentro de un átomo es de tan sólo algunos electrón-voltios. En comparación, la energía típica de una partícula primaria de rayos cósmicos sería de un billón de electrón-voltios, lo que sugiere que existen dinamos cósmicas ahí afuera en alguna parte que generan al menos un billón de voltios. La mayoría de los rayos cósmicos primarios son protones. Un protón con una energía cinética de un billón de electrón-voltios se mueve a aproximadamente un 99,9999 por 100 de la velocidad de la luz, mientras que un protón con una energía de diez billones de electrón-voltios se mueve a aproximadamente el 99,999999 por 100 de la velocidad de la luz. A estas velocidades es más informativo dar la *diferencia* entre la velocidad del protón y la de la luz. Para una partícula de 10 billones de electrón-voltios esta diferencia es de sólo de 3 metros por segundo: un paso de paseo más o menos. A 100 billones, la diferencia es de sólo 3 centímetros por segundo —literalmente un paso de tortuga— y a 1.000 billones cae a simplemente 0,3 milímetros por segundo. Y así sucesivamente. Nótese cómo un incremento adicional en energía implica un avance cada vez más pequeño en velocidad. (Mientras estaba en Woomera no podía dejar de recordar que un poco más lejos hacia el norte está el lago Eyre, una cuenca seca en su mayor parte en la que el aventurero y playboy británico Donald Campbell batió el récord de velocidad en tierra en 1964. Consiguio exactamente 429 millas por hora —691 kilómetros por hora— o 0,6 millonésimas de la velocidad de la luz).

Para convertir energías de rayos cósmicos en un factor de dilatación temporal, usted sólo tiene que utilizar una sencilla fórmula: se divide la energía del protón en electrón-voltios por 1.000 millones. Esto da el factor de estiramiento para la velocidad del reloj. Así pues, un protón de un billón de electrón-voltios tiene su tiempo frenado a una milésima de nuestro ritmo, mientras que para una partícula de 1.000 billones de electrón-voltios el factor es de una millonésima.

La instalación CANGAROO busca chaparrones en el aire producidos no por protones sino por *fotones* de rayos gamma con energías en el rango com-

prendido entre 1 billón y 10 billones de electrón-voltios. (Un fotón es un paquete, o cuanto, de luz. Los rayos gamma son fotones de longitud de onda muy corta.) Incluso estas enormes energías son modestas para los niveles de los rayos cósmicos. En 1993, un rayo cósmico primario (casi con certeza un protón) con una energía de 300 trillones de electrón-voltios fue detectado por un grupo norteamericano utilizando una instalación denominada Ojo de Mosca. El curioso nombre deriva de la geometría óptica empleada. El sistema detector Ojo de Mosca consiste en más de cien espejos de 1,5 metros de diámetro orientados en muchas direcciones diferentes, como las componentes del ojo compuesto de una mosca. Con esta disposición, la mayor parte del cielo nocturno puede ser cubierta a la vez. El complejo estaba instalado en un terreno árido casi tan desolado como Woomera, dominando un silo de misiles balísticos al oeste de Utah. Pero el Ojo de Mosca caza partículas nucleares en lugar de armas nucleares, rastreando rayos cósmicos primarios con las energías más altas conocidas.

A 100 billones de electrón-voltios, un simple protón tiene el mismo impulso que una pelota de béisbol, y el factor de distorsión temporal es un fantástico 100.000 millones. Un reloj que se moviese junto con una partícula semejante nos parecería marchar a una cienmilmillonésima del ritmo del reloj de pared de mi despacho. Cada día que pasa en la Tierra corresponde a sólo un microsegundo del tiempo de la partícula (y viceversa, por supuesto). Un tic de un reloj de oficina marchando al paso de un rayo cósmico semejante ocurriría sólo una vez cada 3.000 años terrestres. Este enorme factor de distorsión tiene implicaciones para la naturaleza de las partículas de rayos cósmicos involucradas. Realmente, nadie sabe qué es exactamente lo que produce los rayos cósmicos, especialmente aquellos con energías tan altas como 100 trillones de electrón-voltios. Supernovas, núcleos galácticos en explosión, púlsares y agujeros negros, son todos ellos posibles fuentes de rayos cósmicos, pero ningún mecanismo simple parece explicar todas las partículas de rayos cósmicos procedentes del espacio. Parte del problema es que los rayos cósmicos llegan a la Tierra en número más o menos igual en todas direcciones, de modo que es difícil identificar fuentes específicas. Además, las partículas cargadas como los protones son desviadas por el campo magnético de la galaxia, de modo que la dirección de su llegada quizá no da mucha información de su origen.

Una excepción a esto es un objeto conocido como Cygnus X-3, una fuente de rayos X que consiste en un par de estrellas que han hecho implosión situadas a 35.000 años luz de distancia en la constelación del Cisne. A mediados de los años ochenta, el Ojo de Mosca y otros sistemas de detección encontraron rayos cósmicos energéticos procedentes de la dirección de Cygnus X-3. Para evitar la deflexión magnética, las partículas tienen que estar descargadas; esto descarta los protones. Los físicos empezaron a preguntarse si podría estar involucrado algún nuevo tipo exótico de partícula eléctricamente neutra. Algunas teorías predicen la existencia de partículas neutras pesadas llamadas «fotinos». ¿Podrían ser fotinos los rayos cósmicos procedentes de Cygnus X-3? Quizá.

Pero existe otra posibilidad exótica. El humilde neutrón está descargado. ¿Podría ser esta la partícula misteriosa? Los neutrones no figuran normalmente en los estudios de rayos cósmicos porque son inestables. La vida media para la desintegración de un neutrón es de alrededor de quince minutos, y no se puede viajar muy lejos en ese tiempo. Pero aquí es donde entra la distorsión del tiempo. Si el neutrón se mueve lo suficientemente rápido, entonces, en nuestro sistema de referencia, su vida media podría llegar a ser enormemente ampliada. A un trillón de electrón-voltios y un factor de distorsión de 1.000 millones, quince minutos se traducen en 30.000 años. Esto significa que un neutrón semejante podría viajar 30.000 años-luz por el espacio antes de desintegrarse, tiempo más que suficiente para llegar a la Tierra desde Cygnus X-3. ¡Esto es dilatación temporal a lo grande! Si usted pudiera viajar a esta velocidad, viviría miles de millones de años terrestres.

¿Significa esto que la alta velocidad es el secreto de la eterna juventud?

¡No! Muchas personas caen en esta trampa. Lo que significa el comentario anterior acerca de que usted viviría miles de millones de años es esto: En el sistema de referencia de la Tierra, su duración media de vida de 75 años abarcaría miles de millones de años de tiempo terrestre. En su propio sistema de referencia, 75 años siguen siendo 75 años. Desde su perspectiva, son los sucesos en la Tierra los que se frenan. Un tic de un reloj en la Tierra correspondería a 3.000 de sus años. Por desgracia, usted no puede utilizar la dilatación del tiempo relativista para retrasar su propio proceso de envejecimiento con relación a su propia experiencia del tiempo, sino sólo con relación a la de algún otro.

Ahora hay algo que me confunde, se queja nuestro escéptico. He leído que la edad del universo es de 15.000 millones de años. Pero ¿de qué 15.000 millones de años se trata? Si algunos rayos cósmicos pueden comprimir billones de años en 75, ¿no significa esto que el universo comenzó hace aproximadamente un año, según el tiempo del rayo cósmico? O quizá yo estoy siguiendo el camino equivocado, y es un año de nuestro tiempo el que equivale a miles de millones de años de tiempo del rayo cósmico. ¿Ven ellos ciertamente nuestros 15.000 millones de años estirados hasta 1.000 trillones de años? Puestos a pensar sobre ello, ¿no está el universo siempre en movimiento, con galaxias que se alejan, algunas de ellas próximas a la velocidad de la luz? ¿No es cierto que el tiempo flexible de Einstein comete el absurdo de datar el origen del universo? Éste no tiene realmente una fecha, ¿o sí la tiene?

Bien; sí y no. Veremos en un capítulo posterior cómo desenredar estos tiempos diferentes. Pero la objeción es válida. Una vez que aceptamos que el tiempo ya no es absoluto y universal, la cuestión de si existe algún tipo de tiempo

cósmico, y de si es único, resulta crucial. No tenemos intuición que nos guíe aquí porque en la vida diaria el tiempo actúa convincentemente como si fuera la dimensión absoluta y universal que nosotros sabemos que no es.

La razón de que el tiempo flexible no sea parte de nuestra experiencia cotidiana de sentido común es que los seres humanos raramente alcanzan velocidades relativas mayores que una millonésima de la velocidad de la luz, y cualquier dilatación del tiempo es demasiado pequeña para ser advertida. En 1905, el tren era la forma de transporte más rápida, y las primitivas discusiones del tiempo relativista solían incluir a observadores a bordo de trenes. Sin embargo, Einstein utilizó el hecho de que la Tierra gira más rápidamente que cualquier tren para concluir que «un reloj de péndulo en el ecuador debe marchar más lentamente, en una medida imperceptible, que un reloj exactamente igual situado en uno de los polos bajo condiciones idénticas».¹ Aunque Einstein no lo sabía cuando escribió las palabras anteriores, la Tierra es realmente responsable de *dos* distorsiones del tiempo, que de hecho se cancelan —¿de modo que estaba equivocado! Una es debida a la rotación de la Tierra, y la otra a su gravedad. Fue el propio Einstein quien descubrió el efecto gravitatorio del tiempo, un par de años más tarde.

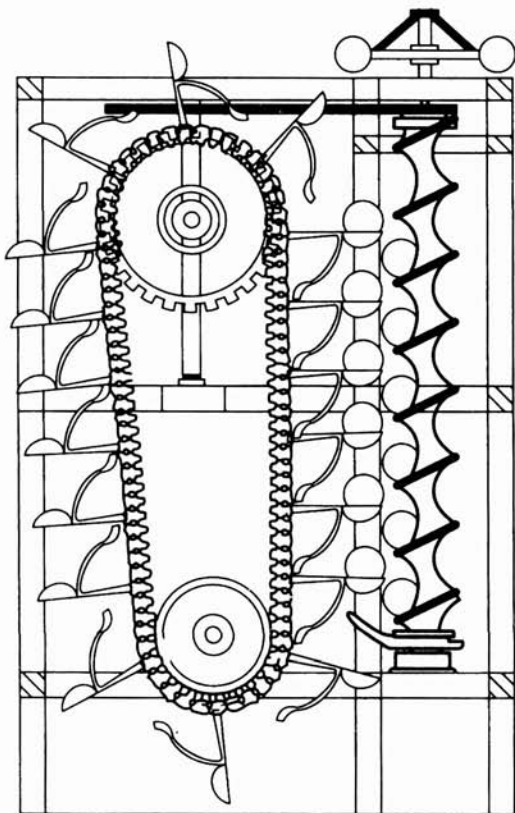
¿Por qué la gravedad afecta al tiempo? Hay muchos argumentos fascinantes que sugieren que debe hacerlo. Uno de ellos tiene que ver con ese viejo sueño del ingeniero: el movimiento perpetuo.

El movimiento perpetuo y la lucha cuesta arriba

No existe una comida gratuita.

MILTON FRIEDMAN

Si los artículos sobre el tiempo encabezan la lista de manuscritos disparatados que circulan por los departamentos de física de la universidad, los que tratan del movimiento perpetuo vienen muy cerca en segundo lugar. La búsqueda de una máquina que diera algo por nada tiene una larga y triste historia, que se remonta a la Antigüedad. En su momento llamó la atención de pensadores ilustres como Leonardo da Vinci y Robert Boyle. Escribiendo en 1906, el examinador asistente de la Oficina de Patentes británica advertía que su organización había recibido seiscientas solicitudes de patente de máquinas de movimiento perpetuo desde 1617.² Continuaba describiendo una de las propuestas más comunes, que he esbozado en la figura 3.1. La máquina consta de una cinta transportadora continua con cazoletas unidas a ella. En un lado del dispositivo las cazoletas están llenas con bolas; en el otro lado están vacías. El peso de las bolas empuja la cinta hacia abajo en el primer lado. Cuando las bolas llegan al fondo, salen de las cazoletas y entran en un mecanismo de tornillo gigante que las transporta de nuevo arriba. La potencia motriz para girar el tornillo



3.1. ¿Algo a cambio de nada? El dibujo muestra un diseño de una típica máquina de movimiento perpetuo primitiva.

procede de la propia cinta giratoria, comunicada a través de un sistema de engranajes. Se nos pide que creamos que todo el ingenio seguirá girando sin necesidad de una máquina que lo impulse; en realidad, que incluso puede producir un superávit de energía gratis.

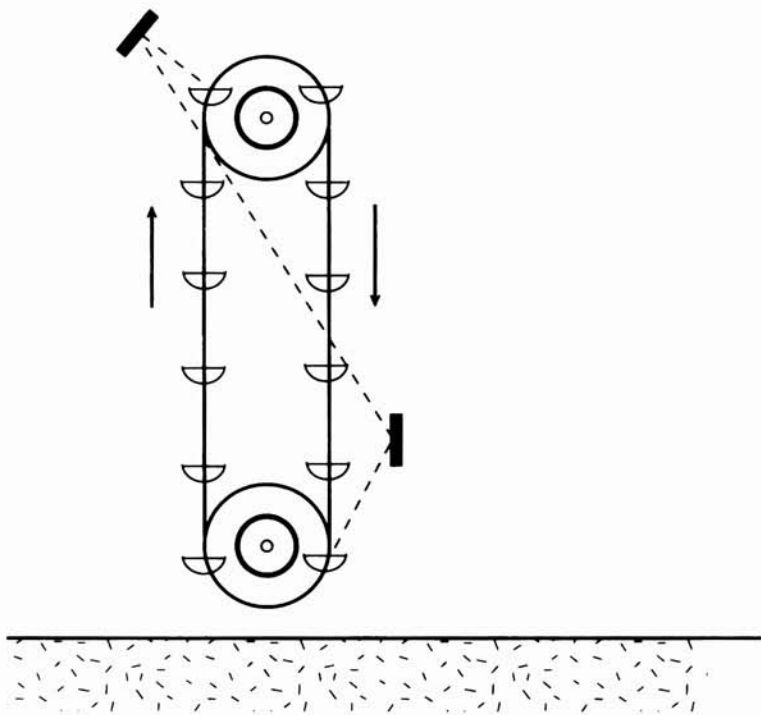
Existen dos leyes de la física que nos dicen que la búsqueda de semejante movimiento perpetuo está condenada al fracaso. La primera es la ley de conservación de la energía. Ésta afirma que usted no puede sacar más energía de un sistema cerrado que la que pone en él; todo lo que usted puede hacer es mover energía o cambiar su forma y esperar que no pierda el control de buena parte de ella en el proceso. Lo que se le escapa de sus dedos aparece finalmente en forma de calor. Cuando toda la energía motriz se ha convertido en calor, la máquina se detiene. La ley de conservación de la energía se denomina a veces primera ley de la termodinámica. La segunda ley de la termodinámica le dice

que, cuando la energía se ha disipado en forma de calor, usted no puede recuperarla sin utilizar al menos una energía igual en el proceso. Cualquiera que trate de generar energía sin combustible chocará con la primera ley. Cualquiera que simplemente quiera el movimiento perpetuo chocará tanto con la primera como con la segunda ley, porque en cualquier sistema real hay siempre disipación —normalmente en forma de fricción— que lentamente consume la energía de cualquier sistema en movimiento. Por esto es por lo que todos los motores necesitan un suministro de combustible para seguir funcionando. En el caso de la cinta transportadora, la energía producida por la caída de las bolas es inferior a la suma de la energía necesaria para hacer funcionar el mecanismo y a la disipada en forma de calor, producido cuando los engranajes giran. Las bolas que suben se pararían antes de llegar a su destino.

La figura 3.2 muestra un diseño de una máquina de movimiento perpetuo debido al matemático Hermann Bondi, que se dice basada en una idea del propio Einstein, y claramente inspirada por el diseño antiguo de la figura 3.1. Consiste una vez más en una cinta transportadora con un montón de cazoletas unidas a ella a intervalos regulares. Sin embargo, cada cazoleta contiene no una bola, sino un simple átomo. Los átomos en las cazoletas de la izquierda están en estados excitados, mientras que los átomos a la derecha están en sus estados de más baja energía, o estados fundamentales. El principio de funcionamiento de la máquina se basa en la fórmula de Einstein $E = mc^2$. Ésta dice que la energía E tiene masa m y, puesto que la masa tiene peso, podemos deducir que los átomos excitados (que tienen más energía que los que están en sus estados fundamentales) pesan más. Debería dejar claro que esta no es una propuesta práctica en la forma descrita, porque el peso extra de los átomos es minúsculo, pero el montaje sólo pretende ser una idealización para ilustrar una cuestión de principio.

La desigual distribución de peso hace que la cinta gire, puesto que los átomos más pesados de la izquierda empujan la cinta hacia abajo en ese lado. En el fondo del transportador hay algún tipo de aparatito que induce que los átomos excitados cedan su energía en forma de fotones de luz. La fotoemisión inducida por átomos es familiar a los físicos y se da en los láseres, por ejemplo. Este montaje asegura que cuando las cazoletas llegan a la parte derecha del transportador, sus átomos están en el estado fundamental más ligero, como se requería. Los fotones emitidos se dirigen hacia la parte superior del transportador —viajan allí sin la asistencia de un tornillo— donde son reflejados hacia las cazoletas que llegan allí y utilizados para excitar los átomos contenidos en ellas. De este modo los átomos de la izquierda se mantienen excitados y los de la derecha se mantienen desexcitados mientras el transportador continúa girando. Así pues, las condiciones desiguales se mantienen y el movimiento puede ser utilizado para generar electricidad, aparentemente *ad infinitum*, sin utilizar combustible.

Ahora bien, Einstein y Bondi nunca supusieron que hubieran encontrado una escapatoria de las leyes de la termodinámica. En lugar de ello, aceptaron



3.2. La distorsión gravitatoria del tiempo impide que este ingenioso dispositivo, debido a Hermann Bondi, produzca energía.

que el movimiento perpetuo es imposible y procedieron a argumentar de otra forma. Parece que las hipótesis incorporadas en el diseño del transportador deben ser contrarias a la física. Había algunas razones por las que la energía del fotón liberada en el fondo no es suficiente para compensar la excitación de los átomos en la cima. El déficit debería ser precisamente igual a la energía que supuestamente crea la máquina. De este modo, las cuentas se cuadran.

La energía del transportador giratorio procede de la gravedad, que tira hacia abajo de los átomos más pesados. Esto sugiere que la gravedad hace algo compensatorio para privar a los fotones que suben de la energía ganada cuando los átomos descienden. Evidentemente, mientras los fotones luchan cuesta arriba contra la gravedad, se debilitan. Como resultado, llegan a la cima con menos energía con la que empezaron en el fondo, y por ello son incapaces de excitar los átomos a los mismos niveles que antes. El transportador se frenará poco a poco y se detendrá: el destino ignominioso de todos los *perpetui mobiles*.

El dispositivo transportador sugiere que la gravedad afecta a la luz, pero ¿qué tiene eso que ver con el tiempo?

¿Por qué el tiempo corre más rápido en el espacio?

Antes de explicar la relación entre el debilitamiento de la luz y el tiempo, permítanme describir otro argumento que confirma el nexo entre la luz y la gravedad. El propio Einstein llegó a la idea de que la gravedad afecta a la luz mediante una línea de razonamientos completamente diferente, en 1907. En este periodo de su carrera su genio había sido reconocido por la comunidad científica, pero seguía siendo un empleado en la Oficina de Patentes suiza; no tenía aún un puesto universitario. (La historia no registra si él se encontró con solicitudes de movimiento perpetuo análogas a las de su homólogo británico.) Sin embargo, se había doctorado por la Universidad de Zurich con un proyecto de investigación sobre mecánica estadística.

Parece que sus obligaciones no eran demasiado exigentes y Einstein tenía mucho tiempo para sentarse y reflexionar sobre la naturaleza del universo físico. En 1907, mientras contemplaba los misterios de la gravitación, dio con una elegante línea de razonamiento que tipifica el modo en que era capaz de extraer conclusiones profundas acerca del mundo basadas en el puro pensamiento. Como Galileo tres siglos antes, Einstein comenzó sus elucubraciones sobre la gravitación comparando una fuerza gravitatoria con una aceleración.

En primer lugar, imaginó qué sensación produce una aceleración. En la versión final del argumento utilizó el ejemplo de un ascensor que repentinamente empieza a subir. Todos estamos familiarizados con la forma en que el movimiento acelerado produce «fuerzas g» —esto es, una sensación análoga a la de la gravedad. Un ascensor que se acelera hacia arriba le presiona a usted hacia el suelo, sumándose a su peso, mientras que un ascensor que se acelera hacia abajo, «le produce un vuelco en el estómago» como si momentáneamente se redujera su peso. Otro ejemplo de aceleración que simula gravedad es la rotación. En la película de Stanley Kubrick *2001: una odisea del espacio*, la estación espacial tiene forma de rueda y gira lentamente para crear «gravedad artificial» en su periferia. Aunque Galileo y Newton eran conscientes de la estrecha relación entre aceleración y gravitación, ellos la consideraban como una característica accidental de la naturaleza. Einstein la elevó a un principio fundamental, que denominó «principio de equivalencia», que establece que, en el entorno inmediato de un sistema acelerado, la aceleración es físicamente equivalente a una fuerza gravitatoria.

El siguiente paso del argumento de Einstein consistió en observar que el movimiento tiene un efecto sobre la luz, el efecto Doppler que he mencionado en el capítulo anterior en relación con el efecto de los gemelos. Un buen ejemplo del efecto Doppler *audible* en acción se produce cuando un coche de policía pasa a gran velocidad con la sirena en funcionamiento. El tono de la sirena desciende repentinamente cuando el coche pasa (uui-uui-uui-uu-uoo-uoo-uoo...). Esto sucede porque el coche que se acerca velozmente comprime las ondas sonoras ante él, aumentando su frecuencia. A la inversa, cuando el coche se está

alejando, las ondas que le llegan a usted están estiradas hasta una frecuencia más baja. Lo mismo sucede con las ondas luminosas: la luz procedente de una fuente que se acerca sufre un aumento de frecuencia, mientras que la luz procedente de una fuente que se aleja sufre un descenso de frecuencia (sólo un cambio muy pequeño para las velocidades cotidianas). Puesto que la frecuencia de la luz está relacionada con su color, el desplazamiento Doppler para la luz equivale a un cambio de color. El extremo de longitudes de onda largas del espectro visible es rojo, y el extremo de longitudes de onda cortas es azul, de modo que una fuente que se aproxima está desplazada hacia el azul, y una fuente que se aleja está desplazada hacia el rojo. El efecto Doppler se aplica a todas las ondas electromagnéticas; por ejemplo, se utiliza en los radares policiales para detectar los automóviles con exceso de velocidad.

Combinando el principio de equivalencia y el efecto Doppler, Einstein dedujo ingeniosamente que la gravedad afecta a la luz. Imagínese que se está alejando aceleradamente de una fuente luminosa. A medida que su velocidad aumenta, también la luz se verá cada vez más desplazada hacia el rojo por el efecto Doppler. Por lo tanto, razonó Einstein, también debería ser desplazada hacia el rojo por un campo gravitatorio, puesto que una aceleración simula un campo gravitatorio y debería producir efectos físicos equivalentes. Utilizando su teoría de la relatividad especial, fue capaz de llegar a la fórmula que describe la magnitud del efecto de desplazamiento hacia el rojo gravitatorio.

Es este desplazamiento hacia el rojo el que nos salva de la paradoja del *perpetuum mobile*, porque existe una relación entre la frecuencia de la luz y la energía de los fotones correspondientes. De hecho, estas dos magnitudes están en proporción directa. Así pues, si la luz se desplaza hacia el rojo, la energía del fotón se reduce; de este modo, en el sistema transportador los fotones que llegan a la cima del dispositivo estarán debilitados, y serán incapaces de excitar los átomos que allí se encuentran.

Estamos ahora listos para hacer la importante conexión con el tiempo. La palabra «frecuencia» significa número de ciclos por segundo; si la frecuencia de la luz disminuye como resultado de un desplazamiento hacia el rojo de origen gravitatorio, el número de ciclos de la onda que pasa por cada punto en el espacio cada segundo se reduce. Pero para medir la frecuencia necesitamos utilizar un reloj que cuente los segundos. Por lo tanto, si la luz procedente del fondo del transportador llega a la cima con una frecuencia menor, podríamos decir o bien que la frecuencia de la luz se ha reducido, o, igualmente bien, que el tiempo en el fondo del transportador corre un poco más lento que el tiempo en la cima. Después de todo, puesto que sólo podemos medir frecuencias utilizando relojes, un cambio en la frecuencia es equivalente a un cambio en la velocidad de los relojes. ¿No es así?

Esto parece un poco tramposo, se queja nuestro escéptico siempre vigilante. ¿Por qué no podemos decir simplemente que la frecuencia de la luz

cambia con la altura, y mantener que el tiempo es el mismo a cualquier altura?

Bien; supongamos que utilizamos los ciclos de la onda luminosa como los latidos de un reloj. Eso sería un reloj perfectamente bueno. En ese caso, el desplazamiento hacia el rojo gravitatorio equivaldría, directamente, a un cambio en la velocidad del reloj.

Perfecto. Pero ¿qué pasa si utilizamos otro tipo de reloj? No tenemos por qué utilizar un reloj de onda luminosa. Usted no puede afirmar que el *propio tiempo* cambia con la altura a menos que *todos* los relojes se vean afectados de la misma forma.

Es verdad. ¡Y eso ocurre realmente! He aquí la razón. El tic-tac de un reloj tiene cierta energía asociada, y esta energía tiene peso, como todas las formas de energía ($E = mc^2$ de nuevo). Si usted eleva un reloj a una altura mayor, tiene que realizar un trabajo sobre él —contra su peso, por así decir. El trabajo realizado aparece como energía gravitatoria almacenada en el reloj; usted podría recuperarla permitiendo que el reloj caiga de nuevo abajo. Ahora bien, una parte muy pequeña del peso total del reloj procede de su energía interna, la energía del tic-tac. Por lo tanto, una porción de la energía extra ganada por el reloj cuando es levantado viene como resultado de nuestra elevación del peso del tic-tac. Esta porción (por minúscula que sea) se manifiesta en forma de una energía extra de tic-tac, como resultado de la cual el reloj marcha un poco más rápido. Así, ¡elevar un reloj le hace correr más rápido! Un estudio cuidadoso revela que la velocidad del reloj cambia con la altura exactamente de la misma forma en que una onda luminosa o un fotón pierde frecuencia cuando sube. Además, el efecto es independiente del diseño del reloj. Cualquiera que sea el reloj en el que usted esté interesado (incluyendo el cerebro humano), marchará más rápido ahí arriba que aquí abajo. Y el cambio en la velocidad es idéntico para cualquier tipo de reloj. Así pues, más que decir «Todos los relojes corren más rápido ahí arriba», es mejor decir «El tiempo corre más rápido ahí arriba».

Recapitemos el razonamiento hasta aquí. Hemos llegado a la conclusión que, debido a que las máquinas de movimiento perpetuo son imposibles, el tiempo «se acelera» con la altura. Einstein llegó a la misma conclusión a partir de una consideración de los ascensores acelerados y el efecto Doppler. Ambos argumentos sugieren que cuanto más alto suba usted, más rápido corre el tiempo. Aparte de mencionar que el efecto es minúsculo, no he dado ninguna cifra, pero, para poner un ejemplo, un reloj en el suelo perderá, al cabo de una hora, un nanosegundo (una milmillonésima de segundo) con respecto a un reloj en el espacio. El efecto implica también que el tiempo corre ligeramente más rápido en el último piso de un edificio que en la planta baja. Durante un tiempo de vida normal, usted ganaría un microsegundo aproximadamente sobre sus

vecinos más altos simplemente por vivir en la planta baja. Usted podría estar inclinado a pensar que semejantes distorsiones temporales minúsculas son indetectables y completamente insignificantes, pero, de hecho, no son ninguna de las dos cosas. No sólo pueden medirse, sino que bajo ciertas circunstancias las distorsiones de tiempo gravitatorias pueden hacerse enormes y llevar a efectos espectaculares, como discutiré enseguida.

Usted tendría derecho a ser escéptico sobre los argumentos teóricos anteriores tomados por sí solos. Si el tiempo realmente cambia con la altura, es importante demostrarlo experimentalmente. Antes de llegar a ello, me gustaría ilustrar un último efecto de la gravedad sobre el tiempo. Irónicamente, este tercer argumento se utilizó contra Einstein —quien lo había pasado por alto— en un famoso debate con el físico danés Niels Bohr. Su encuentro tuvo lugar mucho después —en 1930— cuando Einstein era famoso internacionalmente y tenía un premio Nobel. Pero el intelecto de Bohr le igualaba en todos los aspectos.

El reloj en la caja

Sucedió que Bohr y Einstein pasaron años discutiendo. La manzana de la discordia no era la teoría de la relatividad, que fue aceptada rápidamente por la comunidad de físicos, sino la igualmente revolucionaria y perturbadora teoría cuántica. Recordemos que Einstein contribuyó al nacimiento de esta teoría cuando dio una explicación acertada para el efecto fotoeléctrico en 1905, el mismo año en que publicó su primer artículo sobre la relatividad. Sin embargo, no fue hasta finales de los años veinte cuando la física cuántica fue colocada sobre una base firme en la forma de una «mecánica cuántica» global, una empresa presidida por el gran Niels Bohr.

Uno de los fundadores de la nueva mecánica cuántica fue el joven físico alemán Werner Heisenberg. Éste propuso en 1927 un principio fundamental de la física cuántica. Conocido como el «principio de incertidumbre», pone límites estrictos al grado de precisión con el que podemos determinar las propiedades de una partícula. Para concretar, pensemos en un electrón. En otras palabras, todos los atributos medibles del electrón están sujetos a incertidumbres en sus valores. Así, por ejemplo, a usted le gustaría saber dónde está localizado un electrón y a qué velocidad se mueve. El principio de incertidumbre de Heisenberg le dice que usted no puede determinar con precisión ambas magnitudes al mismo tiempo. Cuanto más precisamente mida la posición del electrón, con menos precisión puede conocer su movimiento, y viceversa. Hay un inevitable regateo entre estas dos variables. Si usted sabe dónde está un electrón, usted está confuso sobre su movimiento; si conoce cómo se está moviendo, no puede saber dónde está exactamente. Relaciones de incertidumbre similares se aplican a otros pares de magnitudes. Un caso importante concierne a

la energía de la partícula y al tiempo durante el que se mide la energía; ambos son mutuamente inciertos.

Estas incertidumbres fundamentales no pueden derivarse a partir de las ideas normales o de sentido común sobre las partículas —es decir, a partir de lo que se conoce como física clásica. Son por completo una propiedad del mundo cuántico. La vaguedad o borrosidad que expresa el principio de incertidumbre está estrechamente asociada a otro tipo de vaguedad conocido como «dualidad onda-partícula». Una entidad tal como un electrón, que normalmente consideramos una partícula, toma a veces las características de una onda. Recíprocamente, la luz, que normalmente consideramos una onda, puede comportarse como una corriente de partículas (fotones). Obviamente, en el mundo cotidiano algo no puede ser a la vez una onda y una partícula: ambas son cosas bastante diferentes. Pero en el dominio cuántico, semejante naturaleza dual es posible, y se manifestará o bien el aspecto de onda o bien el aspecto de partícula de la entidad cuántica dependiendo de las circunstancias. Usted no debe tratar de imaginar lo que es «realmente» un fotón, por ejemplo, pues dicha cuestión casi con certeza carece de significado. No se parece a nada que podamos encontrar en el mundo macroscópico de la experiencia humana.

Mencioné en la sección anterior que la energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la luz. Esta frase suena bastante inocente, pero encierra una sutileza. El concepto de frecuencia tiene sentido sólo cuando se aplica a una onda, mientras que la energía del fotón se refiere a una partícula. Así pues, aquí tenemos dualidad onda-partícula en acción. Obviamente, una medida de la frecuencia de una onda requiere tiempo: hay que dejar que la onda oscile algunos ciclos y medir su duración. Si usted trata de cortar una onda de luz en pedazos minúsculos de muy corta duración, ya no tendrá una onda con una simple frecuencia bien definida, o fotones con una simple energía bien definida. De este modo, usted puede ver el regateo de Heisenberg operando aquí: fijar la energía del fotón requiere muchos ciclos de la onda, lo que inevitablemente ocupa un cierto tiempo. Determinar dónde está el fotón en un instante dado significa cortar un pequeño trozo de la onda y, por consiguiente, difuminar la energía. Esta es, por lo tanto, una forma de considerar el principio de incertidumbre energía-tiempo.

Las relaciones de incertidumbre de Heisenberg conducen a efectos notables y espectaculares a escala atómica, aunque no los advertimos en la vida cotidiana: son demasiado pequeños. Sin embargo, por consistencia, dichas relaciones deben aplicarse a todos los sistemas físicos, cualquiera que sea su tamaño o masa; de otra forma podríamos utilizar objetos macroscópicos para violar el principio de incertidumbre. Así, incluso si no notamos cambios cuánticos incontrolables en las posiciones o energías de cuerpos ordinarios, tales cambios deberían de todas formas estar presentes si la teoría tiene que tener sentido.

Einstein no creía en el principio de incertidumbre de Heisenberg. Más exactamente, él no pensaba que la física cuántica, de la cual este principio es una

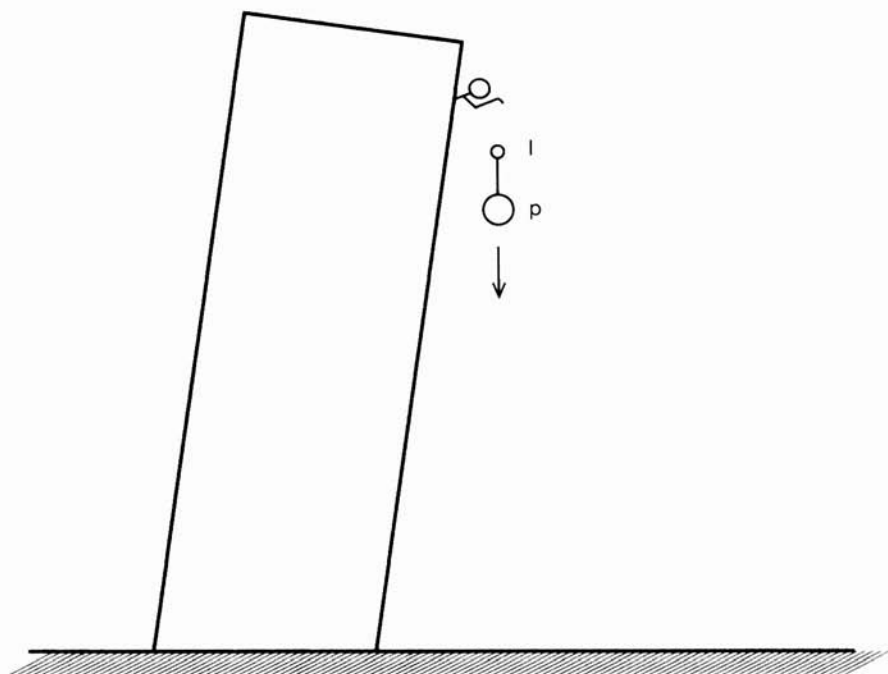
parte indispensable, proporcione una descripción completa de la realidad. Puso gran ingenio en tratar de encontrar un fallo o una contradicción en las reglas de la teoría cuántica, sólo para que Bohr la refutase convincentemente. En 1930, el debate Bohr-Einstein había alcanzado nuevas cumbres de sofisticación. Ese año, la compañía química francesa Solvay financió una conferencia en Bruselas para discutir sobre magnetismo,* y esto proporcionó a Einstein una oportunidad para presentar su último argumento contra la mecánica cuántica para que Bohr le diera vueltas en su cabeza. En esta época, casi todos los físicos estaban aceptando la nueva mecánica cuántica como una descripción precisa y completa del mundo, por extrañas que pudieran ser a veces sus conclusiones. Einstein se negó obstinadamente a seguir a la mayoría.

En aquellos años de preguerra, gran parte de la discusión sobre los procesos atómicos y subatómicos era puramente teórica. Se habían realizado algunos experimentos clave, pero todavía no se disponía de la tecnología necesaria para poner a prueba por completo los fundamentos conceptuales de la disciplina. Los físicos solían hablar de ello y dibujar diagramas de procesos cuánticos sin sugerir seriamente que los fenómenos que estaban en discusión pudieran ser producidos en el laboratorio. Se trataba de «experimentos mentales» idealizados, factibles en principio pero demasiado difíciles de llevar a cabo en la práctica. Muchos de ellos implicaban un análisis de efectos cuánticos en objetos macroscópicos como pantallas metálicas y poleas, efectos que serían demasiado pequeños para que pudiera haber cualquier esperanza de medirlos.

Usted podría preguntarse cómo pueden los científicos decir algo útil sobre el mundo meramente sentándose y pensando sobre experimentos completamente impracticables. Esto plantea interesantes cuestiones filosóficas y merece una breve digresión. La ciencia se basa en la hipótesis de que el mundo es racional, y que el razonamiento humano refleja, aunque de una forma algo vacilante, un orden subyacente en la naturaleza. La consistencia lógica requiere que las diversas leyes y principios que gobiernan el mundo natural deben encajar consistentemente. A veces es posible, siguiendo tenazmente un enfoque lógico, hacer descubrimientos sobre el mundo real sin realizar siquiera un experimento; simplemente imaginando un estado físico de cosas concreto. En la práctica, resulta esencial confirmar experimentalmente tales predicciones teóricas, ya que hay muchos ejemplos históricos de pensamiento aparentemente racional que da lugar a conclusiones absurdas. Los experimentos mentales pueden ser positivos o negativos: pueden sugerir nuevas leyes o principios, o poner de manifiesto inconsistencias en las teorías existentes.

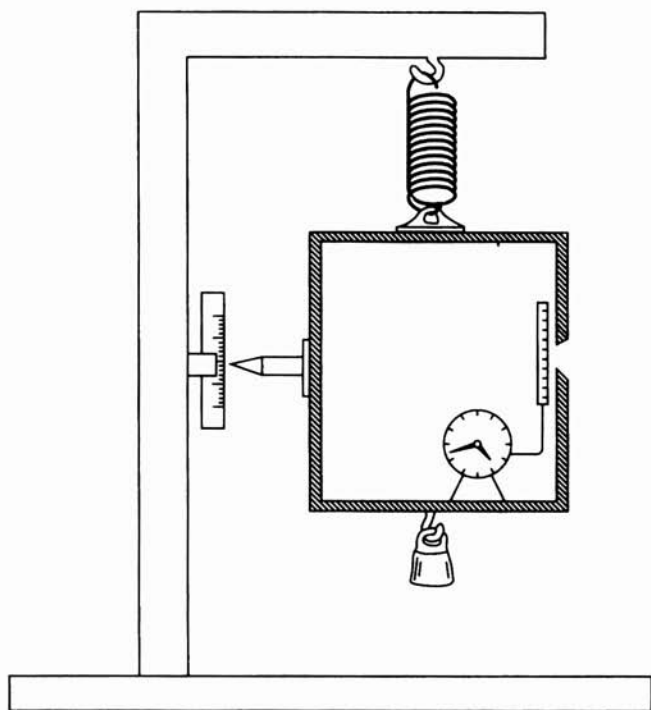
Einstein era un maestro de los experimentos mentales: «Creo que el puro pensamiento es suficientemente competente para comprender el mundo», es-

* Las Conferencias Solvay de física se instituyeron en 1912, financiadas por el industrial belga Ernst Solvay, y tenían lugar en Bruselas cada tres años. La de 1930 era la sexta de tales conferencias. (*N. del t.*)



3.3. Todos los cuerpos caen a la misma velocidad. El cuerpo ligero l , unido mediante una cuerda al cuerpo pesado p , no puede ejercer ninguna influencia sobre la velocidad de caída de p , o existiría una contradicción lógica.

cribió una vez al explicar sus procesos de razonamiento.³ Ya he mencionado cómo llegó a predecir el efecto de distorsión gravitatoria del tiempo imaginando de qué forma una aceleración, que se asimila a la gravedad, produciría un desplazamiento Doppler hacia el rojo en un haz luminoso. No intentó llevar a cabo un experimento de este tipo, contentándose con fiarse de la consistencia matemática y lógica de la naturaleza. De hecho, los experimentos mentales relacionados con la gravedad tienen una larga y honorable historia que se remonta a Galileo, quien demostró por primera vez que todos los cuerpos caen a la misma velocidad cuando la resistencia del aire es despreciable. Para probarlo, Galileo experimentó con cuerpos en caída (según la leyenda, arrojando pesos desde la torre inclinada de Pisa), pero también hizo uso de un experimento mental. Su propósito era refutar la teoría popular, debida a Aristóteles, de que los cuerpos pesados caen con más velocidad que los cuerpos ligeros. Imaginemos que un cuerpo pesado p está unido a un cuerpo ligero l por una cuerda tenue, y que los dos cuerpos se dejan caer desde una torre (véase la figura 3.3). Entonces podemos plantear la pregunta: ¿la presencia de l incrementa



3.4. Una representación artística del experimento mental de Einstein para refutar la mecánica cuántica. De hecho, lo que demuestra es que el tiempo se frena con la altura.

o reduce la velocidad de caída de p ? Supongamos que Aristóteles tiene razón: entonces l debería quedar rezagado tras p . Si es así, la cuerda se tensaría y l tendría el efecto de *frenar* la caída de p . Por el contrario, el sistema l más p , tomado en conjunto, es más pesado que p sólo, y por ello debería caer más rápidamente que p sólo. Si es así, entonces l tiene el efecto de *acelerar* la caída de p . Pero esto es completamente absurdo: la teoría de Aristóteles nos ha llevado a extraer conclusiones contradictorias, a saber: que l disminuye y aumenta a la vez la velocidad de caída de p . La única explicación consistente es que la presencia de l no tiene efecto sobre p : tanto l como p caen a la misma velocidad. Así pues, Galileo fue capaz de derribar la teoría de Aristóteles sin siquiera subir a la torre inclinada de Pisa. De un modo análogo, Einstein se propuso derribar la mecánica cuántica cuando se levantó para hablar en la famosa conferencia de 1930.

El aparato hipotético para el experimento mental de Einstein consistía en una caja metálica suspendida mediante un muelle de una estructura rígida (véase la figura 3.4). La caja tiene un pequeño agujero en un lado. También contiene

un reloj programado para controlar un obturador que abre y cierra el agujero durante un breve intervalo de tiempo en algún instante predeterminado. La posición vertical de la caja puede medirse por medio de un puntero y una escala. Además de contener un reloj, la caja está llena de luz. El experimento consiste en un intento de medir la energía de un fotón y el momento en que escapa de la caja con precisión ilimitada, en flagrante violación del principio de incertidumbre de Heisenberg. Esto es lo que usted hace. En primer lugar, pesa la caja. Luego espera a que el mecanismo de relojería abra el obturador brevemente permitiendo que escape un solo fotón. El reloj registra el instante en que esto sucede. Ahora se pesa la caja otra vez. Puesto que ha perdido un fotón, será más ligera. La diferencia de peso dará la masa del fotón y, por la fórmula de Einstein $E = mc^2$, usted puede calcular su energía.

La precisión en la energía del fotón está limitada solamente por la precisión de la pesada. Usted no necesita realmente pesar la caja antes y después, puesto que sólo se requiere la diferencia de peso. Ésta puede inferirse a partir del movimiento vertical de la caja: una vez que el fotón ha escapado, la caja será más ligera, y por lo tanto el puntero indicará una posición más alta sobre la escala. Uniendo un peso compensatorio al fondo de la caja, el puntero puede ser devuelto, en reposo, a su posición de partida. El valor de este peso igualará entonces el peso del fotón perdido. La duración de la apertura del obturador puede hacerse tan breve como usted quiera, siempre que usted tenga montones de fotones dentro de la caja. De este modo, el tiempo de escape del fotón puede conocerse también con mucha precisión. En consecuencia, tanto la precisión de la energía como la del tiempo parecen estar limitadas sólo por características accidentales que en principio pueden refinarse arbitrariamente. La poderosa conclusión que Einstein sacó era que el principio de incertidumbre podía ser evitado en teoría mediante este procedimiento, y por lo tanto no puede ser un principio básico de la naturaleza.

La mayoría de los físicos más jóvenes tendían a encogerse de hombros ante las repetidas críticas de Einstein a la mecánica cuántica, con el comentario «Todo saldrá bien». Por el contrario, Bohr, el viejo académico, siempre se tomaba muy en serio los experimentos mentales de Einstein, y en esta ocasión quedó seriamente afectado. Leon Rosenfeld, que asistió a la reunión Solvay, recuerda que Bohr parecía en estado de shock, y durante la cena en el club de la universidad pasó el tiempo tratando de convencer a sus colegas de que Einstein debía haber cometido un error. Bohr acompañó a un sereno Einstein de vuelta a su hotel, en un estado de gran animación y agitación al que siguió una noche de insomnio.

Sin embargo, el día siguiente, cuando era el turno de Bohr, iba a ser un día de triunfo. Para sacar su conclusión, afirmó Bohr, ¡Einstein había pasado por alto su propia teoría de la relatividad! Al medir la energía del fotón, explicó Bohr, usted debe medir de forma precisa la posición vertical del puntero cuando está en reposo frente a la escala. Para estar seguro de que el puntero está

en reposo, usted debe determinar que su movimiento vertical es cero. Pero esta variable está también sujeta al principio de incertidumbre de Heisenberg: cuanto más precisamente trata usted de determinar si el puntero está en reposo, menos seguro puede estar de su posición —es decir, *dónde* está en reposo en la escala vertical. En otras palabras, habrá una incertidumbre inevitable en la *altura* de la caja.

Ahora bien, la esencia del experimento de Einstein está en que usted puede medir la energía del fotón pesándolo, de modo que la gravedad juega aquí un papel crucial. Como hemos visto, la teoría de la relatividad predice que los relojes más altos marchan más rápidos que los relojes más bajos, de modo que si hay una incertidumbre en la altura de un reloj, habrá una incertidumbre correspondiente en su marcha. Esto se traduce en una incertidumbre en el instante en que se abre el obturador para dejar salir al fotón. Por consiguiente, el propio acto de medir de forma precisa la energía del fotón introduce inevitablemente un error incontrolable en la determinación del instante de su salida. Todos los efectos involucrados son minúsculos, por supuesto, pero Bohr hizo números y demostró que la relación de incertidumbre energía-tiempo familiar emerge intacta.

El pobre Einstein se vio obligado a admitir su error, y de hecho esta refutación decisiva por parte de Bohr dejó maltrecha su larga cruzada para descubrir algo falso en los fundamentos de la física cuántica. Al año siguiente, propuso a Heisenberg para el premio Nobel, con las palabras de apoyo: «Estoy convencido de que esta teoría contiene indudablemente parte de la verdad última». ⁴ ¿Pero toda la verdad? Quizá no. Hacia el final de sus días Einstein insistía en que la teoría cuántica, si no inconsistente, era ciertamente incompleta. Dejaba fuera algo crucial de la realidad, creía él. A pesar de la extraordinaria reputación de Einstein como científico, la suya siguió siendo una opinión minoritaria, y hoy, cuarenta años después de la muerte de Einstein, la experimentación refinada ha hecho mucho más difícil de sostener la posición de Einstein. Hoy día, muy pocos físicos dudan realmente de la mecánica cuántica, y puede darse la vuelta al argumento del reloj en la caja. Si la física cuántica ha de ser consistente, entonces ¡mejor sería que la velocidad de los relojes varíe con la altura!

El mejor reloj del universo

Dejemos los experimentos mentales; ¿qué pasa con los experimentos reales? ¿Realmente marchan los relojes más lentos en el sótano? Es curioso que mucha buena física se hace en los sótanos. Solía suponer que esto se debía a que los administradores de la universidad tenían a la disciplina en baja estima y daban a los físicos el peor acomodo para sus laboratorios, pero, de hecho, el sótano es a menudo el mejor lugar para hacer medidas precisas y sensibles. La vibra-

ción es menor: usted puede fijar las cosas directamente al suelo. Además, es más fácil el acceso de vehículos para equipo pesado.

Uno de mis laboratorios de sótano favoritos está situado en Perth, en la Universidad de Australia Occidental. Un mosaico de habitaciones, corredores y salas de tamaños y alturas variables, está atiborrado con una sorprendente mezcla de tubos, cables, bancos de trabajo desordenados, terminales de ordenador y latas vacías de Coca-Cola. En resumen, un típico laboratorio de física. En un tranquilo rincón de una de las salas de investigación hay una hilera de intrigantes cilindros azules de aproximadamente un metro y medio de altura. Algunos de ellos dejan escapar lentamente un siniestro vapor blanco a través de válvulas de acero brillante en su parte superior. Uno o dos están encerrados en un banco de artilugios electrónicos con pantallas de diodos fotoemisores parpadeando en rojo mate. En una pared próxima alguien ha colocado una fotografía de Einstein. Presidiendo este conjunto de equipos complicados está un físico de juvenil apariencia que lleva el nombre de David Blair. Australiano de nacimiento, Blair pasa varios meses al año de trotamundos, visitando otros laboratorios y asistiendo a conferencias.

Ahora, cuarentón, Blair compone una figura imponente. Con una barba oscura y desordenada, ojos penetrantes, una sonrisa fácil y una mata de cabello negro desordenado, podría ser tomado fácilmente por un granjero. De hecho, lo es si se le puede llamar así. Luchador infatigable para poner fin al desastre ecológico, compró varias hectáreas de selva en la punta sur de Australia Occidental para impedir que fuera talada por los leñadores. Allí, él y su mujer construyeron una vivienda utilizando tierra prensada, y sus únicas fuentes de energía son la luz solar y una estufa de leña.

Los Blair también tienen un hogar familiar más convencional en Perth, donde a menudo alojan a los científicos visitantes que han venido a consultar a David. Blair ha dedicado su vida activa a poner a punto técnicas para medidas superprecisas de varios tipos. Su principal objetivo es detectar el choque de agujeros negros y estrellas de neutrones en las profundidades del espacio. Esta abrumadora tarea puede conseguirse, cree él, midiendo el paso de ondas gravitatorias. Predichas por Einstein en 1916, estos rizados aún no han sido detectados en la Tierra. Teóricamente, sin embargo, el rumor de las colisiones estelares debería reverberar en el universo en forma de ondas gravitatorias. Midiendo las casi inconcebiblemente pequeñas vibraciones sonoras producidas cuando una onda semejante atraviesa el laboratorio, Blair espera ser capaz de sintonizar un suceso que de otro modo pasaría completamente desapercibido.

Como un producto colateral de su ambicioso proyecto, Blair y sus colegas han construido el reloj más preciso del universo conocido. Para ser justos, el reloj mantiene ese récord sólo durante cinco minutos cada vez; los relojes atómicos y los pulsares son más estables durante intervalos de tiempo mayores. El reloj de Blair se compone de un cristal de zafiro purísimo de forma parecida a un grueso eje de algunos centímetros de diámetro. Si se golpea el zafiro, so-

nará con el tono más puro, y en ello reside el secreto del reloj: las oscilaciones del cristal juegan el papel de un péndulo, marcando intervalos de tiempo con una precisión sin igual. El truco consiste en acoplar el cristal a un circuito electrónico oscilante, utilizando realimentación para mantener la estabilidad en frecuencia con la más alta fidelidad posible. Las oscilaciones eléctricas alimentan entonces una pantalla digital de modo que el operador puede registrar el tiempo.

Para trabajar con fiabilidad, el aparato entero debe enfriarse hasta cerca del cero absoluto (-273° centígrados) utilizando helio líquido. Para mantenerlos fríos, los relojes deben estar encerrados en termos perfectos: éstos son los cilindros azules que he mencionado. El propio zafiro está situado dentro de una cavidad hecha de niobio, escogido porque se hace superconductor a bajas temperaturas. Esto convierte a las paredes de la cavidad en espejos altamente eficientes. Las microondas que produce el circuito electrónico se introducen en la cavidad, donde crean una configuración característica de ondas electromagnéticas estacionarias a una frecuencia diseñada para que resuenen exactamente con las oscilaciones del cristal. Por supuesto, este diseño básico se mejora con muchos refinamientos: circuitos para estabilizar la temperatura, contenedores extra de metal, blindaje para impedir la fuga de microondas, un dispositivo para reciclar el helio a medida que se evapora, y así sucesivamente. El producto final es un reloj que tiene una precisión mejor que una parte en cien billones durante trescientos segundos. Ahora bien, es tan preciso que, si usted coloca un reloj de zafiro en lo alto del Empire State Building y otro en la base y los compara, debería ser capaz de captar la diferencia. En la práctica, usted tendría que sincronizar dos relojes en la planta baja, subir uno en un ascensor, esperar un rato, devolverlo abajo, y comparar la lectura con el reloj que quedó allí. Debería haber un desajuste ligero pero medible. Sería una prueba bella y directa de la teoría de Einstein. Blair tiene proyectos para hacer precisamente esto, pero existen obstáculos técnicos tales como encontrar la forma de evitar que haya demasiadas perturbaciones para el funcionamiento del reloj debido a todo este movimiento.

Un test más fácil consiste en llevar un reloj a una altura mucho más alta, donde el desajuste temporal sea mayor. En 1976, Robert Vessot y Martin Levine del Smithsonian Astrophysical Observatory utilizaron relojes de máser de hidrógeno para medir el efecto de la gravedad sobre el tiempo. Pusieron un reloj en el morro de un cohete Scout D y lo lanzaron a una altura de 9.600 kilómetros desde Wallops Island en Virginia. Controlando la marcha del reloj unido al cohete por radio, y comparándolo con un dispositivo similar en tierra, pudieron demostrar la distorsión del tiempo variable. El experimento era complicado porque se producen distorsiones debidas tanto al movimiento del cohete como al cambio en la gravedad, y los dos efectos tenían que ser separados en el análisis de los datos. En la trayectoria ascendente, el efecto de movimiento era inicialmente dominante, pero a medida que el cohete subía más alto, la velocidad disminuía y el efecto gravitatorio aumentaba. Vessot siguió el vehículo

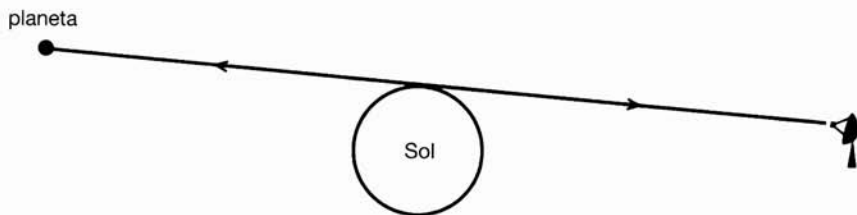
espacial durante dos horas antes de que se sumergiese finalmente en el mar de las Bermudas, destruyendo completamente el delicado aparato. Puesto que sus relojes máser tenían una precisión de una parte en mil billones, mientras que la distorsión del tiempo gravitacional es de cuatro partes en diez mil millones, el efecto pudo ser verificado con una precisión muy alta. Vessot fue capaz de confirmar la predicción de Einstein de 1907, setenta años más tarde, dentro de un margen de setenta partes por millón. No es sólo que el tiempo corra realmente más rápido a mayores altitudes, sino que lo hace precisamente a la velocidad que Einstein dijo siempre que lo haría.

El eco que llegó tarde

Inicialmente Einstein sugirió buscar las señales reveladoras del desplazamiento gravitatorio hacia el rojo en la luz solar. El tiempo en la superficie solar corre aproximadamente dos partes por millón más lento que en la Tierra, debido a la gravedad mucho mayor del Sol. Por consiguiente, las líneas espectrales del Sol deberían estar desplazadas en frecuencia en el mismo factor. En la práctica, el efecto, que debería ser fácilmente detectable, está enmascarado por otros procesos y no es muy convincente por sí sólo. Sin embargo, la distorsión del tiempo en el Sol se manifiesta muy claramente de otra forma, donde puede medirse con precisión. Mientras la Tierra y los planetas giran alrededor del Sol, las posiciones de los planetas vistos desde la Tierra cambian en el cielo. A veces un planeta parece estar muy cerca del Sol (donde normalmente no puede ser visto). Si el planeta está en el lado opuesto del Sol, un rayo de luz que viaja desde el planeta a la Tierra debe pasar entonces cerca de la superficie solar, donde el tiempo corre un poco más lento. Por consiguiente, la luz llegará a la Tierra un poco más tarde de lo que lo habría hecho si el Sol estuviera en alguna otra parte del cielo. La geometría básica se muestra en la figura 3.5.

El propio Einstein fue consciente de este retraso temporal ya en 1911, pero no desarrolló sus consecuencias. Esto tuvo que esperar a la inspiración de un joven físico norteamericano, Irwin Shapiro, quien en 1961 calculó que el retraso temporal debido al Sol sería medible utilizando señales de radar en lugar de luz. Las ondas de radar pueden rebotar en otros planetas y volver a la Tierra en forma de un débil eco —de la misma manera que se utiliza para detectar aviones, pero a una escala mayor. Si un planeta está apropiadamente localizado en el cielo cerca del Sol, el haz del radar pasa dos veces cerca de la superficie solar y, de acuerdo con la teoría de Einstein, su eco debería retrasarse en unos pocos cientos de microsegundos.

En 1959, Shapiro había estado involucrado en el primer eco de radar registrado en el planeta Venus. Sin embargo, hasta 1964 no se hizo factible la posibilidad de medir el retardo de tiempo relativista. Ese año entró en operación la antena de radar Haystack en Westford, Massachusetts, con una potencia de



3.5. Cuando el Sol está casi interpuesto entre un planeta y la Tierra, las señales de radar y sus ecos deben pasar cerca de la superficie solar, donde el tiempo corre ligeramente más lento. Esto retrasa los ecos en algunos cientos de microsegundos. La teoría de Einstein predice también que el haz de radar (o un haz luminoso) será ligeramente curvado.

salida de cuatrocientos kilowatios. Shapiro publicó su idea más tarde ese mismo año en la destacada revista *Physical Review Letters*, e inmediatamente después él y sus colegas hicieron sus planes. A finales de 1966 estaban listos, y la antena de Haystack fue dirigida hacia Venus, y luego hacia Mercurio, durante conjunciones favorables. Cientos de ecos fueron registrados y analizados cuidadosamente por ordenador. Shapiro y sus colegas descubrieron que los ecos estaban realmente retardados y fueron capaces de confirmar la predicción de la teoría de Einstein dentro de un margen del 20 por 100 de error.

Los errores en el experimento del radar proceden de la accidentada topografía de la superficie del planeta que sirve de blanco, de incertidumbres en la posición de los planetas y de distorsiones producidas por la corona solar. La técnica puede mejorarse considerablemente utilizando una nave espacial para devolver la señal. En 1977, la NASA posó dos naves Viking en la superficie de Marte, y esto hizo posible que se obtuvieran datos mucho más precisos. En 1978, Shapiro fue capaz de confirmar el retardo temporal de Einstein con una precisión de una parte entre mil.

Subiendo en el mundo

Curiosamente, la primera prueba precisa del efecto de la gravitación sobre el tiempo fue realmente llevada a cabo en la Tierra, ¡completamente dentro de los confines de la Universidad de Harvard! En 1959, Robert Pound y Glen Rebka decidieron medir el desplazamiento gravitacional hacia el rojo utilizando no luz visible sino rayos gamma. Al igual que la luz y las ondas de radio, los rayos gamma son ondas electromagnéticas, y también pueden servir como reloj. En este caso, la frecuencia es millones de veces mayor, lo que promete una mayor precisión. El proyecto Pound-Rebka es reminiscente del transportador *perpetuum mobile*, pero aquí son los núcleos atómicos los excitados en lugar de serlo los electrones en los átomos, y no hay una cinta transportadora real. El ex-

perimento se limitaba a demostrar que un rayo gamma emitido por un núcleo excitado en la parte inferior de una torre no podía ser reabsorbido por un núcleo idéntico en la cima, debido a que su frecuencia era allí menor. La torre elegida para el experimento tenía una altura de veintidós metros y medio y estaba situada en el Jefferson Physical Laboratory.

La parte difícil era el asegurar que los rayos gamma partieran con una energía, y por lo tanto una frecuencia, muy precisa puesto que el efecto de cambio es verdaderamente minúsculo (simplemente dos partes y media en mil billones). Normalmente, cuando un núcleo emite un fotón de rayos gamma la energía del fotón varía algo, puesto que el núcleo retrocede absorbiendo parte de la energía. Para evitar esta complicación, Pound y Rebka utilizaron un cristal de hierro radiactivo. En un cristal, el átomo de interés está firmemente encajado en la red, de modo que el fotón expulsado es capaz de batirse contra la masa entera del cristal. El retroceso es por lo tanto despreciable, y el rayo gamma sale con una frecuencia definida con una gran precisión.

El experimento fue enseguida capaz de mostrar que, al moverse en la cima de la torre, el fotón era demasiado débil para excitar cualquier núcleo de hierro en un cristal similar situado allí. Para rematar la cuestión, Pound y Rebka hicieron oscilar arriba y abajo el cristal que había en lo alto de la torre. En el sistema de referencia del cristal, el movimiento oscilante crea un desplazamiento Doppler variable en el fotón que sube. Disponiendo cuidadosamente que el desplazamiento Doppler hacia el azul causado por el cristal en bajada cancelase el desplazamiento gravitacional hacia el rojo debido al fotón en subida, los experimentadores podían inducir excitación nuclear. La velocidad de la oscilación que daba este estado de cosas proporcionaba entonces un valor para la distorsión del tiempo gravitatoria. Pound y Rebka fueron así capaces de confirmar la predicción de Einstein con un 1 por 100 de error.

Cuando Einstein predijo por primera vez que la gravedad frenaría el tiempo, todos estos delicados experimentos estaban en el futuro lejano. A él no le molestaba que una predicción tan importante tuviese escasas posibilidades de ser verificada experimentalmente. Como ya he explicado, Einstein creía más en el poder del pensamiento que en el poder de la experimentación para ayudarnos a desvelar el misterio de la naturaleza. En junio de 1907, con la teoría de la relatividad especial ya firmemente establecida, y su mente ocupada en la naturaleza de la gravitación, Einstein empezó a pensar en una carrera académica. Hoy sería sorprendente que alguien con el currículum de Einstein en esa época no tuviera un puesto seguro en la universidad, pero los engranajes académicos giraban lentamente en la Europa de 1907.

Como un primer paso en su ascenso en la escala profesional, Einstein solicitó el derecho a enseñar en la Universidad de Berna. Esto se conocía como un *privatdozent*, y no comportaba salario. Puesto que no tenía unos ingresos independientes, Einstein se vio obligado a permanecer en el empleo de la Oficina de Patentes suiza. El comité que consideró su solicitud decidió rechazarla

debido a un tecnicismo: Einstein había enviado diecisiete artículos publicados, pero había omitido un trabajo inédito, que era algo requerido por las reglas. Hasta enero de 1908 la solicitud no fue finalmente aceptada.

La carrera docente de Einstein no empezó muy bien. Dio un ciclo de lecciones sobre el calor en el verano de 1908 para sólo tres estudiantes, entre los que se incluía su amigo Besso. Sin embargo, hacia 1909 la comunidad científica empezaba a darse cuenta de que tenían un genio entre ellos, y Einstein obtuvo la plaza de profesor asociado de física teórica en la Universidad de Zurich. La junta de facultad fue casi unánime en su decisión de crear la plaza especialmente para Einstein, aun cuando era judío y se habían hecho comentarios antisemitas en relación con el nombramiento. En julio de ese año, Einstein dejó la Oficina de Patentes. Tomó posesión de su nuevo empleo en octubre, habiendo recibido para entonces el primero entre muchos doctorados honoris causa, de la Universidad de Ginebra.

Los años siguientes de la carrera de Einstein fueron ciertamente productivos, pero no se hicieron grandes avances sobre la naturaleza del tiempo, o la gravitación. Siguió refinando sus ideas sobre estos temas, y trabajando hacia una gran síntesis, pero eso tardaría todavía algún tiempo. Mientras, estaba ocupado enseñando y asistiendo a reuniones. Además, en 1910, Mileva dio a luz a su segundo hijo. En 1911, la familia Einstein se trasladó a Praga, donde Einstein obtuvo un puesto de catedrático. Más adelante, ese mismo año, empezó a reformular sus teorías acerca de los efectos de la gravitación sobre la luz y el tiempo, y escribió una serie de artículos. Einstein reconoció claramente que necesitaba generalizar su teoría de la relatividad especial para tener en cuenta campos gravitatorios y movimiento acelerado, pero aún no sabía cómo hacerlo. Confesó a Besso que encontraba la tarea «endiabladamente difícil».

Un avance crucial llegó a mediados de 1912, aproximadamente en la época en que los Einstein regresaron a Zurich, donde Albert asumió el puesto de profesor en su alma mater, el ETH. Einstein llegó a la conclusión de que una teoría de la relatividad general completamente satisfactoria sólo podría obtenerse abandonando las reglas usuales de la geometría. Era erróneo pensar que la gravitación *causa* una distorsión del tiempo, advirtió: ¡la gravitación *era* una distorsión del tiempo! Más generalmente, *tanto* el espacio *como* el tiempo deben estar distorsionados. Un campo gravitatorio no es un campo de fuerzas en absoluto, sino una curvatura en la geometría del espacio-tiempo.

Einstein no sabía casi nada sobre geometría del espacio curvo, pero tenía un amigo matemático, Marcel Grossmann, quien enseñó a Einstein las técnicas necesarias que habían sido desarrolladas por Gauss y Riemann en el siglo XIX. Todos los elementos para una teoría de la relatividad general estaban ahora disponibles, pero permanecían frustrantemente dispersos en la mente de Einstein. Lenta y penosamente a lo largo de uno o dos años, Einstein y Grossmann avanzaban palmo a palmo hacia la síntesis final.

Durante este periodo, se iniciaron movimientos para convencer a Einstein

de que se trasladara a Berlín. Se discutieron varias posibilidades de trabajo, y a finales de 1913 Einstein aceptó ser miembro formal de la Academia Prusiana de Ciencias. Los Einstein dejaron Zurich en marzo de 1914, cuando Europa se precipitaba hacia la guerra. Iba a ser una ruptura decisiva con el pasado. Einstein permanecería en Alemania hasta 1932, pero Mileva anunció pronto que ella y sus dos hijos volvían a la Suiza neutral. El matrimonio nunca había sido particularmente feliz, y siguió el divorcio. Los biógrafos sugieren que en esta época Albert ya estaba teniendo una relación con su prima Elsa, con quien se casó más adelante. En cualquier caso, volvió durante un tiempo a una existencia de soltero y nunca se declaró más feliz.

En contraste con el triste colapso de su matrimonio, la obra científica de Einstein se estaba acercando a un climax sensacional. Aún estaba luchando por encajar el espacio, el tiempo, la materia, el movimiento y la gravitación en un esquema matemático consistente, pero en unos meses tendría éxito y el mundo conocería las asombrosas implicaciones de su teoría de la relatividad general.

Agujeros negros: puertas al fin del tiempo

Por consiguiente, existen en los cielos cuerpos oscuros tan grandes y quizá tan numerosos como las propias estrellas.

PIERRE DE LAPLACE (1796)

Factor de distorsión infinito

Hace cincuenta años que las agujas del reloj marcan las once y media. Siempre es la hora de abrir en el Sailors Arms.

DYLAN THOMAS, *Bajo el bosque lácteo*

Una vez recibí una carta de Tailandia cuyo remitente preguntaba, con toda seriedad, si podría llegarse al paraíso a través de un agujero negro. Desde que este sugerente término fue acuñado por el físico de Princeton John Wheeler en 1967, los agujeros negros han tenido un atractivo casi místico para la gente. Quizá es su capacidad de absorber y aprisionar cualquier cosa que se les acerca lo que alienta su fascinación.

El agujero negro es el test definitivo de las ideas de Einstein. Aunque la existencia de distorsiones del tiempo gravitacionales ha sido ahora completamente confirmada por delicados experimentos en la Tierra y en el sistema solar, los efectos son increíblemente minúsculos y de poca relevancia práctica fuera de la navegación y la astronáutica. Si estas fueran las únicas consecuencias de la teoría de la relatividad general, este aspecto de la obra de Einstein sería hoy ampliamente ignorado. Pero sucede que existen muchos objetos en el universo que distorsionan el tiempo de forma espectacular.

En 1967, una joven inglesa llamada Jocelyn Bell dio accidentalmente con una distorsión del tiempo gravitatoria un millón de veces mayor de la producida por el Sol. Logró esta hazaña utilizando poco más que tela metálica. Como estudiante de doctorado del radioastrónomo Anthony Hewish de la Universi-

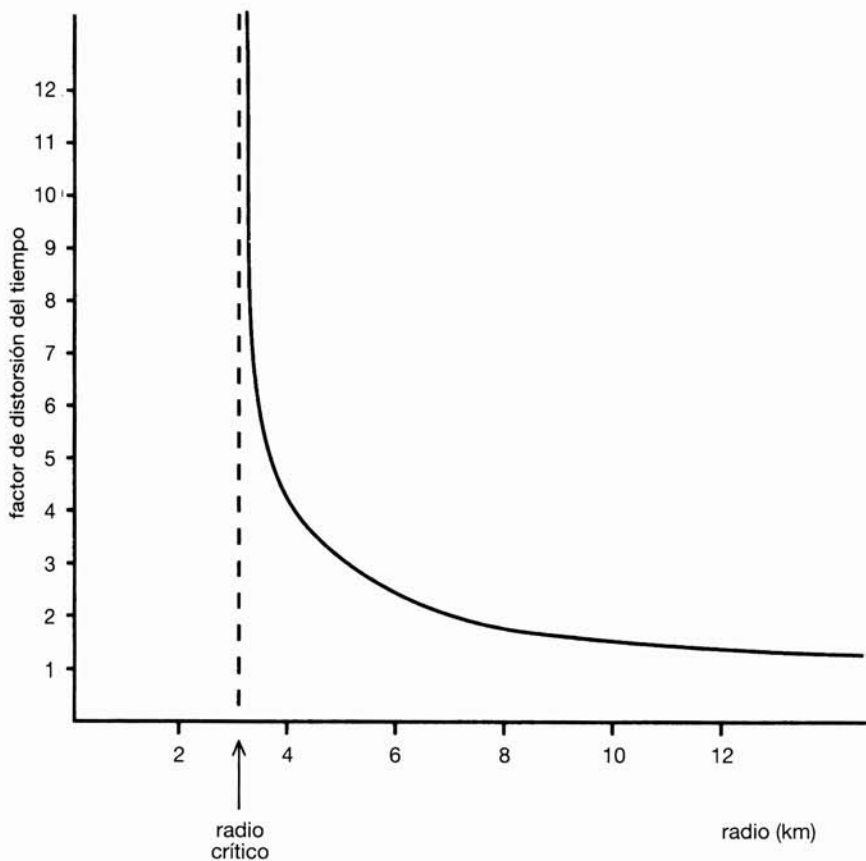
dad de Cambridge, Bell estaba limitada por un escaso presupuesto para su investigación. Ella y Hewish querían estudiar fuentes de radio intermitentes, y en lugar de utilizar un costoso radiotelescopio construyeron el suyo extendiendo con optimismo tela metálica por un verde campo de Cambridgeshire, en la más orgullosa tradición de la ciencia británica. Un día, Bell quedó perpleja ante una traza borrosa en el registrador gráfico del «detector». Advirtió que ocurría todos los días alrededor de la medianoche. Bell avisó a Hewish, y juntos estudiaron el fenómeno con más cuidado. Pronto llegaron a la conclusión de que las trazas borrosas eran producidas por una fuente de radio en el espacio que emitía pulsos regulares. Jocelyn Bell había descubierto los púlsares.

Como mencioné en el capítulo 2, un púlsar está producido por una estrella de neutrones giratoria, un objeto tan compacto que su campo gravitatorio es mil millones de veces más intenso que el de la Tierra. El efecto sobre el tiempo es espectacular. El tiempo en la superficie de una estrella de neutrones típica está frenado aproximadamente un 20 por 100 con respecto al tiempo de la Tierra. Resulta llamativo el que, desde el punto de vista de un observador en la superficie de una estrella de neutrones (quizá no una idea tan tonta como sueña, véase el capítulo 13), la Tierra tiene sólo aproximadamente 3.500 millones de años (terrestres), y el universo es 2.000 o 3.000 millones de años más joven que lo que nosotros estimamos.

El que el tiempo esté distorsionado de forma tan espectacular en una estrella de neutrones se debe a que la estrella, aunque posee la masa del Sol o más, está comprimida en un radio de sólo algunos kilómetros. Cuanto más fuerte es la gravedad en la superficie de un objeto, más se frena, o se estira, el tiempo. En la figura 4.1 he representado gráficamente el factor de distorsión del tiempo frente al radio para un objeto con la masa del Sol. El rasgo distintivo es la forma en que la curva se dispara hacia la parte superior del gráfico cuando el radio se acerca a un valor de aproximadamente 3 kilómetros. Este es un radio crítico. No se trata simplemente de que la distorsión del tiempo se haga muy grande cuando el cuerpo se comprime hasta este radio; en realidad se hace infinita.

Es sorprendente que la idea esencial de esta distorsión del tiempo infinita ya era conocida para Einstein casi en la época en que había formulado su teoría de la relatividad general. Pese a todo, no fue descubrimiento suyo. Como he explicado en el capítulo anterior, Einstein luchó durante años intentando generalizar su teoría de la relatividad para incluir los efectos de la gravitación sobre el espacio y el tiempo. Se ensayaron muchas descripciones matemáticas sólo para descartarlas como inapropiadas. En el otoño de 1915, mientras Europa estaba envuelta en guerra, el pacifista Einstein estaba envuelto en matemáticas avanzadas. Tras una intensa etapa de estudio, él dio al fin con el sistema de ecuaciones que iba a asegurar su inmortalidad. Hoy se conocen como las ecuaciones de campo gravitatorio de Einstein.

El 2 de noviembre, con tono triunfante, Einstein se dirigió a la Academia Prusiana de Ciencias en Berlín y presentó las ecuaciones que hoy llevan su nom-



4.1. Desarrollo de la distorsión del tiempo creciente. El gráfico muestra el factor de distorsión en la superficie de un objeto esférico de una masa solar en función del radio. La distorsión del tiempo crece hacia el infinito conforme se aproxima al radio crítico de aproximadamente 3 km.

bre. El 16 de enero de 1916 volvió para leer un artículo de un tal Karl Schwarzschild, director del Observatorio de Potsdam. El propio Schwarzschild no podía hacerlo en persona. Estaba realmente ocupado luchando en el frente ruso, y pronto iba a morir de una enfermedad contraída allí. El artículo era señero en cuanto que contenía la primera solución exacta a las nuevas ecuaciones de campo de Einstein. Schwarzschild había seguido el trabajo de Einstein sobre gravitación y pudo leer la forma final de las ecuaciones de campo en el número del 25 de noviembre de los *Proceedings of the Prussian Academy of Sciences*. Inmediatamente obtuvo una solución que describía un ejemplo sencillo pero

útil desde el punto de vista de la física: el campo gravitatorio en la región vacía exterior a una bola uniforme de materia.

La solución de Schwarzschild era precisamente lo que se necesitaba para calcular el campo gravitatorio en la vecindad de la Tierra y el Sol, para los que daba una explicación completamente convincente. De forma significativa, se reducía correctamente a la ley de la gravedad de Newton a grandes distancias. Sin embargo, había algo singular en la solución que desconcertó a Einstein durante toda su vida. De hecho, tendrían que transcurrir otros cuarenta años antes de que se apreciara por completo la importancia de esta singularidad. Para comprender el problema, es necesario antes que nada tener alguna idea de para qué están diseñadas las ecuaciones de Einstein. En primer lugar, dichas ecuaciones relacionan la intensidad del campo gravitatorio en cada punto del espacio con la materia y la energía que crean la gravedad. Una solución de las ecuaciones parte de una supuesta distribución particular de materia y energía (en el caso de Schwarzschild, una bola de materia) y da el correspondiente campo gravitatorio producida por ella. Pero hay más. Puesto que un campo gravitatorio está asociado con una distorsión del tiempo, una solución particular nos dice también cuánto se dilata el tiempo en cada punto del espacio. En el caso de la primera y famosa solución de Schwarzschild, la distorsión del tiempo viene dada por una fórmula muy sencilla que depende sólo de la distancia al centro de masas. Es esta fórmula la que he utilizado al dibujar la figura 4.1.

La desbocada dilatación del tiempo, localizada cerca de los 3 kilómetros en el caso del Sol, era lo que perturbó a Einstein. La existencia de un radio crítico, ahora denominado el «radio de Schwarzschild», en donde el tiempo está *infinitamente* dilatado, le parecía profundamente carente de sentido físico. En términos del comportamiento de la luz, cualquier fotón que intentase salir del radio crítico estaría infinitamente desplazado hacia el rojo, su frecuencia y su energía se reducirían a cero, haciéndolo efectivamente impotente. Un observador situado lejos de la estrella no sería capaz de ver nada en absoluto. Por caliente que estuviese la estrella en su superficie, vista a distancia parecería negra.

Einstein era perfectamente consciente en 1916 de que la solución de Schwarzschild contenía esta característica intrigante, pero en esa época difícilmente parecía un serio problema. El radio del Sol es de 700.000 kilómetros —casi medio millón de veces mayor que su radio de Schwarzschild— y la solución de Schwarzschild no se aplica a la región *interior* del Sol. Si la curva es relevante sólo para la región externa, debe truncarse en el extremo derecho de la figura 4.1, donde la dilatación del tiempo ha aumentado sólo a proporciones muy modestas (aproximadamente de dos partes por millón). Para distorsionar el tiempo seriamente, el Sol tendría que estar comprimido en un tamaño mucho más pequeño que el de la Tierra. Semejante perspectiva hubiera parecido completamente fantástica para la Academia Prusiana de aquellos días.

Un misterio oscuro

¡Pienso que debería haber una ley de la Naturaleza que impida que una estrella se comporte de esta forma absurda!

ARTHUR EDDINGTON

El conservadurismo de Einstein y sus compañeros no había sido compartido por algunos científicos anteriores más temerarios. Ciertamente, la Tierra y el Sol son ambos mucho mayores que sus radios de Schwarzschild, pero ¿qué pasa con otros cuerpos astronómicos? ¿Podrían ser suficientemente masivos o suficientemente compactos para crear una distorsión del tiempo infinita? Por increíble que parezca, ya en 1784 un oscuro clérigo inglés llamado John Michell sugirió precisamente eso en esencia. En un artículo enviado en el mes de noviembre de dicho año a la Royal Society de Londres, escribió:

Si realmente existieran en la naturaleza cuerpos cuya densidad no fuera menor que la del Sol, y cuyos diámetros fueran más de 500 veces mayores que el diámetro del Sol ... ¡su luz no podría llegarnos!¹

Michell no sabía nada, por supuesto, de dilataciones del tiempo o de la teoría de la relatividad general. Él basaba su cálculo en la teoría de la óptica de Newton, que suponía que la luz consta de partículas, o corpúsculos, y en la teoría de la gravitación. Sin embargo, sucede que la teoría de Newton tiene algunas conclusiones comunes con la de Einstein en relación con el efecto de la gravedad sobre la luz. «Supongamos que las partículas de luz son atraídas de la misma manera que todos los demás cuerpos con los que estamos familiarizados», especulaba Michell. A continuación razonaba que, para que una partícula escape para siempre de un cuerpo gravitante, tenía que ser proyectada desde la superficie de dicho cuerpo con una cierta velocidad mínima: la denominada velocidad de escape. En el caso de la Tierra, por ejemplo, la velocidad de escape es de 11,2 kilómetros por segundo. Si un cuerpo es propulsado desde la Tierra a una velocidad menor que ésta, volverá a caer al cabo de un cierto tiempo.

La velocidad de escape de un cuerpo esférico depende tanto de su radio como de su masa. Si la Tierra se comprimiera a un cuarto de su tamaño pero conservando todo su material constituyente, la velocidad de escape se duplicaría; usted tendría que proyectar un objeto al menos con una velocidad de 22,4 kilómetros por segundo para que volase al espacio para siempre. Análogamente, si la Tierra tuviera más masa, la velocidad de escape sería mayor. Michell notó que si la masa de un cuerpo de radio dado fuera suficientemente grande, la velocidad de escape superaría a la velocidad de la luz. En estas circunstancias, la luz no sería capaz de salir y el cuerpo parecería negro. La fórmula que Michell desarrolló para este estado de cosas es, curiosamente, idéntica a la fórmula que relaciona la masa y el radio de Schwarzschild.

La conclusión de Michell fue recuperada algunos años más tarde por el famoso matemático francés Pierre de Laplace. A pesar de la reputación de Laplace como científico y erudito, nadie tomó demasiado en serio la especulación sobre «estrellas negras» durante un buen periodo de tiempo. Por una curiosa coincidencia, en el mismo mes en que Karl Schwarzschild estaba calculando su famosa solución, el astrónomo Walter Adams, que trabajaba en el Observatorio del Monte Wilson en California, anunció que había obtenido un espectrograma de la luz de una enigmática estrella llamada Sirio B. Sirio es la estrella más brillante en el cielo, pero tiene una compañera muy débil cuya existencia fue deducida en 1834 por el modo en que Sirio parece estar perturbada por el campo gravitatorio de un objeto invisible cercano. Adams quedó sorprendido al descubrir que el espectro de Sirio B apenas difería del de Sirio. Esto sólo podía significar una cosa: Sirio B era tan caliente como Sirio. ¿Por qué, entonces, se veía tan tenue? La respuesta tenía que estar en que es muy pequeña —aproximadamente del tamaño de la Tierra. Una estrella caliente tan pequeña como la Tierra implicaba una densidad muchos miles de veces mayor que la de la materia ordinaria.

La idea de una estrella comprimida hasta un tamaño tan minúsculo fue acogida con consternación cuando Adams la sugirió. Sin embargo, con los años empezó a hacerse evidente para los astrónomos que las estrellas extraordinariamente comprimidas eran no sólo posibles sino inevitables. Pero ¿estrellas negras? En 1921, sir Oliver Lodge, un distinguido científico británico bien conocido por su investigación en el campo de la física, dio una conferencia a los estudiantes de la prestigiosa Universidad de Birmingham de la que había sido rector. Dijo a los estudiantes que, «si la luz está sujeta a la gravedad, si la luz tiene peso en algún sentido real ... un cuerpo suficientemente masivo y concentrado sería capaz de retener la luz e impedirle que escape».² Luego continuó haciendo algunos números: «Si una masa como la del Sol pudiera concentrarse en una esfera de aproximadamente 3 kilómetros de radio, semejante esfera tendría las propiedades antes mencionadas; pero una concentración hasta ese grado está más allá del alcance de la consideración racional». Sin embargo, sir Oliver indicó que una galaxia masiva confinada en un diámetro de unos pocos cientos de años-luz atraparía la luz incluso si su densidad media fuera sólo de una mil billonésima de la del agua. «Esta no parece una concentración de materia completamente imposible.»

En la época en que sir Oliver pronunciaba su alocución, la fama de Einstein se había extendido por todo el mundo. En 1919, el altamente respetado astrónomo británico sir Arthur Eddington se las había arreglado para confirmar una predicción clave de la teoría de la relatividad general —la curvatura muy ligera de un rayo de luz estelar por la gravedad del Sol— y el público apreció la ironía de que un científico británico hubiera confirmado una teoría «alemana» no mucho después de la finalización de las hostilidades de la guerra. La palabra «relatividad» entró pronto en el vocabulario popular. Einstein fue

festejado y cubierto de honores. Las invitaciones llegaban en masa a Berlín desde muchos países. Todo el mundo quería conocerle, desde los millonarios y las personalidades del espectáculo a los políticos. Académicamente, su carrera se estaba acercando a su cenit. En 1921, fue nombrado Fellow de la Royal Society de Londres —un raro honor para un extranjero. Al año siguiente, mientras estaba de camino a Japón, Einstein recibió la noticia de que se le había concedido el premio Nobel. Dio el dinero a Mileva, como parte del arreglo de su divorcio. Sin embargo, el premio no fue otorgado por la relatividad, sino por el trabajo de Einstein de 1905 sobre el efecto fotoeléctrico.

Einstein visitó también los Estados Unidos, donde se entrevistó con el presidente Harding en la Casa Blanca. Fue asediado por periodistas y aclamado como un héroe. El nombre Einstein se hizo sinónimo de genio. En realidad, el viaje a Norteamérica no lo hizo por razones científicas, sino que fundamentalmente era un ejercicio político. Aunque Einstein nunca había tomado muy en serio su condición de judío y siguió siendo una especie de ateo reverente durante toda su vida, tuvo la amistad de Chaim Weizmann quien le convenció para interesarse en el sionismo. La visita a Norteamérica tenía por objetivo recaudar fondos para la Universidad Hebrea de Jerusalén.

A pesar de la fama que Einstein había ganado por entonces para sí mismo y su teoría de la relatividad, seguía habiendo muchos adversarios. Esto se debía en parte a que las predicciones de la teoría eran extraordinariamente difíciles de verificar. Pero también había mucha animadversión hacia Einstein a causa de su raza, sus ideas políticas (una mezcla de sionismo y pacifismo) y su nacionalidad. Otros estaban celosos de sus logros. Muchos simplemente no entendían su trabajo. En una ocasión comentó, cínicamente: «Si mi teoría de la relatividad se prueba acertada, Alemania me aclamará como un alemán y Francia declarará que soy un ciudadano del mundo. Si mi teoría se probase falsa, Francia dirá que soy alemán, y Alemania declarará que soy judío».³

Aunque la teoría de la relatividad general fue ganando aceptación poco a poco durante los años veinte, tenía reputación de ser impenetrablemente difícil. Se decía que sólo Einstein, Eddington y uno o dos más la entendían completamente. Esto era indudablemente una exageración, pero la escasez de aplicaciones medibles trabajaba en contra de la teoría que se convirtió en algo parecido a un remanso científico para especialistas. De hecho, sólo en los años treinta empezaron a tomarse más en serio sus consecuencias. En este periodo los astrónomos habían llegado a aceptar la existencia de estrellas extraordinariamente densas como Sirio B, motejándolas de «enanas blancas», pero había un desacuerdo violento sobre lo que le podría suceder a una estrella que fuera más masiva o más compacta que una enana blanca. ¿Provocaría su intenso campo gravitatorio que se contrajera aún más? ¿Podría acercarse a su radio de Schwarzschild y, si fuera así, qué le impediría colapsar completamente, bajo su propio peso, hasta un punto de densidad infinita?

En 1930, un brillante estudiante indio de diecinueve años, Subrahmanyan

Chandrasekhar, se encontró jugando con las ecuaciones que describen una estrella enana blanca durante un largo viaje por mar a Inglaterra, donde pretendía trabajar en la Universidad de Cambridge con el gran Eddington. Para su asombro, Chandrasekhar encontró que sus cálculos predecían un resultado sobresaliente. Si la enana blanca tuviera una masa de más de 1,4 soles, entonces, según el cálculo, no podría permanecer estable, y seguiría colapsando sin ningún límite aparente. Al llegar a Inglaterra, Chandrasekhar mostró su cálculo a los astrónomos británicos, quienes lo desecharon como una curiosidad sin importancia. Una estrella enana blanca típica, a pesar de ser muy compacta, es aún miles de veces mayor que su radio de Schwarzschild. Para muchos, la idea de que un cuerpo con la masa del Sol pudiera comprimirse hasta una bola de sólo unos pocos kilómetros de diámetro, simplemente no parecía creíble. De hecho, era absolutamente inadmisibile.

Werner Israel, un experto internacional en agujeros negros, ha realizado un estudio histórico sobre las actitudes de los científicos hacia el colapso gravitatorio, con su correspondiente distorsión del tiempo infinita. Él encuentra prejuicios psicológicos y filosóficos profundamente asentados en acción, creando resistencia a la idea incluso hoy:

A medida que se devanaba lentamente la madeja de la observación y la teoría, la reacción científica —primero desprecio, luego consternación, dando lugar sólo poco a poco a un comienzo de aceptación— establece una pauta para los descubrimientos por llegar.⁴

La actitud del propio Einstein seguía siendo intransigente. Todavía en 1939, escribió que la distorsión del tiempo infinita «no aparece en la naturaleza por la razón de que la materia no puede concentrarse arbitrariamente».⁵ No está claro en qué medida estaban Einstein y sus colegas influidos inconscientemente en su escepticismo por una creencia atávica en la solidez absoluta y la indestructibilidad de los átomos —una creencia que se remonta a tiempos de los griegos. Ya desde la época de la solución de Schwarzschild se sabía que un cuerpo con un radio menor que $1 \frac{1}{8}$ veces su radio de Schwarzschild posiblemente no puede resistirse al colapso, incluso si está hecho de material supuestamente incompresible, puesto que la presión central se haría infinita. Pese a todo, la misma idea de una implosión total sin restricciones era demasiado perturbadora para que la admitiesen la mayoría de los científicos. El siempre voluble y categórico Eddington era inequívoco en su expresión de disgusto. Describió el radio de Schwarzschild como «un círculo mágico a cuyo interior no puede llevarnos ninguna medida».⁶

Penetrando en el círculo mágico

¡Mira cómo lo devoran las fauces de la oscuridad!

WILLIAM SHAKESPEARE

El obstinado rechazo de Einstein de la posibilidad de que una estrella pudiera retirarse al interior de su radio de Schwarzschild se iba a probar en un enunciado fatídico. Sólo dos meses más tarde, Robert Oppenheimer, quien más tarde sería el jefe de Einstein en el Instituto para Estudio Avanzado en Princeton, envió un artículo a *Physical Review* coescrito con su discípulo Hartland Snyder y titulado «Sobre la atracción gravitatoria continuada». El contenido abordaba abiertamente el problema de lo que sucedería a una estrella masiva una vez que su combustible nuclear se agotase finalmente. La estrella sería entonces incapaz de mantener una presión interna suficientemente alta para soportar su enorme peso. El artículo se abría con la frase profética: «Cuando se agoten todas las fuentes termonucleares de energía, una estrella suficientemente pesada colapsará».⁷ Los cálculos que seguían, basados en las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein, llevaban a los autores a concluir que el colapso «continuaría indefinidamente», y la estrella se hundiría a través del radio crítico, creando una distorsión del tiempo infinita en el proceso.

El trabajo fundamental de Oppenheimer sobre estrellas que colapsan fue generalmente pasado por alto en un momento en que el mundo se precipitaba a otra guerra. El tema de la energía nuclear llegó a ser algo más que sólo una rama de la astrofísica teórica, y el propio Oppenheimer fue reclutado para dirigir el proyecto de la bomba atómica. Seguía habiendo un sentimiento muy extendido de que el radio de Schwarzschild implicaba una imposibilidad física. Después de todo, era matemáticamente singular; esto es, describe una magnitud física que se hace infinita. Hay una regla no escrita en la ciencia según la cual cuando se predice que algo potencialmente observable se hace infinito, esto es una señal segura de que la teoría está fallando de algún modo. El propio Einstein interpretaba que este infinito significa que las partículas que constituyen la estrella se verían obligadas a moverse más rápidas que la luz si la estrella se comprimiera tanto, y descartó esto basándose en su teoría de la relatividad especial. Antes de que se estableciese la distorsión del tiempo infinita, algo tendría que ceder.

Tras la guerra vino la guerra fría, y la comunidad científica se dividió en Este y Oeste. Según Israel:

En los círculos occidentales hacia los años cincuenta el trabajo de Oppenheimer y Snyder era un esqueleto olvidado en el armario, y la noción de colapso gravitatorio, si alguien hubiera pensado siquiera en plantearla, habría sido rechazada como la especulación más absurda; pero en la Unión Soviética era un resultado ortodoxo en los libros de texto.⁸

Israel cita la edición soviética de 1951 de la *Física estadística* de Landau y Lifshitz, un libro de texto clásico para estudiantes, para una descripción del destino de una estrella que ha sobrepasado la masa máxima a la que puede resistir su propio peso:

Resulta claro desde el principio que un cuerpo semejante debe tender a contraerse indefinidamente ... Desde el punto de vista de un observador «local» la sustancia «colapsa» con una velocidad que se acerca a la de la luz, y alcanza el centro en un tiempo propio finito.⁹

En Occidente, fue básicamente John Wheeler en la Universidad de Princeton, un físico independiente e imaginativo que había trabajado con Niels Bohr y cerca de Einstein, quien situó el tema del colapso gravitatorio en el mapa científico. Pero seguía existiendo el terco enigma del radio de Schwarzschild y el «círculo mágico» que durante mucho tiempo había sugerido una zona prohibida absoluta, protegida por una barrera física de naturaleza desconocida.

Con la ventaja de la visión retrospectiva, podemos ver ahora que el rompecabezas de la distorsión del tiempo infinita había sido tácitamente resuelto muchas veces en el curso de la historia, antes de que finalmente apareciese en una comunidad científica desconcertada. Ya en 1916, un físico holandés llamado Johannes Droste, que descubrió independientemente la solución de Schwarzschild, reconoció que el radio crítico tenía que ser tomado en serio. Eddington resolvió involuntariamente el problema en los años veinte, y Oppenheimer y Snyder dieron una exposición bastante clara en su famoso artículo de 1939. Pero el mensaje de todas estas contribuciones fue ignorado entre el prejuicio general, defendido por el propio Einstein, según el cual la implosión sin trabas a través del radio de Schwarzschild era físicamente imposible.

Un problema singular

Sigue hasta llegar al final; luego para.

LEWIS CARROLL

Los matemáticos se enfrentan a menudo al infinito en sus ecuaciones, y raramente pestañean. Llamamos *singularidades* a los puntos infinitos en sus soluciones. Es significativo que se necesitasen matemáticos más que físicos para resolver el enigma del radio crítico. Esto no sucedió hasta aproximadamente 1960, cuando la situación fue finalmente clarificada por Martin Kruskal y David Finkelstein en los Estados Unidos, y George Szekeres en Australia, de forma independiente. Los tres reconocieron que la naturaleza singular del radio de Schwarzschild era un artificio puramente matemático: nada *físicamente* singular ocurre allí. Ninguno de los científicos citados trabajaba activamente en la corriente prin-

cial de la teoría de la relatividad. Finkelstein tenía su propia agenda respecto a nuevas relaciones entre matemáticas y física y estaba trabajando básicamente aislado. Kruskal era un joven investigador en Princeton que realizó un cálculo muy simple sobre la geometría del espacio-tiempo de Schwarzschild, básicamente por diversión, tras un seminario sobre el tema. Mostró el resultado a Wheeler, algo tímidamente, pensando que era demasiado trivial para ser publicado. Quedó para Wheeler el publicarlo. Szekeres empezó su carrera como ingeniero químico en Hungría, de donde huyó de los nazis a finales de los años treinta para establecerse en Shanghai. Respetado por los japoneses durante la ocupación, terminó la guerra trabajando como empleado para los norteamericanos, y empezó a hacer matemáticas, su pasión real, durante su tiempo libre. Al cabo de algunos años, obtuvo un puesto de profesor de matemáticas en la Universidad de Adelaida. Se interesó en la relatividad general básicamente debido a que era una aplicación conveniente para ciertas técnicas matemáticas que estaba desarrollando, y tampoco consideró su solución del problema de la singularidad de Schwarzschild como especialmente significativa. Por esta razón, la publicó en una oscura revista húngara, donde pasó casi desapercibida durante algunos años.

Lo que todos estos matemáticos encontraron es que la singularidad matemática en el radio crítico de Schwarzschild es análoga a lo que sucede a los meridianos y los paralelos en los polos norte y sur en un mapamundi. La proyección estándar de Mercator muestra la Antártida y Groenlandia fuertemente distorsionadas; las distancias se estiran más y más a medida que nos acercamos a los polos. En realidad, por supuesto, la geometría en los polos no es diferente de cualquier otro lugar de la superficie de la Tierra. La ilusión de la distorsión aparece simplemente debido al sistema de coordenadas de latitud y longitud empleado. Las coordenadas de Schwarzschild sufren el mismo problema que las de Mercator. Mediante el simple expediente de transformarlas a un nuevo sistema de coordenadas, uno puede hacer desaparecer la singularidad en el radio de Schwarzschild y se hace posible penetrar (matemáticamente) en el «círculo mágico» de Eddington.

No lo entiendo, se queja nuestro paciente escéptico. ¿Hay ciertamente una distorsión del tiempo infinita en el radio de Schwarzschild? Esto me suena a la vez bastante físico y bastante singular.

El punto crucial es que ninguna magnitud física *local* es singular en el radio de Schwarzschild. Una distorsión del tiempo implica una *comparación no local* de velocidades del reloj: para descubrirla usted tiene que comparar relojes en el radio de Schwarzschild con relojes lejanos. Si usted estuviera realmente en el radio de Schwarzschild, usted no podría decir: «¡Oh! El tiempo está aquí infinitamente distorsionado». De hecho, usted no notaría nada extraño sobre el tiempo —o cualquier aspecto de la física local— en su vecindad inmediata.

Sólo comparando su tiempo con el de algún otro en alguna otra parte podría usted descubrir la dilatación del tiempo.

Para clarificar este punto, resucitemos a nuestras intrépidas gemelas Ann y Betty. Supongamos que Ann se queda en la Tierra y Betty va en la nave espacial, provista de un reloj, hasta la vecindad de una estrella que ha implosionado. Imaginemos que la estrella se ha contraído dentro de su radio de Schwarzschild y comprimido en una bola minúscula; enseguida veremos cuál podría ser su destino final. La figura 4.2 nos indica la velocidad del reloj de Betty con respecto al reloj de Ann en el caso en que la masa colapsada es equivalente a la del Sol. A partir del gráfico usted puede saber, por ejemplo, que, cuando Betty está a seis kilómetros del centro de la masa, su reloj marcha a la mitad de la velocidad del de Ann. Ellas pueden comprobar esto enviándose señales de radio de una a otra. Para evitar la mezcla de la distorsión del tiempo debida al movimiento con la debida a la gravitación, podemos imaginar que Betty utiliza los potentes cohetes de su nave para permanecer inmóvil a una distancia fija de la estrella colapsada. (Un ser humano real no podría soportar las enormes fuerzas g que esto implicaría.) Betty encuentra entonces que envejece con menor rapidez que Ann, y Ann está de acuerdo en esto. No hay simetría sobre sus circunstancias en este escenario; decididamente es *Betty* la que está sometida a un gran campo gravitatorio con su estiramiento del tiempo asociado. Ann y Betty pueden comparar relojes, fechas y experiencias para convencerse de que para Betty el tiempo realmente está «marchando lentamente» comparado con el de Ann. Si Betty habla, Ann oirá sus palabras estiradas en una voz lánguida de tono grave. Verá que el reloj de Betty corre a la mitad de velocidad. Todos los demás procesos físicos también aparecerán en movimiento lento, incluidos la velocidad de pensamiento y de envejecimiento de Betty.

La propia Betty no advierte nada anormal sobre su habla, su mente, su envejecimiento o el paso del tiempo. Todo parece normal en su inmediata vecindad. Sin embargo, cuando utiliza su telescopio para observar la Tierra, los sucesos allí parecen estar transcurriendo a un ritmo doble del normal. Si Betty observa el reloj de Ann, le parecerá que está marchando a dos horas por cada una de las suyas. Las palabras de Ann estarán en un tono agudo y comprimidas, como las viejas canciones Chipmunk. A Betty le parecerá que los procesos físicos en torno a Ann están teniendo lugar en un tiempo doble, como si estuviera viendo un vídeo registrado a doble velocidad. Todo esto es real, no una extraña ilusión óptica. Betty puede regresar a casa y comparar directamente edades y relojes con Ann. Los resultados confirmarán que, para Betty, el tiempo se ha frenado realmente en su viaje a una región de gravedad intensa. Habrá envejecido la mitad que Ann.

Quizá sea así. Después de todo, es simplemente una amplificación del efecto que Vessot y otros han medido en la Tierra. Pero ¿qué pasa si Betty se aventura cerca del propio radio de Schwarzschild? ¿Es cierto que sucede-

rá algo extraño? Se supone que la distorsión del tiempo es infinita allí. ¿Cómo puede algo físico ser verdaderamente infinito?

A medida que Betty se aproxima al radio de Schwarzschild, la distorsión del tiempo se hace cada vez mayor. Verá que el reloj de Ann corre cada vez más rápido por delante del suyo. Ann verá el reloj de Betty cada vez más retrasado. Betty se sentirá incluso más incómoda, puesto que para mantenerse más próxima al objeto masivo debe soportar fuerzas g verdaderamente enormes. Otra cosa más empieza a hacerse importante. El mismo frenado del tiempo que afecta al reloj de Betty, afecta también a las ondas luminosas emitidas por los átomos de la nave espacial, y a las ondas de radio que Betty utiliza para hablar a Ann. Estas ondas sufren un gran desplazamiento hacia el rojo de origen gravitatorio, lo que significa que la nave empieza a parecerle muy roja a Ann. De hecho, parece decididamente oscura, incluso si Betty se toma la molestia de iluminarla para ayudar a Ann; la dura escalada a través del feroz campo gravitatorio roba tanta energía a la luz que sólo sobrevive una débil imagen. Además, Ann tiene que sintonizar su radio a una frecuencia muy baja para captar el habla desvaída de Betty.

Cuanto más se acerca Betty al radio de Schwarzschild, más graves se hacen estos efectos. Pero, aunque en principio Ann vería desde lejos que los sucesos en la nave espacial transcurren muy lentamente, en la práctica tiene que esforzarse mucho para ver algo, debido al continuo aumento del desplazamiento hacia el rojo. La intensidad de la luz disminuye correspondientemente hacia cero. Betty y su nave desaparecen de la vista por completo. Como John Michell predijo hace dos siglos, cuando Ann mira en la dirección de la estrella colapsada, todo lo que ve es oscuridad: un agujero negro.

¿Por qué exactamente se denomina un agujero negro?

La capacidad de Betty para mantenerse cerca del radio de Schwarzschild depende de que los motores de su cohete tengan potencia suficiente para resistir la colosal atracción de la gravedad allí. Las fuerzas g que le asaltan a ella y a su nave espacial crecen sin límite cuanto más cerca se mantiene la nave del radio crítico; en efecto, el peso de Betty se hace allí infinito. En este sentido Einstein tenía razón: habría algo no físico —localmente— en este estado *estático* de las cosas. En verdad sería físicamente imposible que la nave se mantenga exactamente en el radio de Schwarzschild, donde el tiempo llega a detenerse con respecto al sistema de referencia de Ann. En realidad, no hay ninguna fuerza en el universo suficientemente fuerte para soportar la atracción de la gravedad allí. Mucho antes de que se alcance el radio límite, los motores del cohete perderían inevitablemente su batalla contra la gravedad y la nave se hundiría a través del radio de Schwarzschild. Una vez que la nave está dentro, ya no hay *ninguna* posibilidad de que sea capaz de mantenerse a una distancia fija del centro

de gravedad. Lo mismo se aplica a cualquier materia que haya allí, incluyendo la materia de la estrella implosionada: todo caerá al centro. La región dentro del radio de Schwarzschild no puede contener materia estática. Por lo tanto, esta región del espacio-tiempo es básicamente *vacío* y aparece *negra* (vista desde el exterior): de aquí el término «*agujero negro*».

Pero ¿no es cierto que un motor suficientemente potente podría resistir cualquier fuerza gravitatoria, por intensa que fuera?

No en este caso. La gravedad es tan enorme dentro del agujero negro que incluso retiene a la luz que se dirige hacia afuera —precisamente como Michell conjeturó— tirando de ella inevitablemente hacia el centro de gravedad como si fuese enfocada por una lente gigantesca. Sorprendentemente esta imagen ya fue captada en 1920 por un cierto A. Anderson del University College Galway, quien escribió en el *Philosophical Magazine* de ese año:

... si la masa del Sol estuviera concentrada en una esfera de 1,47 kilómetros de radio, el índice de refracción se haría infinitamente grande, y tendríamos una lente convergente muy potente, tan potente de hecho, que la luz emitida por el propio Sol no tendría velocidad en su superficie. Así pues ... está envuelto en oscuridad.¹⁰

En efecto, el hecho de que la nave (o el material de la estrella implosionada) resistiera esta sorprendente fuerza gravitatoria y se mantuviera en un radio fijo implicaría que estaba viajando más rápidamente que la luz. Esto está prohibido por la teoría de la relatividad.

Un momento. La nave no estaría moviéndose en absoluto con respecto al centro de gravedad —o con respecto a Ann. ¿Por qué dice usted que estaría viajando más rápidamente que la luz?

El concepto de velocidad es esencialmente local. Por ejemplo, usted puede medir la velocidad relativa de A cuando *se cruza* con B, pero si A y B están espacialmente separados en un campo gravitatorio, su velocidad relativa se hace una cosa bastante vaga. Si usted trata de medirla enviando señales luminosas, cronometrando el movimiento entre puntos en el espacio y así sucesivamente, a usted se le plantea el problema de qué reloj utilizar. Y cuando A está en la Tierra y B está dentro de un agujero negro, usted no puede dar ningún sentido a la velocidad de B con respecto a A. Por supuesto, los oficiales de policía miden la velocidad a distancia con sus detectores de radar, pero esto se debe a que pueden despreciar los efectos de la gravitación. Si trataran de medir la velocidad *vertical*, tendrían problemas. En este caso el desplazamiento Doppler se mezclaría con el desplazamiento hacia el rojo de origen gravitatorio, y el de-

terminar una velocidad bien definida se convertiría en un problema. (No muy grande en el caso de la Tierra, por supuesto, porque el efecto del desplazamiento gravitatorio hacia el rojo es pequeño, pero usted puede captar lo que quiero decir.) Por el contrario, usted *puede* dar sentido a la velocidad relativa entre una nave espacial y un pulso luminoso que pasa cerca de ella, incluso cuando ambos están en el interior de un agujero negro. Esta velocidad debe ser siempre la velocidad de la luz. Así, si la luz que se dirige *hacia afuera* está siendo arrastrada pese a todo *hacia adentro*, la nave también debe estarlo, o si no estaría viajando *localmente* a más velocidad que la luz, lo que va contra la teoría de la relatividad especial.

Si la gravedad de la materia colapsada tira de la luz, ¿no significa eso que la luz que sale hacia afuera justamente en el exterior del radio de Schwarzschild viaja hacia Ann a una velocidad reducida?

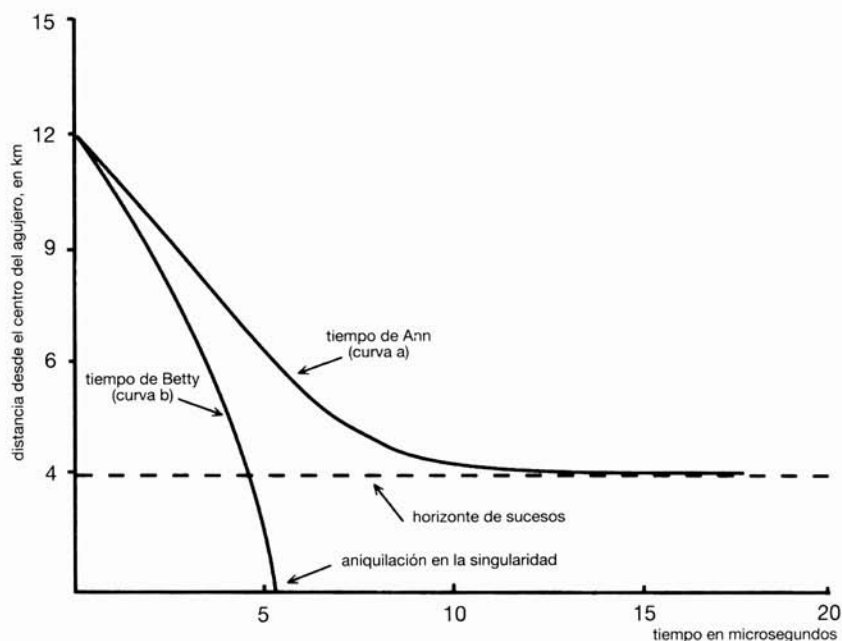
Sí y no. Ciertamente la luz de la región próxima al agujero negro puede necesitar un tiempo muy grande para salir tal como la mide Ann. Recordemos, sin embargo, que ella no puede medir directamente la velocidad de la luz a distancia. Puede deducir que los fotones están avanzando fatigosamente hacia ella con una lentitud penosa para los niveles de *su* reloj, pero cuando tiene en cuenta que el tiempo cerca del radio de Schwarzschild está frenado, descubre que el fotón, en la región en que se encuentra, se está moviendo a la misma velocidad de siempre —300.000 kilómetros por segundo. Y, por supuesto, un observador próximo al agujero negro sería capaz de medir la velocidad de la luz localmente y obtener la misma respuesta.

¿No significa esto que Ann nunca verá a Betty alcanzar realmente el radio de Schwarzschild y caer dentro del agujero negro?

Esto es correcto. La luz que lleva la posición de la nave de Betty necesita cada vez más tiempo para llegar a Ann a medida que la nave se acerca más y más al radio de Schwarzschild. Usted puede ver en la figura 4.2, que compara el reloj de Betty con el reloj de Ann mientras la nave de Betty cae libremente dentro del agujero negro, que Ann tendría que esperar un intervalo de tiempo infinito para ver a Betty deslizarse a través del radio fatídico.

¿De modo que, mientras Betty percibe que ella se está hundiendo en el agujero, Ann verá que la nave de Betty simplemente se mantiene allí —congelada en el espacio y el tiempo, por así decir?

No realmente. Debido a la intensificación del desplazamiento hacia el rojo y a la disminución de la intensidad de la luz que procede de la nave mientras se acerca al radio de Schwarzschild, Ann no puede seguir el comienzo de esta



4.2. Caída en un agujero negro. Aquí se representan gráficamente las lecturas del reloj hechas por Betty mientras cae a un agujero negro de una masa solar (curva *b*), y por Ann mientras observa desde lejos (curva *a*). Ambas curvas están dibujadas en función de la distancia de Betty al centro del agujero. Betty parte del reposo a una distancia de 12 km. Llega al radio de Schwarzschild (horizonte de sucesos), representado por la línea de trazos, al cabo de 4,7 microsegundos, y encuentra la singularidad central al cabo de 5,3 microsegundos. Por el contrario, Ann ve que la caída de Betty se frena drásticamente y se queda «congelada» para siempre justo fuera del radio de Schwarzschild. La región debajo de la línea de trazos está por consiguiente «más allá del fin del tiempo» por lo que respecta a Ann.

«congelación». Lo que realmente ve es que la nave se hace rápidamente más roja y más oscura, hasta que simplemente se funde en la negra oscuridad del agujero negro. En efecto, es tragada por la oscuridad.

Pero ¿no significa eso que, en realidad, Betty *nunca* llega a alcanzar el radio de Schwarzschild? El agujero negro es una ficción, ¿no es cierto?

¡No tal! Palabras seductoras como «nunca» y «siempre» no tienen un significado absoluto. Usted tiene que especificar de qué «nunca» y qué «siempre» está hablando. Ciertamente, en el sistema de referencia de Ann, Betty nunca llega al radio de Schwarzschild, pero en el sistema de referencia de Betty cierta-

mente lo hace. De hecho, típicamente Betty necesitaría apenas unos microsegundos, del tiempo de la nave espacial, para caer en un agujero negro de masa solar desde una distancia de algunas veces el radio de Schwarzschild. Lo hace directamente, ¡y también en un tiempo bastante rápido!

Pero los agujeros negros siguen siendo una ficción por lo que respecta a nosotros en el universo exterior. La estrella que implosiona para crear supuestamente el agujero negro también necesitaría una cantidad infinita de nuestro tiempo para retirarse al interior de su radio de Schwarzschild. La región negra, supuestamente vacía, estaría *realmente* ocupada por los residuos de la estrella, ¿no es cierto?

En cierto sentido eso es correcto. De hecho, a los rusos les disgustaba originalmente el término «agujero negro» por esa misma razón. En privado, ellos lo llamaban en broma «campos de trabajos forzosos», puesto que nada puede salir de ellos. Oficialmente utilizaban el término «estrellas congeladas», reconociendo que vistos a distancia el tiempo y el movimiento están congelados en el radio de Schwarzschild. Ahora bien, usted podría ser capaz de *deducir* que, técnicamente, lo que tiene el aspecto de un agujero negro es «en realidad» una estrella congelada en las últimas etapas de colapso. Pero todas las propiedades de esta estrella en colapso se hacen muy rápidamente (típicamente en milisegundos o menos a partir del inicio del colapso) indistinguibles de las de un agujero negro ya formado y *efectivamente* vacío. Y si usted se aventurase más cerca para buscar cualquier diferencia residual, no encontraría ninguna, porque acabaría siguiendo al material de la estrella en implosión a través del radio de Schwarzschild al vacío real. De modo que, ve usted, la distinción entre un agujero negro y una estrella congelada es prácticamente vacua.

Más allá del fin del tiempo

Las ecuaciones de Einstein dicen «éste es el fin» y la física dice «no hay fin».

JOHN WHEELER

Habla nuestro escéptico:

Imaginemos por un momento que Betty está dentro del agujero negro. Si Betty tarda una eternidad (eternidad de Ann) en cruzar el radio de Schwarzschild y entrar en el agujero en primer lugar, ¿cuándo (el cuándo de Ann) puede Betty entrar en el agujero? ¿No está Betty de algún modo más allá del fin del tiempo (el tiempo de Ann) allí?

Esto es lo que pasa. Cuando usted tiene una distorsión del tiempo infinita, un microsegundo de una de ellas es una eternidad para la otra. El interior del agujero negro es una región de espacio y tiempo que nunca puede ser observada desde fuera. El radio de Schwarzschild separa los sucesos dentro del agujero negro, que son para siempre inobservables para Ann por mucho que ella espere, de los sucesos fuera del agujero negro, que Ann puede presenciar si es suficientemente paciente. Por esta razón, el radio de Schwarzschild se denomina a veces el «horizonte de sucesos». Así, en cierto sentido, el interior del agujero negro está más allá del fin del tiempo por lo que respecta al universo exterior —aunque no más allá del fin del tiempo de Betty, por supuesto.

Esto significa que, en los pocos microsegundos que necesita Betty para cruzar rápidamente el horizonte, en el exterior habrá transcurrido toda una eternidad. Las rápidas imágenes se acelerarán a velocidad *infinita*. Betty sabrá, una vez dentro del agujero, que el universo exterior ha «acabado», ¡incluso si ha durado *eternamente!*

Igual que sucedía en el anterior experimento de las gemelas, es mejor no pensar en términos de «qué está haciendo Ann ahora» y así sucesivamente. Si Betty mira al universo exterior, no verá realmente una duración infinita que transcurre en ese microsegundo fugaz de su tiempo porque la luz necesita tiempo para alcanzar el agujero negro desde sucesos cósmicos distantes; y antes de que la mayoría de ellos llegue allí, ella se habrá hundido en el centro del agujero, y en el olvido. La única manera de que Betty pudiera presenciar la futura historia infinita del universo sería mantenerse en el radio de Schwarzschild y esperar a que llegue toda la luz incidente. Pero hemos visto que es imposible mantenerse en el radio de Schwarzschild.

Si Betty está más allá del fin del tiempo, ¿qué le sucede a ella? ¿Es posible que dé la vuelta y vuelva a salir del agujero negro?

No hace falta decir que usted no puede volver de más allá del fin del tiempo sin ir hacia atrás en el tiempo. Esto no se da probablemente (aunque véase el capítulo 10). Parece que Betty tiene dos destinos posibles. La apuesta más segura es que caiga directamente hasta el centro del agujero negro y sea aniquilada. Si se sigue tenazmente la solución de Schwarzschild hasta el centro geométrico exacto, ésta predice que el campo gravitatorio se hace allí infinito: el centro del agujero negro es una singularidad espacio-temporal. A diferencia del radio crítico, esta singularidad central no puede hacerse desaparecer mediante un cambio de coordenadas. Tiene un carácter local y físico —más que simplemente matemático. Si la singularidad existe, entonces será un límite para el propio tiempo, un límite del infinito donde el tiempo deja de existir y no hay más allá. En tal caso el hundimiento de Betty en el agujero negro será un viaje de una

sola dirección hacia ninguna parte —y ningún tiempo. Cuando se aplasta en la singularidad, no puede continuar en el espacio-tiempo, de modo que debe dejar de existir como entidad física. Por supuesto, para el momento que llega allí ya habría sido aplastada en el olvido.

Una idea más descabellada es que el interior del agujero negro debe ser más complicado de un modo que capacita a Betty para evitar la singularidad y sobrevivir. Alternativamente, alguna propiedad física aún por descubrir puede impedir que se forme la singularidad. En cualquier caso Betty continuará obviamente en el espacio-tiempo, pero no puede entrar en ninguna región en «nuestro» espacio, porque «su» tiempo ya ha pasado. La única posibilidad para Betty es emerger en algún *otro* espacio —otro universo, si usted quiere— que está unido al nuestro a través del interior del agujero negro. Este otro espacio sería un universo localizado más allá del fin del tiempo por lo que a nosotros nos concierne. Este lapso poético es quizá lo más que la ciencia se ha acercado a identificar un candidato para la Tierra más Allá del Tiempo, y quizá explica por qué el remitente de Tailandia planteaba la pregunta sobre el paraíso. Por desgracia, no hay ninguna razón para creer: *a*) que una región semejante de espacio-tiempo exista realmente, *b*) que usted pudiera realmente «atravesar un agujero negro» para llegar allí incluso si existiera, y *c*) resultaría ser muy diferente de nuestro universo si usted lo hiciera. Existe también el problema de que, si usted pudiera hacer alguna vez este truco del «túnel», podría hacerlo de nuevo —en el otro universo. Pero como usted no puede caer desde el otro universo de nuevo al nuestro (sin viajar hacia atrás en el tiempo), sería necesario que descubriera un tercer universo, luego un cuarto, y así sucesivamente. Usted tiene que suponer la existencia potencial de una infinidad de universos casi inconexos, una idea que entusiasma a muchas personas pero que a mí me parece un absurdo total.

«Absurdo». Eso precisamente resume toda la cuestión. Creo que Eddington tenía razón. ¿No es cierto que la idea global de los agujeros negros y las distorsiones del tiempo infinitas es simplemente demasiado extravagante para tomarla en serio? ¿Dónde está la evidencia de que estas cosas existen realmente?

¿Están realmente ahí fuera?

La luz se desplaza hacia el rojo. Se hace más oscura a cada milisegundo, y en menos de un segundo es demasiado oscuro para verse...

JOHN WHEELER

A comienzos de los años setenta yo era un joven profesor en el King's College de Londres. El experto local en agujeros negros era John G. Taylor, un afable

físico matemático y actor profesional con intereses en investigación que iban desde el cerebro a la teoría de la supergravedad. A partir del éxito del libro divulgativo de John *Black Holes: The End of the Universe?* (Agujeros negros: ¿el fin del universo?), unido a su buen ojo y su fácil estilo periodístico, fue como el público británico llegó a saber por primera vez de los agujeros negros —«los objetos más pavorosos conocidos para el hombre», como a Taylor le gustaba señalar. Por desgracia, la publicación del libro coincidió con un brote de interés en temas paranormales en los medios de comunicación británicos. Las extrañas propiedades de los agujeros negros tenían cierto atractivo místico, y algunas personas parecían considerar estos objetos a la misma luz que la magia negra. El aura de misterio fue reforzada por ciertos científicos conservadores que denunciaron la idea global de los agujeros negros como tontas especulaciones.

Pese a esto, ya se estaba acumulando evidencia de que los agujeros negros debían tomarse más en serio que la magia. Siempre estuvo claro que no hay ningún impedimento *teórico* para que se forme un agujero negro: dada una masa suficientemente grande, el radio de Schwarzschild es tan grande que un agujero negro se formará antes de que la materia se comprima hasta una densidad inusual. La cuestión relevante es, ¿se darán las condiciones necesarias en el universo real?

Los astrónomos centraron su atención principalmente en estrellas muertas, sacando su inspiración del trabajo de Oppenheimer sobre el colapso estelar. El escenario básico es bastante claro: cuando una estrella agote su combustible, se comprimirá bajo su propio peso. Si la estrella es suficientemente pesada, ninguna fuerza puede impedirle que implodione hasta un agujero negro —de acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein. Algunos cálculos aproximativos sugieren que las estrellas con masas superiores a tres masas solares tendrán inevitablemente este destino, suponiendo que no encuentren alguna manera de expulsar antes parte de su materia. Se conocen muchas estrellas de tres o más masas solares, de modo que la existencia de agujeros negros como residuos estelares parece, en apariencia, completamente razonable.

Hacia 1960, los astrónomos tenían una buena idea de cómo podría producirse el catastrófico colapso estelar. Una estrella pesada consume su combustible a un ritmo prodigioso, y cuando el suministro se agota, no se contrae simplemente. En su lugar, el núcleo de la estrella implodiona repentinamente. El choque resultante libera un pulso de energía suficientemente enorme para arrojar al espacio las capas exteriores de la estrella. Sigue una explosión titánica. Tales estallidos han sido observados por los astrónomos a lo largo de la historia; se denominan «supernovas». Esto parecía un buen lugar para empezar la caza de objetos gravitacionalmente colapsados.

Sin embargo, en esa época los científicos tenían aún un bloqueo mental sobre la naturaleza del radio de Schwarzschild. Kip Thorne, entonces un discípulo de John Wheeler, explica:

Quizá nada influyó más para impedir a los físicos, entre 1939 y 1958, la comprensión de la implosión de una estrella que el nombre que utilizaron para la circunferencia crítica: «singularidad de Schwarzschild». La palabra «singularidad» evocaba la imagen de una región donde la gravedad se hace infinitamente intensa, provocando que las leyes de la física tal como las conocemos se vengán abajo —una imagen que ahora comprendemos que es correcta para el objeto en el centro de un agujero negro, pero no para la circunferencia crítica.¹¹

Había una idea ampliamente extendida de que todo llega de algún modo a pararse en el radio crítico, que la distorsión del tiempo infinita que congela los sucesos en una suspensión desde el punto de vista de un observador distante también señalaba el fin del camino para la estrella en colapso en cierto sentido vago e inespecificado. Se necesitaron los cálculos de Finkelstein, Kruskal y Szekeres para convencer finalmente a los científicos de que, en el sistema de referencia de la materia en caída, nada se detiene realmente en la singularidad de Schwarzschild. Como Thorne subraya, «una persona que atravesase la singularidad de Schwarzschild (la circunferencia crítica) en una estrella en implosión no sentiría gravedad infinita y no vería que las leyes físicas dejan de ser válidas».

A pesar de su gusto famoso por lo descabellado y extraño, el propio Wheeler era inicialmente escéptico sobre el colapso gravitacional total. Fue alrededor de 1960, con el conocimiento personal de la «eliminación» por parte de Kruskal de la singularidad de Schwarzschild, e impresionado por las últimas ideas sobre supernovas, cuando cambió de opinión. Thorne recuerda que un día, a principios de los años sesenta, Wheeler entró precipitadamente en una clase de relatividad, sonriendo con placer. Acababa de volver de una visita al Livermore Laboratory en California, donde Stirling Colegate, el mayor experto del mundo en supernovas, había mostrado las últimas simulaciones por ordenador. Colegate había basado sus cálculos en el cálculo clásico de preguerra de Oppenheimer y Snyder, pero había incluido muchas más características realistas. «Con voz emocionada, dibujó en la pizarra un diagrama tras otro», escribe Thorne. Wheeler explicó cómo el núcleo en implosión de una estrella de masa media produciría una estrella de neutrones, pero que para un núcleo más pesado que aproximadamente dos masas solares parecía que nada podría detener el colapso:

Vista desde fuera, la implosión se frenaba y se quedaba congelada en la circunferencia crítica, pero vista por alguien en la superficie de la estrella, la implosión no se congelaba en absoluto. La superficie de la estrella se contraía a través de la circunferencia crítica y seguía hacia adentro, sin vacilación.¹²

Esta comprensión de que el radio crítico no impediría el colapso total era el punto crucial. Pero el concepto de agujero negro, y mucho menos el nombre, todavía no estaba completamente desarrollado. Los años sesenta se mostraron como una década de gran fermento en astronomía, relacionado en buena parte

con el confuso tema del colapso gravitacional. Primero llegó el descubrimiento de los cuásares, u objetos cuasiestelares (QSO). Estos pinchazos de luz, localizados en los confines remotos del cosmos, fueron confundidos inicialmente con estrellas. En 1963 se reconoció que eran tan masivos como las galaxias y enormemente brillantes, pero también increíblemente compactos. Su descubrimiento obligó a los astrónomos a enfrentarse a la posibilidad de que tales objetos densos y masivos corrieran el riesgo de sufrir un colapso gravitatorio total.

Al año siguiente, un cohete a gran altura equipado con un primitivo detector de rayos X registró una intensa fuente de rayos X en la constelación de Cygnus, el cisne. Fue bautizada como Cygnus X-1, y diez años más tarde se convirtió en el primer objeto candidato para un posible agujero negro formado por colapso estelar.

La primera mitad de los años sesenta también marcó importantes avances teóricos. El matemático británico Roger Penrose desarrolló técnicas geométricas nuevas y más elegantes para estudiar el espacio-tiempo de Schwarzschild, horizontes de sucesos, estrellas en colapso, singularidades y aspectos relacionados con la teoría de la relatividad general. Estos nuevos métodos se iban a mostrar una bendición para los físicos que trataban de entender las asombrosas propiedades de los agujeros negros.

Finalmente llegó el descubrimiento de los púlsares (estrellas de neutrones) en 1967. Para este momento el colapso gravitacional, las implosiones de supernovas, las estrellas congeladas y las distorsiones del tiempo infinitas estaban firmemente establecidas en la agenda de los astrofísicos. A finales de 1967 se celebró en Nueva York una conferencia sobre púlsares, y Wheeler mencionó la posibilidad de que el colapso continuo produjera un «agujero negro» en el espacio. El nombre había entrado finalmente en la lengua inglesa. Pero eso fue sólo el principio. Más importante era el encontrar evidencia irrefutable de que los agujeros negros existen realmente en el universo.

A comienzos de los años setenta, mientras la investigación en agujeros negros se convertía en una industria en todo el mundo, los astrónomos empezaron a buscarlos en serio. El uso de telescopios de rayos X a bordo de satélites mejoró enormemente la comprensión de objetos como Cygnus X-1 y sugirió que, si un agujero negro se forma en un sistema de estrellas binarias, revelaría su presencia tragándose lentamente a su compañera, y brillando fuertemente en la región de rayos X como resultado. En el momento de escribir esto, muchos astrónomos consideran muy probable que Cygnus X-1 sea un agujero negro atrapado en una estrecha órbita de 5,6 días en torno a una estrella supergigante azul.

Los cuásares y las galaxias perturbadas se han revelado otro lugar prometedor para buscar agujeros negros, pero en este caso los objetos de interés serían considerablemente más masivos que una estrella colapsada. En realidad, los astrónomos sospechan que los núcleos de algunas galaxias pueden albergar agujeros negros con masas equivalentes a millones o incluso miles de millones de soles. Hay buena evidencia de que en el centro de nuestra propia Vía Láctea

se oculta un agujero negro de al menos un millón de masas solares. Aunque un candidato realmente convincente sigue siendo frustrantemente evasivo, la evidencia acumulada de agujeros negros se ha hecho abrumadora en los últimos años. Ocho décadas después de que Schwarzschild encontrara su famosa solución, la existencia de objetos reales con distorsiones del tiempo infinitas parece confirmada al fin.

Einstein no vivió tanto como para ver las fructíferas aplicaciones de su teoría de la relatividad general a las estrellas colapsadas. En cualquier caso, toda la evidencia sugiere que él tenía muchas reservas respecto al tema. De hecho, Einstein perdió básicamente el interés en los efectos «locales» de la gravitación en torno a 1920, tras la exitosa prueba de Eddington de la curvatura de la luz por el Sol. Los locos años veinte vieron el nacimiento de la mecánica cuántica, un campo desafiante que recabó toda la atención de Einstein. Mientras, el nuevo telescopio de cien pulgadas en el Monte Wilson en California estuvo disponible para estudiar sistemáticamente los objetos más distantes en el universo. Durante años, los astrónomos involucrados advirtieron algo cada vez más extraño sobre la luz procedente de estos objetos. A finales de dicha década estaba claro que la teoría de la relatividad general de Einstein había encontrado una nueva e incluso más espectacular aplicación: el origen y la evolución del propio universo.

El comienzo del tiempo: ¿cuándo fue exactamente?

El comienzo del tiempo coincidió con el comienzo de la noche que precedió al día 23 de octubre del año 4004 a.C.

JAMES USSHER (1611)

El comienzo del movimiento [fue] un domingo, al amanecer, y desde entonces hasta el presente han transcurrido 1.974.346.290 años persas.

PETRO D'ABANO

El gran reloj del cielo

No lejos del lugar de recreo de los millonarios en St. Tropez, en el sur opulento de Francia, hay un laberíntico castillo de piedra en medio de magníficas tierras arboladas. Después de una pequeña caminata desde la mansión principal a través de los árboles se llega a un conjunto de modernas cabañas que sirven de acomodo a los huéspedes. El propio castillo se abre a una enorme barandilla de piedra que domina jardines bien cuidados, completados con tres piscinas y una glorieta circular rodeada de un muro de piedra para esparcimiento al aire libre. El interior del castillo está arreglado con gusto al estilo tradicional. Plantas en macetas, pinturas de valor incalculable y un enorme piano de cola antiguo adornan el gran salón. Añadida al edificio principal, una pequeña sala de conferencias ofrece lo último en medios audiovisuales. La casa se denomina Les Treilles, y es propiedad de la familia de Anne Schlumberger, una dama elegante con un exquisito gusto por la cultura y el buen vino.

En el verano de 1988, madame Schlumberger fue anfitriona de una reunión inusual en Les Treilles. Los invitados eran científicos, y todos estaban interesados, de una u otra forma, en el tema del tiempo. Algunos de ellos eran rebeldes

que habían decidido rechazar el saber convencional sobre el tiempo, el universo y (casi) todo. La mayoría eran físicos o astrónomos: Geoffrey Burbidge de California, Vittorio Canuto de Nueva York, David Finkelstein de Atlanta. La reunión fue convocada por el químico belga Ilya Prigogine, cuyas insólitas ideas sobre el tiempo han excitado al público general al mismo tiempo que han exasperado a muchos colegas científicos.

Este fue también el verano en que Stephen Hawking fue lanzado a la fama internacional, con la publicación de su libro *Historia del tiempo*. El libro ya había trepado sin esfuerzo a la lista de bestsellers en todo el mundo, y estaba destinado a permanecer allí, al menos en Gran Bretaña, durante cinco años —un récord de todos los tiempos para cualquier libro. La mayoría de los participantes en la reunión de Les Treilles estaban convencidos de que el tema del tiempo tendría una historia mucho más larga de lo que Hawking había supuesto.

La breve historia del tiempo de Hawking es realmente una breve historia del universo, basada en la hipótesis de que el tiempo comenzó cuando comenzó el universo. Pero el título del libro de Hawking implica también algo más: que el universo tiene una historia con significado. Una explicación coherente de «lo que sucedió al universo» supone que podemos considerar el cosmos como un todo y hablar de cómo cambia globalmente, paso por paso, desde lo que fue a lo que es. ¿Podemos hacer eso?

Einstein mezcló las cosas completamente con su descubrimiento de que no hay tiempo universal, no hay un reloj maestro que controle los latidos del cosmos. El tiempo es relativo: depende del movimiento, depende de la gravedad. Pero el universo está lleno de ambos. La Tierra gira alrededor del Sol a 30 kilómetros por segundo, el Sol describe una órbita en la galaxia a 220 kilómetros por segundo, la galaxia se mueve en el grupo local de galaxias a una velocidad similar. Más importante aún es que los propios cúmulos galácticos se separan, atrapados en la expansión general del universo, de modo que las galaxias más distantes parecen estar alejándose de nosotros a casi la velocidad de la luz. Además de este movimiento ubicuo, todos los cuerpos astronómicos poseen campos gravitatorios, algunos de ellos inmensos y que provocan espectaculares distorsiones del tiempo. Dada la existencia de una infinidad de tiempos, ¿cómo podemos hablar del universo como un todo marchando a través de la historia al compás de un solo tambor cósmico?

En un universo tan confuso, lleno de movimiento caótico y concentraciones de materia al azar, no habría realmente ninguna historia cósmica bien definida, pues no habría tiempo universal. Afortunada y misteriosamente, el universo no es caótico en una gran escala. Tanto la distribución de galaxias como su pauta de movimiento, una vez promediadas, son sorprendentemente uniformes. Un buen indicador de esta uniformidad lo proporciona la radiación térmica de fondo que llena el espacio. Descubierta por Arno Penzias y Robert Wilson en 1965, esta radiación de microondas llena el universo, y se cree en general que es el resplandor crepuscular del big bang caliente en el que se originó. Al

año siguiente de la reunión de Les Treilles, la NASA lanzó un satélite llamado COBE (de Cosmic Background Explorer o Explorador del Fondo Cósmico) para estudiar este baño térmico. Los científicos del COBE encontraron que la radiación de fondo es uniforme en el cielo dentro de un margen de precisión de una parte en cien mil. Puesto que el universo es casi completamente transparente a las ondas electromagnéticas, la radiación cósmica de fondo se habría propagado sin ser perturbada a través del espacio durante miles de millones de años. Es por lo tanto una reliquia viviente, un residuo del infierno primigenio que acompañó al nacimiento del cosmos. Cuando detectamos esta radiación, estamos observando el universo tal como era aproximadamente 300.000 años después del big bang. Cualesquiera irregularidades importantes en el universo habrían dejado sus huellas en esta radiación por efecto del desplazamiento gravitatorio hacia el rojo. Puesto que los datos del COBE no revelaban variaciones importantes en la intensidad de la radiación térmica procedente de diferentes regiones del universo, podemos inferir que el universo es, y casi siempre ha sido, extraordinariamente homogéneo a gran escala.

Los resultados del COBE también nos dicen algo muy importante sobre el tiempo de Einstein. De hecho, no es totalmente cierto que la radiación térmica cósmica de fondo sea completamente uniforme en el cielo. Es ligerísimamente más caliente (es decir, más intensa) en la dirección de la constelación de Leo que en direcciones perpendiculares a ella. Hay una razón muy buena para esto. Imaginémonos viajando hacia la constelación de Leo en una nave espacial a gran velocidad. La radiación procedente de esta dirección del cielo estará desplazada hacia el azul por el efecto Doppler, mientras que la radiación procedente del lado opuesto del cielo estará desplazada hacia el rojo. Estos desplazamientos hacen la radiación de fondo más intensa en la dirección de Leo. En la práctica, la Tierra es nuestra nave espacial, zumbando a través del espacio o, más precisamente, zumbando a través del baño envolvente de calor primigenio a aproximadamente 350 kilómetros por segundo. Esto hace que la radiación parezca desigual a lo largo del cielo. Pero si usted resta esta denominada anisotropía dipolar, entonces la distribución resultante es uniforme dentro de un margen de aproximadamente una parte en cien mil.

Aunque desde la Tierra se ve un baño térmico cósmico ligeramente sesgado, debe existir un movimiento, un sistema de referencia, que haría que el baño aparezca *exactamente* igual en todas direcciones. De hecho, parecería perfectamente uniforme desde una nave espacial imaginaria que viajara a 350 kilómetros por segundo en una dirección que se alejase de Leo (hacia Piscis, como resulta ser el caso). Este estado de cosas especial, esta visión del cosmos cuidadosamente seleccionada, distingue al sistema de referencia de la nave espacial imaginaria como poseedor de un estatus único. El tiempo que marca el reloj de la nave espacial también tendrá un estatus único y especial. Podemos utilizar este reloj especial para definir un tiempo cósmico, un tiempo en el que medir el cambio histórico en el universo. Afortunadamente, la Tierra se está mo-

viendo a sólo 350 kilómetros por segundo con respecto a este hipotético reloj especial. Esto es aproximadamente el 0,1 por 100 de la velocidad de la luz, y el factor de dilatación temporal es sólo de aproximadamente una parte en un millón. Así pues, con una aproximación excelente, el tiempo histórico de la Tierra coincide con el tiempo cósmico, de modo que podemos volver a contar la historia del universo al mismo tiempo que la historia de la Tierra, a pesar de la relatividad del tiempo.

Relojes hipotéticos similares podrían estar localizados en cualquier parte del universo, en un sistema de referencia en cada caso en el que la radiación térmica cósmica de fondo parece uniforme. Nótese que yo digo «hipotéticos»; podemos imaginar los relojes ahí fuera, y legiones de seres sensibles inspeccionándolos obedientemente. Este conjunto de observadores imaginarios estará de acuerdo en una escala de tiempo común y un conjunto común de fechas para los sucesos principales en el universo, incluso si se están moviendo unos respecto a otros como resultado de la expansión general del universo. Ellos podrían cruzar fechas y sucesos enviándose datos por radio de unos a otros: todo sería consistente. De modo que el tiempo cósmico medido por este conjunto especial de observadores constituye una especie de tiempo universal, parecido al que Newton supuso originalmente que era verdadero para *todos* los observadores. Es la existencia de esta escala de tiempo general la que capacita a los cosmólogos para poner fechas a los sucesos de la historia cósmica; en realidad, a hablar significativamente sobre «el universo» como un solo sistema.

El big bang y lo que sucedió antes de él

¿A quién le preocupa lo que pasó medio segundo después del big bang, pero qué pasó medio segundo antes?

FAY WELDON

El año 1924 encontró a Einstein trabajando duramente en Berlín, felizmente casado con su prima Elsa. Sus intereses científicos se habían desplazado del tiempo y la gravitación a la física cuántica, que iba a ocupar el escenario central de la ciencia durante la década siguiente. Pero ese mismo año, en Norteamérica estaba teniendo lugar calladamente un descubrimiento que resultaría tener las implicaciones más profundas para el tiempo de Einstein. El Monte Wilson en California es la sede del telescopio Hooker de cien pulgadas. Terminado en 1918, era el mayor telescopio del momento, y el único capaz de dirimir una larga disputa respecto a la estructura del universo. La discusión se centraba en la naturaleza de aquellas peculiares manchas borrosas de luz conocidas como nebulosas.

Desde la Antigüedad los astrónomos se han sentido intrigados por las manchas lechosas en el cielo. Además del gran arco de la propia Vía Láctea, existen

tres manchas menores de luz visibles a simple vista: la nebulosa de Andrómeda y las dos nubes de Magallanes, llamadas Grande y Pequeña. Ya los telescopios de tamaño moderado revelan montones de estas nebulosas y ellas atrajeron la atención de muchos astrónomos a lo largo de los años. Nadie sabía qué eran, pero en el siglo XIX un astrónomo francés de nombre Charles Messier recopiló pacientemente un catálogo de ellas con el objetivo básico de distinguir las nebulosas de los cometas, siendo considerados estos últimos mucho más interesantes. Las nebulosas más brillantes llevan la inicial «M» en honor de Messier. Andrómeda es conocida como «M31».

Todavía en los años veinte, los astrónomos no estaban de acuerdo en qué eran las nebulosas. Había dos teorías. Una mantenía que la Vía Láctea, constituida por miles de millones de estrellas incluyendo a nuestro Sol, era el principal sistema cósmico. Según esta opinión, todas las nebulosas eran o bien nubes de gas o bien cúmulos de estrellas distantes que estaban dentro de la Vía Láctea o en sus inmediaciones. La teoría opuesta era que al menos algunas de las nebulosas son enormes sistemas estelares por sí mismas, similares a la Vía Láctea, y situadas a inmensas distancias.

A principios de 1924, un joven astrónomo norteamericano llamado Edwin Hubble decidió dirimir la cuestión. Alto y bastante decidido, Hubble había comenzado su vida como abogado, pero luego se orientó hacia la astronomía donde iba a revelar una ley cósmica que sería aclamada como el descubrimiento del siglo. Utilizando el gran telescopio del Monte Wilson, Hubble examinó pacientemente las nebulosas M31 y M33. La potencia del instrumento de cien pulgadas era suficiente para aislar las imágenes de estrellas individuales en dichas nebulosas. Hubble fue pronto capaz de encontrar en ellas un tipo característico de estrellas variables que son familiares para los astrónomos en nuestra propia galaxia. Estas estrellas le proporcionaron una forma de estimar la distancia a M31, la nebulosa de Andrómeda. La respuesta resultó ser de aproximadamente un millón de años-luz. Ya no había ninguna duda: Andrómeda estaba mucho más allá del límite de la Vía Láctea, y era evidentemente una galaxia completamente independiente, comparable en tamaño y forma a la nuestra. Hubble continuó identificando otras estrellas familiares en Andrómeda. Los astrónomos aceptaron rápidamente que el universo era enormemente mayor de lo que habían pensado previamente, con otras galaxias dispersas a través del espacio hasta donde las observaciones telescópicas permitían afirmar.

Durante muchos años previos al trabajo de Hubble, los astrónomos habían tratado de iluminar la controversia fotografiando el espectro luminoso de las nebulosas. El mayor experto en esa época era Vesto Slipher, un ayudante de Percival Lowell, el astrónomo que había fundado un observatorio en Flagstaff, Arizona, para buscar los canales de Marte. Lowell, creyendo que las nebulosas eran sistemas solares en proceso de formación, propuso a Slipher el trabajo de confirmar esta idea espectroscópicamente. Una de las cosas útiles que hará un espectro, gracias al efecto Doppler, es revelar información sobre el movimiento

de la fuente. En 1912, Slipher determinó que M31 se está moviendo *hacia* la Tierra a 300 kilómetros por segundo. En 1917 había obtenido datos espectroscópicos de la velocidad de veinticinco nebulosas que tenían formas espirales características (como nuestra Vía Láctea). Todas salvo cuatro mostraban desplazamientos hacia el *rojo* que indicaban que, a diferencia de Andrómeda, se estaban alejando rápidamente de nosotros.

El movimiento preponderante hacia afuera sugería que algún tipo de efecto sistemático estaba en acción, pero Slipher no tenía medios de determinar las distancias de sus nebulosas para demostrarlo. Además, la creencia dominante respecto a la organización del universo era que éste constituía un sistema estático, con la Vía Láctea situada en su centro y las nebulosas subordinadas a ella. Con el descubrimiento de Hubble, sin embargo, el tono empezó a cambiar: ahora era posible medir las distancias a las galaxias. El propio Hubble se propuso obtener datos sobre distancias y desplazamientos hacia el rojo para unas docenas de galaxias. Poco a poco se hizo claro que las galaxias más lejanas mostraban sistemáticamente mayores desplazamientos hacia el rojo, indicando que se estaban alejando de nosotros más rápidamente. En 1929, Hubble fue capaz de anunciar uno de los descubrimientos científicos más trascendente de todos los tiempos: el universo está en expansión.

Hubble basaba su sensacional afirmación en los datos del desplazamiento hacia el rojo, que indicaban que la velocidad a la que una galaxia se aleja de nosotros es directamente proporcional a su distancia. Esto significa que galaxias dos veces más lejanas están moviéndose a velocidad doble. La «ley» de Hubble es sólo estadísticamente correcta, en el sentido en que galaxias individuales pueden tener velocidades aleatorias bastante grandes alrededor de su «flujo de Hubble» global (recordemos que Andrómeda se está moviendo realmente hacia nosotros). Pero si se promedia adecuadamente sobre muchas galaxias, hay una relación matemática inequívoca entre velocidad y distancia. La ley de proporcionalidad concreta descubierta por Hubble puede interpretarse en el sentido de que *todas* las galaxias se están alejando *unas de otras* así como todas ellas se alejan de la Vía Láctea. En otras palabras, el conjunto entero de galaxias se está dispersando. Esto es lo que significa decir que el universo está en expansión. Posteriormente a las observaciones originales de Hubble se ha encontrado que las galaxias tienden a acumularse en grupos que no se expanden, e incluso pueden contraerse. De todas formas, en la escala de cúmulos de galaxias y escalas superiores, el universo está decididamente en expansión. Además, la pauta de expansión es altamente uniforme: en promedio, es la misma en todas direcciones. Es esta uniformidad la que está reflejada en la uniformidad de la radiación térmica cósmica de fondo.

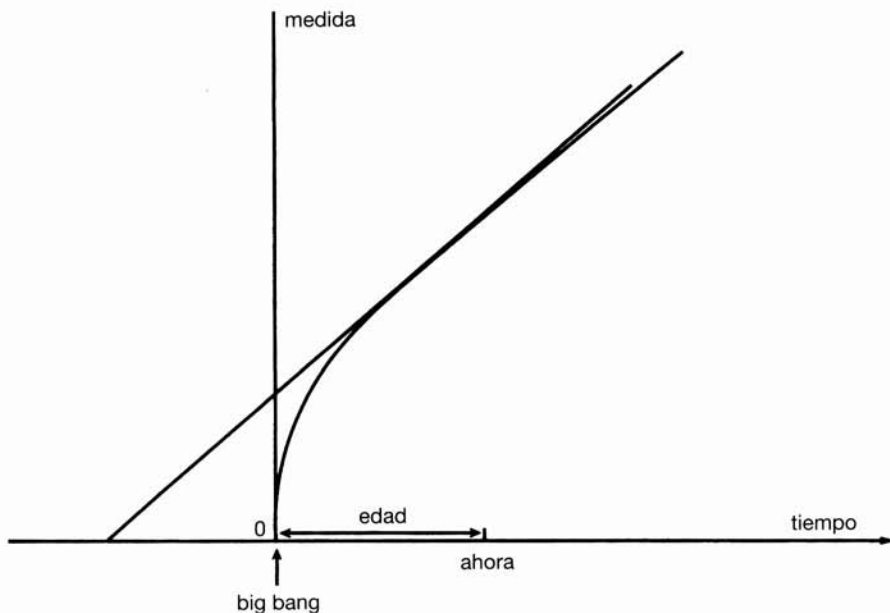
Evidentemente, si el universo está creciendo debe haber sido más pequeño en el pasado. Podemos imaginar la gran película cósmica pasada al revés hasta que todas las galaxias están comprimidas juntas. Este estado comprimido corresponde al momento del big bang, y en cierto sentido la expansión del uni-

verso puede considerarse un vestigio de dicha explosión inicial. Hoy es normal que los cosmólogos afirmen que el universo *empezó* con el big bang. Esta poderosa conclusión se sigue si usted remonta la expansión en el tiempo hasta cierto punto de origen idealizado en el que toda la materia del universo está concentrada en un lugar. Semejante estado de densidad infinita representa un campo gravitatorio infinito y una curvatura espacio-temporal infinita; es decir, una singularidad. La singularidad del big bang es análoga a la situación en el centro de un agujero negro que describí en el capítulo anterior, aunque situada en el pasado más que en el futuro. Como no es posible extender el espacio y el tiempo más allá de una singularidad semejante, se sigue que el big bang debe ser el origen del *propio tiempo*.

La gente, especialmente los periodistas que se empeñan en que los científicos lo expliquen todo, pregunta a menudo: ¿qué sucedió antes del big bang? Si esta teoría es correcta, la respuesta es simple: *nada*. Si el propio tiempo empezó con el big bang, no había «antes» en el que algo sucediera. Aunque la idea de un tiempo que se «pone en marcha» abruptamente en algún primer suceso singular es un concepto difícil de captar, no es en absoluto nueva. Ya en el siglo v, san Agustín afirmó que: «El mundo fue hecho, no en un tiempo, sino simultáneamente con el tiempo».¹ Para contrarrestar las preguntas capciosas sobre lo que Dios estaba haciendo antes de que creara el universo, san Agustín situaba a Dios completamente fuera del tiempo, haciéndole el creador del propio tiempo. Tal como describí en el capítulo 1, la idea del tiempo que nace con el universo encajaba así de forma muy natural en la teología cristiana. En el capítulo 7 veremos que las ideas recientes de la física cuántica han cambiado algo nuestra imagen del origen del tiempo, pero la conclusión esencial sigue siendo la misma: el tiempo no existía antes del big bang.

¿Más vieja que el universo?

Cuando Hubble presentó sus datos en 1929, nadie sacó ninguna conclusión global. El sugerente término «big bang» no entró en uso hasta mucho después. Los astrónomos se negaban nerviosamente a discutir el origen último del universo, y se contentaban meramente con reconocer que el estado primitivo altamente comprimido debía haber sido muy diferente de lo que vemos hoy. De todas formas, aunque la importancia física del big bang no estaba clara en esa época, los datos de Hubble facultaron a los científicos para calcular una fecha aproximada para este suceso midiendo la velocidad a la que se expande el universo. Si los datos de Hubble se toman al pie de la letra, la fecha calculada es de 1.800 millones de años. Más exactamente, si el universo se ha expandido siempre a la misma velocidad que lo hace hoy, las observaciones de Hubble sugerían que las galaxias habrían estado comprimidas todas juntas hace 1.800 millones de años.



5.1. El gráfico muestra cómo cambia la velocidad de expansión del universo con el tiempo. Empieza expandiéndose muy rápidamente inmediatamente después del big bang, pero progresivamente se decelera como resultado de la restricción gravitacional. La pendiente de la gráfica en la época actual (marcada «ahora») se muestra como una línea recta, y representa el ritmo de expansión observado en la actualidad. Si este ritmo hubiera permanecido constante a lo largo del tiempo, la edad proyectada del universo, obtenida extrapolando la línea inclinada hacia atrás hasta el eje temporal, sería considerablemente mayor que la edad verdadera.

Sin embargo, antes de extraer conclusiones tenemos que preguntar en primer lugar si la velocidad de expansión cosmológica ha cambiado a lo largo del tiempo. El universo no se expande libremente: las galaxias se atraen mutuamente mediante las fuerzas gravitatorias, y esto actuará para frenar su dispersión, frenando por consiguiente la velocidad de expansión. La figura 5.1 muestra la forma general en la que la expansión del universo se decelera con el tiempo como resultado de su efecto de frenado gravitatorio. Aquí se representa gráficamente el tamaño de una región típica de espacio en función del tiempo. El universo partió de un tamaño cero y una velocidad de expansión infinita: esto es el big bang. La gran inclinación de la curva en este punto indica un rápido incremento del tamaño cerca del momento inicial. La línea se curva luego continuamente, mostrando una reducción gradual en la velocidad de expansión a medida que crece el tamaño del universo. El efecto de deceleración también se reduce con el tiempo. Esta característica es fácil de entender: la gravedad se de-

bilita con la distancia, de modo que a medida que las galaxias se alejan la fuerza de frenado disminuye.

La época actual está marcada en el gráfico. La pendiente de la curva en dicho punto corresponde a la velocidad a la que el universo se está expandiendo hoy, cuyo valor está dado por la ley de Hubble. La pendiente está representada en la figura por la línea recta tangente a la curva. Si no hubiera habido efecto de frenado, la línea recta sería la historia correcta del universo. Evidentemente, para una velocidad de expansión actual dada, un universo que se frena debe ser considerablemente más joven que uno que se expande a una velocidad fija, porque cuando la línea se extrapola hacia atrás alcanza el cero en un punto situado considerablemente a la izquierda de la curva. Por consiguiente, utilizando el valor de Hubble de 1.800 millones de años concluimos que el universo tendría que ser considerablemente más joven que esto.

El propio Hubble no hizo hincapié en la cuestión de la edad del universo. En esa época, la cosmología apenas era una ciencia, y no animaba a conclusiones profundas. Pero en los años cincuenta este límite superior de 1.800 millones de años había empezado a preocupar a la gente. El problema era simple. La datación radiactiva había dado una cifra de 4.500 millones de años para la edad de la Tierra. Combinando este número con los datos de Hubble se llegaba a la conclusión absurda de que ¡la Tierra es más vieja que el universo! La datación radiactiva de meteoritos (y más recientemente de la Luna) ha dado edades similares a la de la Tierra, lo que supone una contradicción embarazosa. Pero lo peor estaba por venir. Durante décadas los astrónomos se han formado una imagen detallada de cómo envejecen las estrellas quemando su combustible nuclear. Entre las estrellas más viejas de nuestra galaxia están aquellas contenidas en cúmulos globulares, y a partir de su estudio se ha estimado que algunas estrellas han existido durante al menos 14.000 o 15.000 millones de años.

La llamativa discrepancia en escalas de tiempo pasó de ser una incomodidad punzante a ser un problema grave para los cosmólogos cuando trataron de inyectar cierto rigor en el tema en los años de posguerra. En una revisión de 1952, Hermann Bondi expresaba lo siguiente sobre la cuestión:

La gran importancia del problema de la escala de tiempo para muchas de las teorías cosmológicas se ha puesto de manifiesto. La dificultad aparece porque el recíproco de la constante de Hubble, deducida a partir de la relación velocidad-distancia, es un tiempo apreciablemente más corto que las edades de la Tierra, las estrellas y los meteoritos, determinadas por métodos diversos. Debido a la importancia crucial de esta discrepancia para tantas teorías y modelos, probablemente no hay ninguna otra investigación de tal importancia para la cosmología como seguir buscando en estas escalas de tiempo.²

En esa época, Bondi apoyaba la denominada teoría del estado estacionario del universo, que él había ayudado a poner de moda junto con sus colegas Thomas Gold y Fred Hoyle a finales de los años cuarenta. Esta teoría era un inten-

to frontal de evitar el problema de la escala de tiempo —haciéndolo desaparecer junto con el del origen del universo. En el modelo del estado estacionario, el universo no tiene principio ni fin. Continúa expandiéndose para siempre y, a medida que aumentan los espacios entre las galaxias, se forman más galaxias para llenarlos, constituidas por materia nueva que se está creando continuamente a partir de la nada mediante algún proceso desconocido. Los detalles se ajustan para hacer que el universo parezca más o menos igual a gran escala en todas las épocas: no hay evolución, no hay historia cósmica cambiante. Aunque la teoría del estado estacionario atrajo a numerosos partidarios durante algún tiempo, cuando Arno Penzias y Robert Wilson descubrieron la radiación térmica de fondo cósmico en 1965 la teoría quedó fuera de combate. La radiación cósmica se explica de forma tan clara como una reliquia del big bang caliente que es difícil imaginar que el universo haya existido siempre en su forma actual.

Dicho sea de paso, Hermann Bondi fue el primer científico al que vi en carne y hueso. La ocasión tuvo lugar hacia 1960, cuando él vino a mi instituto en el norte de Londres para dar una charla especial sobre la teoría de la relatividad y sus implicaciones para la naturaleza del tiempo. Aún puedo recordar su vívida descripción de cómo sincronizar relojes distantes utilizando señales luminosas, dada con su característico tono mesurado, enriquecido por la huella de un acento centroeuropeo (procedía originalmente de Viena) que, desde que Einstein estableció el estereotipo, parece de algún modo dar credibilidad a los pronunciamientos científicos.

El mayor error de Einstein

El patinazo más grande de mi vida...

ALBERT EINSTEIN

El propio Einstein dejó de seguir la pista de la cosmología en los años veinte, y parece que supo de la expansión del universo sólo después de haber visitado a Hubble en California en 1931. En esta etapa de su carrera, Einstein estaba ocupado con la mecánica cuántica, y cada vez estaba más involucrado en la política internacional. Con la llegada del nazismo, la situación en Alemania se estaba deteriorando. Como judío, pacifista y pensador independiente de renombre internacional, Einstein era especialmente vulnerable. Buscaba cada vez más oportunidades de viajar al extranjero, haciendo visitas regulares a la Universidad de Oxford y al Instituto Tecnológico de California en Pasadena. Fue en una de estas visitas cuando conoció a Hubble.

En los días tempranos de la teoría de la relatividad, Einstein se había interesado vivamente en la cosmología. Después de su formulación de la teoría de la relatividad general en 1915, elaboró un modelo para la estructura a gran es-

cala del universo que utilizaba su descripción de la gravitación en términos de curvatura espacio-temporal. Este trabajo se publicó en 1917. Nadie sospechaba entonces que el universo se está expandiendo, de modo que era perfectamente natural que Einstein buscara un modelo estático y eterno. No importa que las estrellas se apagarán al cabo de algunos miles de millones de años; eran los primeros días de la teoría astrofísica y los físicos aún no tenían mucha idea de cómo brillan las estrellas. El principal obstáculo al que se enfrentaba Einstein en sus primeras investigaciones cosmológicas se refería a la misma naturaleza de la gravedad. Como en la teoría de Newton, la teoría de la relatividad general describe la gravitación como una atracción universal que actúa entre todos los cuerpos del cosmos. Esto lleva a una especie de paradoja, porque una colección de cuerpos sin ningún apoyo y todos los cuales se atraen mutuamente no puede permanecer estática: caerán inevitablemente hasta unirse en una sola masa. En otras palabras, el universo se colapsará bajo su propio peso.

Para evitar esta grave dificultad, Einstein dio una ingeniosa solución. Propuso que la fuerza de atracción gravitatoria está contrarrestada por un nuevo tipo de fuerza repulsiva, cuya intensidad está finamente ajustada para compensar exactamente el peso del cosmos, consiguiendo con ello un equilibrio estático. Más que introducir semejante fuerza en la teoría, Einstein examinó su teoría de la relatividad general en busca de claves. Las ecuaciones del campo gravitatorio no fueron, por supuesto, dadas a Einstein en tablas de piedra, ni se derivaban de algún modo de la teoría de Newton. Las obtuvo tras años de metódico trabajo matemático y teniendo en cuenta muchos factores, incluyendo la simplicidad y la elegancia. Las versiones más simples de las ecuaciones de campo funcionan admirablemente, reduciéndose correctamente a las de Newton cuando los campos gravitatorios son débiles. También conducen a varias predicciones acertadas.

El principal defecto de las ecuaciones de campo originales de Einstein era que la fuerza gravitatoria que describen es puramente atractiva, y por lo tanto es inconsistente con un universo estático. Para soslayar este problema, Einstein tomó la decisión fatídica de añadir un término extra a sus ecuaciones de campo originales. Lo denominó «término cosmológico». Aunque el término cosmológico es más simple que los otros términos de la ecuación, y en algunos aspectos es un añadido natural, representaba a los ojos de muchos una desagradable adulteración y tenía todas las huellas de ser una imposición. Peor aún, el término cosmológico entra en la teoría multiplicado por un número desconocido, denominado la «constante cosmológica», normalmente representada por la letra griega Λ . El problema con todo esto es que hay una regla no escrita en la ciencia que dice que hay que mantener el número de cantidades independientes en la teoría tan pequeño como sea posible. La teoría de Newton tiene solamente una constante indeterminada, llamada «G», que es una medida de la intensidad de la fuerza entre dos masas puntuales. El valor numérico de G se encuentra midiendo la fuerza de atracción entre dos pesadas bolas de masa conocida

a una distancia dada. La teoría de Einstein también contiene a G , y ahora tenía una segunda constante, Λ , que también debía determinarse a partir de medidas.

El término cosmológico es opcional en el sentido de que puede ser eliminado simplemente haciendo Λ igual a cero, con lo que se recuperan las ecuaciones de campo originales. Pero si se escoge Λ con un valor positivo, la fuerza que describe es repulsiva, como deseaba Einstein. Al ser una componente de una teoría general de la gravitación, la fuerza Λ puede considerarse como un tipo de antigravedad. Sin embargo, la naturaleza de la fuerza Λ es característicamente diferente de la gravedad «normal» y de otras fuerzas familiares. La mayoría de las fuerzas disminuyen en intensidad con la distancia, pero la fuerza Λ realmente se hace *más intensa*. Esto tiene la virtud de que la repulsión cosmológica es despreciable en la escala del sistema solar, donde la teoría original de Einstein ya da una precisión impresionante, pero su presencia sigue haciéndose notar a distancias extragalácticas.

Puede calcularse un valor para Λ a partir del requisito de que la repulsión sea suficientemente fuerte para compensar el peso de una región grande dada del universo. A partir de la densidad media conocida de la materia cósmica, Einstein fue capaz de calcular cuánto pesa una región dada del universo, y de ello deducir Λ . Era fácil comprobar que el término cosmológico sería completamente despreciable en sus efectos locales. Por ejemplo, en el caso de la gravedad terrestre la fuerza Λ reduciría su peso en sólo algunas milésimas de billonésima de billonésima de gramo; menos que el peso de un simple átomo. La atracción entre la Tierra y el Sol disminuiría en lo equivalente a un suave soplo de aire. Así, aunque algunos pudieran considerar el término Λ artificial, *ad hoc* y feo, no puede descartarse apelando a la física local. La única manera de comprobarlo es mediante observaciones cosmológicas.

Al hacerlo, resultó que Λ no bastaba para su propósito, por dos o tres razones. En primer lugar, no hacía el trabajo apropiadamente; en segundo lugar, parecía ser innecesaria en cualquier caso. Estos defectos fueron expuestos no por Einstein, quien parecía perder interés en la cosmología precisamente cuando empezaba a ser excitante, sino por algunos científicos europeos. El más importante de éstos fue un clérigo y matemático belga, monseñor Georges Lemaître. Nacido en 1894, Lemaître trabajó toda su vida en la Universidad de Lovaina. Los colegas le describían como un hombre de gran vigor y con una risa estentórea. Fue condecorado por su valor en la primera guerra mundial, y en la segunda ejerció un valiente liderazgo en la universidad durante la ocupación alemana, un servicio por el que se le concedió el más grande honor nacional de Bélgica. Aunque Lemaître hizo importantes contribuciones a la mecánica celeste y al uso de los modernos ordenadores electrónicos para análisis numérico, es mejor recordado como el hombre que transformó el estudio de la cosmología de una rama menor de la física en una disciplina respetable de propio derecho. Sus investigaciones teóricas empalmaban con el trabajo de Hubble en el frente observacional y dieron nacimiento al tema de la cosmología científica de una forma reconociblemente moderna.

Lemaître hizo un uso completo de las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein en sus investigaciones, pero, a diferencia de Einstein, no se limitó a soluciones estáticas. En 1927, Lemaître descubrió que el tira y afloja propuesto por Einstein entre atracción gravitatoria y repulsión cosmológica no podía funcionar porque era inestable. La más mínima perturbación haría que el universo o bien colapsara o bien se embarcara en una carrera sin fin de expansión desbocada, dependiendo de que ganase la partida o bien la gravedad normal o bien la repulsión cósmica. Quizá de forma más significativa, se estaba haciendo cada vez más evidente en esa época que el universo no era estático en ningún caso, sino que se estaba expandiendo.

Cuando Einstein finalmente tomó conciencia de estos hechos, el efecto fue dramático. Se retractó públicamente, abandonando su modelo estático del universo con gran disgusto. Fuera quedó también el ofensivo y adulterante término cosmológico que había sido invocado especialmente para explicarlo. Einstein lamentó el hecho de que si Hubble hubiera hecho su descubrimiento algo antes, el término cosmológico nunca se hubiera introducido. En realidad, si Einstein se hubiese atendido a las ecuaciones originales y buscado las consecuencias sin miedo, seguramente se hubiera visto llevado a predecir la expansión del universo varios años antes de que fuera descubierta realmente, lo que indudablemente hubiera sido una de las hazañas más grandes en la historia de la ciencia. Pero sucedió que fue distraído por una adhesión excesivamente convencional a la idea de un universo estático. Fue una gran oportunidad fallida. Más tarde Einstein iba a describir la introducción del término cosmológico como el patinazo más grande de su vida.

Con la ventaja de la visión retrospectiva, esta reacción de Einstein puede verse como algo emocional y precipitada. Ciertamente, el término cosmológico ya no se requería para explicar un universo estático, pero, lógicamente, el hecho de que el universo esté en expansión no *descarta* una fuerza Λ ; simplemente la hace innecesaria para su propósito original. Einstein, en su lamento de haber dejado de predecir la expansión del universo, puede haber arrojado al niño con el agua del baño —como veremos.

Lemaître demostró que las ecuaciones de campo de Einstein eran consistentes con una variedad de modelos cosmológicos en expansión, la mayoría de los cuales empezaban con un big bang. Curiosamente, muchos de estos modelos ya habían sido descubiertos en 1922 por un científico ruso poco conocido, Aleksandr Friedmann. Nacido en 1888, Friedmann vivió en San Petersburgo y, a diferencia de Einstein, fue un estudiante excepcional, altamente dotado para las matemáticas aplicadas. En 1913 orientó sus talentos al tema de la predicción del tiempo meteorológico, y fue a trabajar al observatorio meteorológico de Pavlovsk. Cuando llegó la guerra en 1914, su experiencia meteorológica fue requerida en el frente, donde también llegó a ser piloto. Continuó dando clases sobre dinámica de fluidos y predicción del tiempo en Kiev, y luego trabajó en el Observatorio Geofísico de Petrogrado. Fue allí donde se interesó en la teoría

de la relatividad general como un trabajo secundario. Aplicó las ecuaciones de campo de Einstein (incluyendo el término Λ) al problema de un universo uniformemente lleno de materia, y descubrió que, además de la solución estática de Einstein, había también la posibilidad de modelos de expansión y contracción. Publicó sus resultados en dos artículos, señalando que la naturaleza estática del modelo de Einstein era simplemente una hipótesis que no estaba apoyada en observaciones. La respuesta inicial de Einstein fue que Friedmann había cometido simplemente un error en sus cálculos. Más tarde publicó una réplica más meditada en la que admitía que Friedmann había hecho sus cálculos correctamente y que su trabajo era «clarificador». Sin embargo, Einstein seguía despreciando la idea de un universo dependiente del tiempo, y el trabajo profético de Friedmann languideció en la oscuridad durante una década.

Al pobre George Lemaître no le fue al principio mucho mejor que a Friedmann. Tras un viaje a los Estados Unidos donde supo de las medidas de desplazamiento hacia el rojo de Slipher, publicó un artículo en 1927 que contenía resultados muy similares a los de Friedmann y en el que anticipaba la ley de Hubble. Trató de atraer la atención de Einstein y otros hacia su trabajo, pero el modesto sacerdote no fue tomado en serio. Quedó para Eddington el defender las contribuciones importantes de Lemaître algunos años después, cuando los resultados de Hubble habían transformado la situación.

Para apreciar la importancia del trabajo de Friedmann y Lemaître es necesario saber algo sobre la relación entre las ecuaciones de una teoría física y sus soluciones. En la ciencia sucede a menudo que un conjunto de ecuaciones posee muchas soluciones, cada una de las cuales describe una realidad posible. Para escoger una, usted tiene que decidir cuál se ajusta mejor a los hechos, o bien apelar a algún criterio adicional, tal como la razonabilidad física o la elegancia. Friedmann y Lemaître empezaron con las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein, supusieron que el universo está uniformemente lleno de materia con ciertas propiedades simples y obtuvieron un gran conjunto de soluciones. Entre ellas estaban el modelo estático original de Einstein y una variedad de modelos de expansión y contracción. Cada solución representaba un universo posible consistente con la teoría de la relatividad general de Einstein. La cuestión candente era ¿cuál se corresponde mejor con la realidad?

El propio Einstein no ofrecía mucha ayuda. Molesto por su gran patinazo sobre el término cosmológico, frustrado por la creciente aceptación de la mecánica cuántica entre sus colegas, y preocupado por la amenaza del nazismo y la depresión mundial, tenía su mente en otras cosas. De hecho, estaba a punto de dejar Berlín, y Europa, para siempre. En Norteamérica se había fundado un nuevo Instituto para Estudio Avanzado en 1932, y se le ofreció un puesto a Einstein, ahora en su cincuentena. Inicialmente estuvo de acuerdo en dividir su tiempo entre Princeton y Berlín. Precisamente un año o dos antes, había planeado construir una pequeña casa familiar en un terreno en el pueblecito de Caputh, a corta distancia del río Havel, donde le gustaba navegar. Los Einstein eran felices viviendo en Alemania, pero se concentraban nubes de tormen-

ta; cuando él y Elsa partieron para Norteamérica en diciembre de 1932, tuvo la sensación de que nunca regresarían. «Mírala bien —dijo a Elsa cuando dejaban la pequeña casa que él amaba—; nunca la verás de nuevo.»³ Y tenía razón. Al mes siguiente, Hitler llegó al poder en Alemania, y Einstein estaba en uno de los primeros puestos de la lista de indeseables. Su casa fue registrada en busca de armas y él iba a ser frecuentemente calumniado por el régimen. Inmediatamente dimitió de la Academia Prusiana de Ciencias y por segunda vez renunció a su ciudadanía alemana (retenía la ciudadanía suiza). Tras una breve estancia en Bélgica, partió en barco para los Estados Unidos y Princeton, que iba a convertirse en su hogar permanente. Salvo un breve viaje a las Bermudas para conseguir visados, nunca dejó el suelo norteamericano.

Pese a estas tribulaciones, Einstein discutió su preferencia por una solución concreta de Friedmann en un artículo escrito con el astrónomo holandés Willem de Sitter en 1932. El modelo Einstein-de Sitter sigue siendo el más simple de los modelos de Friedmann sin un término cosmológico. Después de esto, sin embargo, Einstein no se interesó mucho por la corriente principal de la cosmología, y quedó para Eddington, Lemaître, Hubble y otros la tarea de hacer frente a la cuestión del big bang y a la ardua cuestión del origen último del cosmos. La situación a principios de los años treinta era en cualquier caso confusa y adolecía de una falta de comunicación entre astrónomos de «tuerca-y-tornillo» por un lado, y físicos-matemáticos bien versados en teoría de la relatividad, por el otro.

Al recordar estos primeros desarrollos de la cosmología, el cosmólogo británico William McCrea comentaba: «No recuerdo que hubiera una carrera para ajustar un modelo de Friedmann-Lemaître concreto con las observaciones. El interés inmediato estaba en los indicios procedentes de los resultados de Hubble de que el universo había permanecido en un estado muy congestionado aparentemente no hace más que alrededor de 2.000 millones de años».⁴ Con respecto al problema de la edad, McCrea recuerda que tanto la estimación de Hubble del momento del big bang como la datación radiactiva de la Tierra se consideraban sujetas a revisión. «Lo que impresionaba a los astrónomos y los geólogos era que ambas eran del mismo orden ... Ciertamente, nadie entonces parecía esperar que los modelos revelasen algo sobre la *creación* del universo o sus instantes primitivos».

Dos tiempos en el cosmos

No podemos atrapar el instante fugaz y ponerlo junto a un instante posterior.

EDWARD MILNE

Otra razón completamente diferente por la que el problema de la edad no hizo sonar las alarmas en aquellos primeros años tenía que ver con la naturaleza

misma del tiempo. Podemos comparar las marchas relativas de dos relojes colocándolos uno junto al otro, o al menos enviando señales de ida y vuelta entre sus observadores. Pero ¿cómo podemos comparar la velocidad del paso del tiempo de hoy, por así decir, con la que era hace mil millones de años o más?

Aquí el problema es el siguiente: ¿cómo podemos saber si un reloj atómico de cesio superpreciso va a marchar, al cabo de algunos millones de años, un poco más rápido o un poco más lento de como lo hace hoy? No quiero decir sólo un reloj atómico *particular*, sino todos los relojes atómicos. Incluso si podemos concebir la noción de un tiempo cósmico universal, ¿podemos estar seguros de que el gran reloj del cielo ha estado marchando siempre uniformemente, desde el comienzo del tiempo hasta hoy? Si el propio reloj cósmico hubiera cambiado con el tiempo, esto afectaría decisivamente a nuestras estimaciones de la edad del universo. Einstein liberó al tiempo de las trabas de la rigidez newtoniana: sabemos que el tiempo puede variar de un lugar a otro. ¿Por qué no de un tiempo a otro? ¿Podría ser esta una solución para el problema de la escala del tiempo?

Con la introducción de este nuevo nivel de incertidumbre, las aguas se enturbian considerablemente. Si el tiempo es algo medido por los relojes, y si los relojes varían *con* el tiempo, ¿cómo podemos saber alguna vez lo que es *realmente* el tiempo? Tales cuestiones desconcertantes fueron sometidas a un penetrante análisis por Edward Milne, quien fue el primer titular de la Cátedra Rouse Ball de Matemáticas en la Universidad de Oxford, un puesto que ahora ostenta Roger Penrose. Milne, descrito por sus colegas más comprensivos como un hombre afable de intelecto brillante, debe ser considerado uno de los pioneros de la cosmología moderna, aunque él decidió abrir su propio surco solitario. Aceptó con gusto las observaciones de Hubble del universo en expansión, pero rechazó la teoría de la relatividad general de Einstein, prefiriendo su propia teoría a la que llamó «relatividad cinemática». Esto molestó a muchas personas y le atrajo muchas críticas.

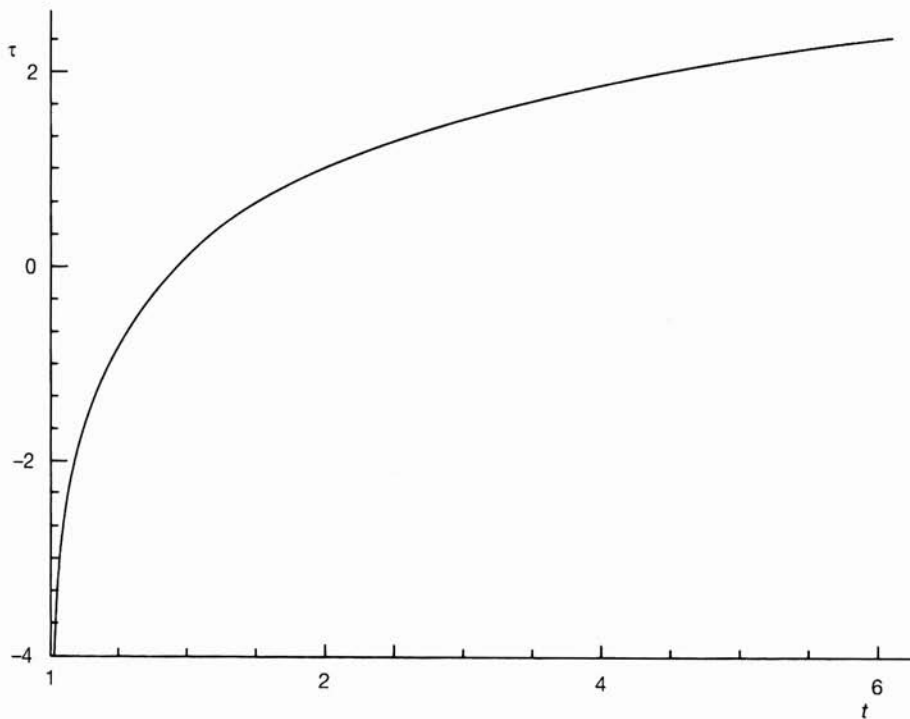
Fundamental para la aproximación global de Milne era la convicción de que las leyes de la física deben deducirse de la naturaleza del universo y no al contrario, como se admite convencionalmente. Él razonaba que, si usted empieza con la forma en que la materia está distribuida por el cosmos, la forma en que el universo se expande, y así sucesivamente, entonces cosas como las leyes de la gravitación y el electromagnetismo deben seguirse de estos hechos como deducciones lógicas. Si un esquema semejante funcionase, atajaría los procesos normales de la ciencia, tales como el experimento y la observación, y haría posible que las leyes del universo se derivasen más o menos por el puro pensamiento.

Esto era bastante fuerte, y podría haber sido mucho más atractivo si no se hubiera convertido en algo conceptualmente muy técnico. Del amasijo matemático de Milne emergían realmente, aquí y allí, ecuaciones reminiscentes de la física familiar. Pero también había algunas conclusiones peculiares. Una de es-

tas concernía a los relojes y el control del tiempo. A partir de su estudio de la forma en que la marcha de los relojes podría ser comparada en diferentes lugares y tiempos, Milne dedujo que no había un tiempo cósmico universal dado por Dios: de hecho, podía haber cualquier número de escalas de tiempo diferentes (véase la cita al principio de este apartado). Basándose en sus hipótesis sobre la forma en que el universo está constituido, dedujo que hay dos escalas de tiempo de importancia especial, lo que es una más que la normal. La idea consistía en que ciertos procesos físicos operan según una escala de tiempo, mientras que otros procesos están gobernados por la otra. Milne designó a los dos tiempos con las letras latina y griega t y τ . El primero sería el tiempo de los procesos atómicos y de la luz, tal como se aplica a los relojes atómicos y a las frecuencias de las ondas luminosas, por ejemplo. Por el contrario, el tiempo τ se supone aplicable a los procesos gravitatorios y a los procesos mecánicos a gran escala tales como la rotación de la Tierra y su movimiento alrededor del Sol. La característica distintiva de la teoría es que t y τ pueden empezar siendo iguales pero poco a poco se desacompasan. La figura 5.2 muestra cómo están relacionados los dos tiempos. Para lectores con inclinación matemática, τ es el logaritmo de t .

¿Qué significa en la práctica la duplicación de las escalas de tiempo? Lo más importante es que implica que los relojes atómicos se aceleran poco a poco respecto a los relojes astronómicos, que son los que determinan el día y el año terrestres. Aquí la expresión clave es «poco a poco». De la fórmula de Milne se sigue que la discrepancia acumulada en nuestra época es de sólo una parte en diez mil millones por año aproximadamente. Se necesitarían miles de años para que la diferencia llegase a un segundo. Por consiguiente, nosotros no sentiríamos ninguna desorientación temporal. Por el contrario, si nos remontamos a épocas cosmológicas pasadas, las diferencias aumentan, como muestra la figura 5.2. De hecho, a medida que t se aproxima a cero, lo que usted quizá pensaría equivocadamente que era el comienzo del tiempo, τ va a menos infinito; es decir, se extiende al pasado infinito. Medido en años terrestres, ¡el universo es *infinitamente* viejo! Puesto que el trabajo de Hubble sobre la expansión del universo se refiere también a un proceso dinámico más que a un proceso atómico, también mide el tiempo τ , de modo que en esta escala de tiempo el big bang sucedió hace una eternidad. Vistos en el tiempo t , procesos tales como la rotación de los planetas estaban muy acelerados en el pasado, pero el comportamiento de la luz y de los procesos atómicos permanecía invariable. Recíprocamente, en el tiempo τ las galaxias no se mueven —es decir, el universo es realmente estático. En su lugar, las frecuencias de la luz decrecen poco a poco con el tiempo. Esto explica el desplazamiento hacia el rojo.

¿Resuelve la teoría de Milne el problema de la edad del universo? Respecto a esto, la respuesta es sí. Milne claramente así lo pensaba: «Parece entonces que las paradojas a que se ve llevada la física contemporánea al discutir la edad



5.2. Tiempos variables. En la teoría del tiempo de Milne, existen dos escalas de tiempo independientes, t y τ . Los relojes que mantienen un tipo de tiempo pierden poco a poco el paso respecto a los que mantienen el otro. Aquí se muestra la relación entre los dos tiempos. La característica clave es que el cero para t corresponde al pasado infinito para τ .

del universo ... se deben a la confusión de las dos escalas de tiempo», escribió. Sin embargo, esta teoría tenía muy poco que decir sobre la radiactividad y, en particular, sobre si las vidas medias radiactivas se refieren al tiempo t o al tiempo τ . Si fuera al último, entonces nada está resuelto, porque la datación radiactiva de la Tierra se calcula en la misma escala de tiempo que la expansión del universo.

Bien; la relatividad cinemática es sólo una teoría, y usted ya no puede encontrar hoy a nadie que abogue por ella. Por el contrario, la idea de que pudieran existir dos (o más) escalas de tiempo en el universo no puede ser rechazada tan a la ligera. No hay imperativo lógico que obligue a que todas las variedades de relojes coincidan, y tampoco existe ninguna ley de la física conocida para ello. Tampoco estaba Milne solo en su propuesta. Nada menos que un físico como Paul Dirac, uno de los fundadores de la mecánica cuántica y ganador de un premio Nobel, llegó a conclusiones similares a las de Milne.

Dirac jugó brevemente con la idea de los dos tiempos en los años treinta, y luego dejó a un lado su teoría que cayó en la oscuridad. Conocido por su modestia y reserva, Dirac no era alguien que perseverase en una idea a menos que tuviera algo importante que comunicar. Aunque pasó la mayor parte de su vida activa en la Universidad de Cambridge rodeado por alguno de los mejores científicos del mundo, raramente trabajaba en colaboración y sus intercambios verbales eran monosilábicos. Si pensó alguna vez sobre el tiempo cósmico tras la publicación de su artículo original, probablemente nadie lo sabía.

Cuando se jubiló, Dirac se trasladó a Florida y fue de allí desde donde viajó a Trieste para asistir a un simposio celebrado en su honor en 1972, con ocasión de su setenta cumpleaños. Tuve la suerte de asistir al simposio y fue allí la única vez que escuché una conferencia de Dirac. Recuerdo muy bien al gran hombre levantándose para pronunciar el principal discurso. Parecía el modelo mismo de un caballero inglés de clase media, ligeramente encorvado, con cabello y bigote grises, y unos ademanes suaves y sencillos. La audiencia se sumió en un respetuoso silencio, y yo me preguntaba qué tesoros de sabiduría transmitiría en esta ocasión muy especial, tras una vida de arrancar vetas de verdad de la cara rocosa de la ciencia. El estilo parco de Dirac era legendario y su presentación ese día fue tan normal como cualquiera que yo me haya encontrado. Después de pedir que se conectara la «linterna», y hacer los comentarios mínimos, procedió a mostrar una serie de diapositivas. Quedé sorprendido al ver que tras décadas de silencio sobre el tema ¡Dirac había elegido discutir su trabajo sobre los tiempos t y τ ! Una característica memorable de sus diapositivas era la práctica poco convencional de Dirac de dibujar el tiempo fluyendo hacia *abajo* de la pantalla en lugar de hacia arriba. La conferencia de Trieste alzó el telón de un proyecto de investigación revitalizado, llevado en colaboración con Vittorio Canuto, que ocupó los años finales de Dirac. Lo que empezó en los años treinta como un breve comentario, una especie de curiosidad formulada a medias, se metamorfoseó en una teoría llena de savia con ramificaciones importantes.

Como Milne, Dirac concluía que los relojes atómicos se desacompasan respecto a los relojes astronómicos. Como he explicado anteriormente, visto en la escala atómica (la escala con la que fijamos nuestros relojes, y presumiblemente aquella que sigue la actividad cerebral), los planetas cambian lentamente sus velocidades orbitales. Resulta que una lenta variación en el tiempo astronómico remeda una lenta variación en la intensidad de la fuerza gravitatoria entre todos los cuerpos, de modo que a medida que pasa el tiempo la atracción del Sol sobre la Tierra y de la Tierra sobre la Luna se debilitan gradualmente. Basados en la teoría resucitada, Dirac y Canuto predecían una alteración en los periodos orbitales de los planetas de algunas pocas partes por cien mil millones por año.

Por fortuna, fue posible poner a prueba este minúsculo efecto. Como he mencionado en el capítulo 3, la nave espacial Viking proporcionó a los físicos

una oportunidad imprevista para hacer medidas precisas de tiempos y distancias a lo largo del sistema solar. Las sondas Viking estaban diseñadas para posarse suavemente en la superficie marciana y transmitir datos de sus condiciones físicas. En particular, llevaron a cabo varios experimentos en busca de vida bacteriana. Su relevancia para la gravitación y la teoría de Dirac fue puramente accidental, pero feliz. El problema para verificar las teorías de G variable, como se las conoce, es que los posibles cambios muy lentos en la fuerza gravitatoria que pudieran afectar a los planetas son extraordinariamente difíciles de detectar, por dos razones. En primer lugar, los planetas no describen meramente órbitas alrededor del Sol al modo kepleriano prístino. Están sometidos a un gran número de pequeñas perturbaciones causadas por los otros planetas, todas las cuales se suman en un amasijo complicado. Se necesita un programa de ordenador gigante para desembrollarlas, e incluso entonces sigue habiendo incertidumbres. En segundo lugar, trazar el curso de un planeta en el cielo requiere medidas de posición muy precisas. Para esto era para lo que las Viking venían de perlas. Transmitiendo desde una situación fija en la superficie de Marte, la nave espacial era capaz de proporcionar a los científicos del proyecto medidas de distancias extraordinariamente precisas. Durante varios años se recogieron datos y se introdujeron en un ordenador. Mientras tanto, Dirac murió. Inmediatamente después, Canuto anunció que los datos del Viking ¡descartaban la teoría de Dirac de una vez por todas!

Nada de esto prueba, por supuesto, que haya sólo una escala de tiempo para todos los procesos físicos; simplemente demuestra que las teorías concretas de Dirac y Milne contenían errores, probablemente fatales. En ausencia de una teoría unificada de todos los procesos físicos basada en la idea de una escala de tiempo común, sigue abierta la cuestión intrigante de cuántas escalas de tiempo existen. Hay muchas variedades de relojes —astronómicos, de péndulo, atómicos, de cristal de zafiro, resonadores superconductores, etc.— que involucran diferentes principios físicos. Es perfectamente concebible que algunos de estos relojes puedan perder lentamente su sincronía durante un tiempo cosmológico. Las rápidas mejoras en la precisión de diferentes tipos de relojes han llevado a un resurgir reciente de los experimentos de comparación entre ellos. Por ejemplo, un grupo alemán ha comparado un reloj atómico de haces de cesio con una cavidad resonante superconductora durante un periodo de doce días, y ha determinado que cualquier deriva sistemática tenía que ser menor que aproximadamente una parte en cien mil millones por año. Límites incluso más severos, de dos partes en diez billones por año, han sido establecidos para las velocidades relativas de relojes atómicos de magnesio y cesio. Por supuesto, cualquiera que sea la precisión con que se realizan estos experimentos, siempre queda la posibilidad de variaciones aún más pequeñas.

De modo que ¿dónde deja esto el problema de la edad del universo? En 1952, el astrónomo holandés Walter Baade conmocionó a sus colegas al anunciar que los resultados de Hubble contenían un serio error. Para entonces Hub-

ble había estado trabajando laboriosamente durante dos décadas midiendo los desplazamientos hacia el rojo y las distancias de galaxias aún más débiles con la ayuda del telescopio del Monte Wilson y de su experto asistente Milton Humason. Desde el principio, el método de Hubble para medir distancias se había basado en observaciones de un tipo particular de estrellas conocidas como variables cefeidas. Estas estrellas aumentan y disminuyen su brillo de una forma cíclica característica, por lo que, midiendo la duración del ciclo de luminosidad, se puede calcular el brillo intrínseco de la estrella. Comparando su brillo verdadero con su brillo aparente, es posible estimar a qué distancia está situada la estrella. Hubble y Humason buscaron estrellas variables cefeidas en otras galaxias para calcular sus distancias. Aunque el método es bueno, Hubble había estado trabajando con una calibración incorrecta: las cefeidas estaban al menos a una distancia doble de lo que se había estado suponiendo. Repentinamente el tamaño del universo se había duplicado, y su edad se había ampliado en un factor similar. El problema de que la Tierra parecía ser más vieja que el universo, aunque lejos de ser resuelto, quedaba al menos atenuado.

A partir de este súbito replanteamiento, la edad estimada del universo basada en la relación de Hubble entre la distancia a una galaxia y la velocidad de su recesión ha sido revisada al alza varias veces. Se han publicado cifras de 15.000 o incluso 20.000 millones de años para la edad del universo. Durante una década o dos, empezó a parecer que la paradoja de un universo aparentemente más joven que algunas de sus partes componentes había quedado resuelta. Luego, todo empezó a ir mal de nuevo.

¿El mayor triunfo de Einstein?

Soy un detective en busca de un criminal: la constante cosmológica. Sé que existe, pero no sé qué apariencia tiene.

ARTHUR EDDINGTON (1931)

La escritura de Dios

«Los científicos revelan ideas profundas sobre el origen del tiempo», decían los titulares de primera página de *The New York Times*. La fecha, 24 de abril de 1992, está grabada en la memoria de todo astrónomo. De un extremo a otro del mundo, la prensa estaba en un estado de frenesí provocado por un suceso científico trascendental. Stephen Hawking lo llamó «el descubrimiento del siglo, si no de todos los tiempos». La revista *Time* se referían a ello como «ecos del big bang», y *Newsweek* hablaba con excitación de «la escritura de Dios».

La gran noticia no era exactamente teológica, sino cosmológica. Se refería a un avance crucial en el análisis de los datos que continuamente llegaban de COBE, el satélite diseñado para investigar la radiación cósmica de fondo en busca de alguna huella de irregularidad. Durante dos años, COBE había estado examinando pacientemente las reliquias del resplandor del big bang buscando indicios de cualquier punto caliente. Como expliqué en el último capítulo, las observaciones preliminares sugerían que la radiación térmica de fondo es uniforme en el cielo al menos dentro de un margen de una parte en cien mil. En 1992 se habían recogido datos suficientes para distinguir la presencia de una pauta ligera pero inequívoca en el mapa térmico del cosmos. La radiación estaba incuestionablemente marcada con rizos minúsculos, manchas calientes y frías superpuestas a una uniformidad por lo demás sorprendente. Era exactamente lo que los científicos necesitaban para confirmar sus ideas sobre el big bang. «Si ustedes son religiosos —aventuró exultante el líder del proyecto George Smoot

en un momento de descuido—, es como mirar a Dios.» Y los medios de comunicación enloquecieron.

Por todo el mundo los científicos lanzaron un suspiro de alivio colectivo. Realmente, la teoría del big bang estaba en profundas dificultades, y el hallar estos rizos era crucial. Durante algún tiempo se había temido que quizá no estuvieran allí en absoluto. Si así hubiera sido, los cosmólogos se hubieran visto obligados a volver a la pizarra.

La importancia de los rizos de COBE es fácil de captar. Supuestamente la radiación térmica cósmica había estado viajando más o menos sin ser perturbada desde hace aproximadamente 300.000 años a partir del big bang —la época en que el universo se hubo enfriado lo suficiente para hacerse más o menos transparente. Comparado con la edad actual de muchos miles de millones de años, esto es relativamente temprano. Así pues, la radiación es una reliquia directa del universo primitivo caliente y denso, una especie de fotografía del aspecto que tenía el cosmos en su fase primigenia. Obviamente, era muy liso.

La uniformidad del universo primigenio encaja mal con su actual estructura granulosa. El examen astronómico revela estrellas y gases amontonados en galaxias, las galaxias congregadas en grupos, que a su vez forman supercúmulos. Durante los años setenta y ochenta, los astrónomos cartografiaron laboriosamente el cielo cada vez con mayor detalle, construyendo imágenes tridimensionales de la organización de las galaxias a gran escala. Empezó a acumularse evidencia de enormes vacíos, donde la materia luminosa es escasa, inmersos en una trama deshilachada de hojas y filamentos formada por miles de galaxias agregadas. Se distinguían enormes estructuras que se extendían cientos de millones de años-luz a través del universo. Esta textura cósmica a gran escala recuerda la espuma de la superficie de una jarra de cerveza, o quizá una telaraña densamente tejida.

Un desafío importante para la teoría cosmológica consiste en explicar cómo ha aparecido esta estructura a gran escala. Las fuerzas gravitatorias tenderán naturalmente a concentrar la materia en grumos. Si el universo empezó en un estado completamente liso, con gas más o menos uniformemente difuso por el espacio, entonces con el tiempo habría una tendencia a que el gas se viese atraído hacia aquellas regiones donde la densidad era ligeramente más alta que en las vecinas. A medida que el gas se acumulaba lentamente en gotas, la atracción gravitatoria de estas regiones más densas sería amplificada y las gotas recogerían cada vez más material a expensas de las otras áreas. Con el tiempo, la materia estaría en un estado de fuerte agregación. Cuando los científicos empezaron a investigar en detalle este proceso de acumulación descubrieron que sucede sólo de forma extraordinariamente lenta. El problema afecta a la expansión del universo, que trabaja contra la tendencia de la gravedad a juntar las cosas. Obtener el grado actual de acumulación a partir de unos comienzos completamente lisos precisaría decenas de miles de millones de años —y no se supone que el universo sea tan viejo.

El mismo viejo problema había aparecido una vez más: sencillamente no parecía que hubiera *tiempo* suficiente para que un rasgo observado en el universo hubiera aparecido mediante procesos físicos bien entendidos. De modo que se sugirió una vía de escape. Quizá el universo tuvo una ventaja de salida. Quizá, al comienzo, la materia no era *completamente* lisa después de todo. ¿Podría haber estado ya parcialmente amontonada, de modo que la gravedad pudiera completar el trabajo con más rapidez? La pega era que una hipótesis semejante parecía extraordinariamente *ad hoc*. ¿Por qué debería empezar el universo precisamente con grumos de los tamaños y densidades correctos? Suponer que el universo simplemente «estaba hecho así» —exactamente con el grado correcto de acumulación primordial— era forzar la credulidad. Una dificultad más sería concernía a un conflicto con las observaciones. Si *hubiera* grumos en el universo primitivo, entonces deberían mostrarse como rizos característicos en la radiación térmica. Pero hasta que llegó COBE, esta radiación parecía ser completamente lisa.

Con desesperación creciente, los cosmólogos buscaron una salida. Una idea que ayudaba a aliviar el problema consistía en invocar la existencia de materia oscura. Los exámenes del cielo muestran materia luminosa, pero la materia que no brille será pasada por alto. Si el universo contiene también un montón de materia invisible, el material extra podría ampliar la potencia gravitatoria de los grumos y acelerar el proceso de acumulación. Esta teoría era ciertamente verosímil. Los astrónomos disponen de buena evidencia de materia oscura en el halo exterior de la Vía Láctea, y también dentro de los cúmulos galácticos. Algunas estimaciones sitúan la cantidad de materia oscura sustancialmente por encima de la materia visible. Los teóricos no tienen problemas en hacer una lista plausible de candidatos para lo que pudiera ser el material invisible: agujeros negros, estrellas oscuras, planetas, rocas, neutrinos, partículas subatómicas desconocidas fabricadas en el big bang. Sin embargo, no basta con reunir un cóctel aleatorio de objetos y esperar que salga lo mejor: tiene que ser el tipo correcto de materia oscura para que haga el trabajo adecuadamente. Necesitamos explicar la magnitud observada de acumulación y su variación sobre diferentes escalas de tiempo. Por ejemplo, un tipo particular de materia oscura o invisible podría dar lugar a una gran acumulación en la escala de algunos millones de años-luz y muy poca sobre miles de millones de años-luz; o viceversa. Los detalles tienen que encajar.

Los astrónomos dividen sus candidatos a materia oscura en «calientes» y «fríos». Materia oscura caliente significa partículas ligeras, tales como neutrinos, que seguirían moviéndose muy rápidamente mientras el universo se enfriaba. Materia oscura fría se refiere a cosas pesadas como agujeros negros o estrellas oscuras, que se moverían lentamente. Se utilizaron ordenadores para simular la evolución del universo desde sus comienzos lisos en presencia de varios tipos de materia oscura caliente y fría. Después de ejecutar muchos programas, la materia oscura caliente no parecía funcionar, de modo que el interés

se desplazó a la materia oscura fría. Pero ésta tampoco cuadraba las cuentas. Funciona bastante bien a escalas pequeñas, pero peor a escalas grandes. Jim Peebles, el destacado cosmólogo de Princeton, que tuvo su parte en el descubrimiento original de la radiación térmica de fondo, fue inequívoco: «La materia oscura fría ha muerto», dijo.¹ Otros empezaron a pensar lo impensable: ¿había quizá algo fundamentalmente erróneo en la teoría estándar del big bang?

¿Tuvo lugar alguna vez el big bang?

Los astrofísicos que hoy sostienen la idea de que el «problema cosmológico final» ha quedado más o menos resuelto podrían encontrarse con algunas sorpresas antes de que acabe el siglo.

JAYANT NARLIKAR

La dificultad de la escala de tiempo nunca ha estado muy oculta en cosmología, y los problemas acerca del lento crecimiento de la estructura cósmica atrajeron pronto comentarios de los oponentes de la teoría del big bang. Recordará usted que la datación del big bang se basa en la utilización del desplazamiento hacia el rojo de galaxias lejanas para dar una medida de la velocidad de expansión del universo. La hipótesis de que el desplazamiento hacia el rojo proporciona, en promedio, un indicador fiable de la velocidad de expansión remite directamente a Hubble. Pero ¿podría ser errónea esta interpretación del desplazamiento hacia el rojo en términos de una recesión sistemática de las galaxias? Después de todo, se conocen otros mecanismos que producen un desplazamiento hacia el rojo, tales como el campo gravitatorio de una masa concentrada. Y ¿quién sabe qué nueva física podría aplicarse bajo condiciones físicas exóticas y extremas?

Algunos astrónomos disidentes han recopilado diligentemente durante muchos años ejemplos de desajustes astronómicos, galaxias y cuásares que parecen desafiar la interpretación estándar del desplazamiento hacia el rojo. El principal disidente es Halton Arp del Instituto Max Planck de Astrofísica en Munich, Alemania. Ha recibido fuerte apoyo del astrónomo teórico británico Fred Hoyle, el de la vieja teoría del estado estacionario, y de sus colegas indio y norteamericano Jayant Narlikar y Geoffrey Burbidge. La esencia de la afirmación de Hubble de que el universo está en expansión es la relación entre la distancia de objetos astronómicos y la magnitud de sus desplazamientos hacia el rojo: cuanto más lejano está un objeto, mayor es su desplazamiento hacia el rojo, en proporción directa. La validez de la «ley» de Hubble descansa en la existencia de un método bueno y seguro de determinar distancias. Para las galaxias cercanas los astrónomos pueden elegir estrellas variables cefeidas para proporcionar una vara de medir precisa, pero las galaxias más lejanas son demasiado débiles para permitir esto. Una guía aproximada la proporciona el brillo apa-

rente del objeto. Obviamente, cuanto más lejos está situado un cuerpo luminoso, más oscuro parecerá visto desde la Tierra. Pero para que este método funcione adecuadamente, usted necesita para empezar conocer el brillo intrínseco del cuerpo. Si un objeto es intrínsecamente oscuro, habrá una tendencia a sobrestimar su distancia.

Los astrónomos desarrollaron técnicas estadísticas para evitar sesgos de este tipo. En el caso de las galaxias normales, que son objetos bastante bien conocidas, los resultados parecen bastante correctos. Luego, en los años sesenta, se descubrieron nuevas clases de objetos, tales como los cuásares intensamente brillantes, o QSO, y galaxias con sus núcleos fuertemente convulsionados por procesos altamente energéticos. Dado que se encontró que estos objetos tienen desplazamientos hacia el rojo muy altos, la mayoría de los astrónomos concluyó que estaban situados a enormes distancias, «en el límite» del universo visible. No obstante, puesto que nadie sabía su brillo intrínseco, no había una manera fácil de determinar las distancias, de modo que faltaba la limpia relación entre distancia y desplazamiento hacia el rojo.

Hacia principios de los años setenta, Arp, Hoyle y compañía habían empezado a cuestionar abiertamente que los desplazamientos hacia el rojo de estos objetos inusuales se deban realmente a la recesión. Su desafío se basaba en el descubrimiento de que muchos QSO con alto desplazamiento hacia el rojo están situados en el cielo muy cerca de galaxias que tienen desplazamientos hacia el rojo muy pequeños. Si dos objetos con desplazamientos hacia el rojo muy diferentes están situados uno al lado del otro en el espacio, entonces la ley de Hubble pierde credibilidad y la base global de la moderna cosmología se viene abajo, incluyendo la expansión del universo y la fecha del big bang. Con apuestas tan grandes como esta, apenas sorprende que los cosmólogos reaccionaran con frialdad a las afirmaciones de Arp. La verdadera explicación de la discrepancia entre los desplazamientos hacia el rojo estaba, contraatacaban ellos, en alineamientos fortuitos. Dada una distribución aleatoria de objetos en un espacio tridimensional, cabe esperar que, aquí y allá, algún objeto lejano esté situado en la esfera celeste próximo a algún objeto mucho más cercano, de la misma forma que un árbol cercano puede estar alineado con una montaña lejana si se ven desde una perspectiva concreta. Con tantas galaxias, esto acabará por suceder a veces. De modo que la cuestión se redujo a una discusión sobre estadística. ¿Hasta qué punto es probable que una selección aleatoria de galaxias y QSO muestre x alineamientos al azar? ¿Cuán probable es que los astrónomos seleccionen inconscientemente objetos alineados en un campo disperso? Tras veinte años de debate, las dos partes siguen convencidas de sus posturas respectivas.

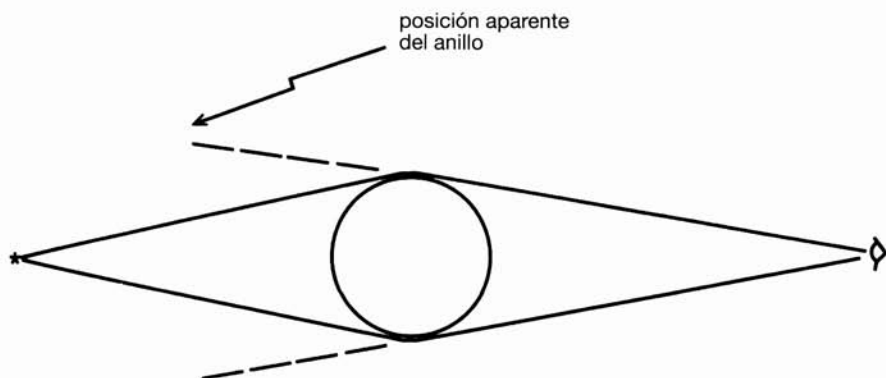
En 1971, Arp reforzó su argumento al descubrir un par de objetos —uno de ellos un QSO llamado Markarian 205, y el otro una galaxia espiral, NGC 4319— que parecían estar unidos por un tenue puente luminoso. Sin embargo, el análisis espectroscópico demostró que el cuásar tiene un desplazamiento ha-

cia el rojo mucho mayor. Si se hace la interpretación normal de identificar desplazamiento hacia el rojo con recesión, entonces la galaxia se está alejando a 1.700 kilómetros por segundo, y el QSO a unos 20.250 kilómetros por segundo. Arp argumentaba que el puente de materia luminosa que conectaba los dos objetos demostraba que estaban situados uno junto a otro en el espacio, y sugirió que el QSO había sido expulsado de algún modo de la galaxia, dejando una especie de estela.

Se encontraron otros ejemplos. Uno de éstos, conocido como el Quinteto de Stephan, es un cúmulo de galaxias muy apretado en el que parece como si los objetos se perturbasen gravitatoriamente uno a otro, algo que sólo puede suceder si están codo con codo en el espacio. Pero los desplazamientos hacia el rojo sugieren velocidades de recesión que van de 800 a 6.700 kilómetros por segundo. En otro caso, un puente luminoso une la galaxia NGC 7603 —con una velocidad de recesión aparente de 8.800 kilómetros por segundo— con un vecino más pequeño con desplazamiento hacia el rojo alto —velocidad de recesión aparente de 16.900 kilómetros por segundo. Luego hay tres QSO alineados cerca del centro de la galaxia espiral NGC 1073, y otros tres próximos a NGC 3842.

Arp y sus colegas insisten en que estas asociaciones son físicas y no meramente alineamientos geométricos casuales. Afirman que los QSO están siendo expulsados desde galaxias relativamente próximas, y que sus desplazamientos hacia el rojo no pueden ser encajados en el esquema de Hubble y no son debidos a la expansión del universo. Para apoyar la hipótesis de la expulsión señalan algunos casos en los que los QSO están ensartados en líneas rectas, o están alineados paralelos a chorros procedentes de galaxias asociadas. En una serie de artículos recientes proponen un abandono total de la teoría del big bang y una vuelta a una variante del viejo modelo del estado estacionario en el que no hay origen del tiempo.

Los astrónomos a la defensiva han tratado de contrarrestar estas ideas apelando a un fenómeno conocido como lente gravitatoria. Una de las predicciones claves de la teoría de la relatividad general de Einstein es la curvatura de la luz por un cuerpo masivo. Como se mencionó en el capítulo 4, Einstein predijo que el Sol debería curvar ligeramente los rayos de luz de las estrellas, un efecto confirmado por Eddington en 1919. Inmediatamente después, sir Oliver Lodge señaló que, si una fuente luminosa estuviera exactamente detrás de un objeto masivo, entonces la luz procedente de la fuente lejana se curvaría para rodear el objeto interpuesto y se concentraría en una línea (véase la figura 6.1). Un observador situado en la línea vería un anillo brillante de luz en torno al objeto oculto, lo que se conoce como un «anillo de Einstein». En los años treinta, Einstein investigó esta idea por sí mismo, pero la desechó como algo de interés exclusivamente teórico sin que hubiera esperanzas de detectarlo nunca. Estaba equivocado. Ahora se conocen ejemplos de galaxias y QSO lejanos que sufren el efecto de lente por galaxias próximas, produciendo imágenes múltiples y, en



6.1. Anillo de Einstein. La luz procedente de una estrella lejana puede ser enfocada por la gravedad de un objeto masivo interpuesto (estrella o galaxia), y se presenta al observador como un anillo de luz.

algunos casos, creando todo o parte de un anillo de Einstein. El efecto de enfoque hace también que la fuente de luz lejana parezca mucho más brillante.

El efecto de lente gravitatoria puede ser producido por cualquier objeto, desde galaxias a estrellas enanas, planetas o incluso asteroides. En 1993, un equipo de astrónomos norteamericanos y australianos en el Observatorio del Monte Stromlo en Nueva Gales del Sur informó de la observación de un insólito efecto de lente gravitatoria. Estaba causado por una estrella enana invisible situada en el halo de nuestra galaxia e interpuesta entre la Tierra y una estrella normal en la Gran Nube de Magallanes. Los astrónomos vieron que el brillo de la estrella aumentaba durante varios días. Conjeturaron que existen muchas estrellas invisibles semejantes en nuestra galaxia y en otras, que contribuyen a la materia oscura del universo que he mencionado antes. De vez en cuando, una estrella invisible también provoca el efecto de lente en un QSO muy oscuro y distante. Cuando esto sucede, el QSO aparecerá mucho más brillante, dando la impresión de que está muy próximo a nosotros. Esto podría explicar alguna de las discordancias de Arp. Pero no está claro que tales efectos expliquen todas las asociaciones entre galaxias y QSO, y menos aún la existencia de «puentes» entre objetos con diferentes desplazamientos hacia el rojo.

Mientras el debate sobre los desplazamientos hacia el rojo permanece vivo, siguen acumulándose otros elementos singulares de evidencia que desafían la teoría ortodoxa del big bang, tales como el descubrimiento de más objetos que parecían ser más viejos que el universo, y algunas curiosas observaciones que sugerían una periodicidad a gran escala en la distribución de las galaxias. La acumulación de dificultades impulsó al físico norteamericano Eric Lerner a escribir un libro provocativamente titulado *The Big Bang Never Happened* (El big bang nunca existió), publicado a finales de 1991. Pocos meses después se

descubrieron los rizados de COBE, y de repente la teoría del big bang volvió firmemente a seguir su andadura.

¿Qué son unos pocos miles de millones de años entre amigos?

Por fin COBE revelaba las cruciales irregularidades primordiales necesarias para desencadenar el crecimiento de acumulaciones galácticas. No es extraño que se descorcharan botellas de champán. Al mismo tiempo que las noticias de prensa de la NASA reverberaban por todo el globo, los circuitos del correo electrónico zumbaban cuando los científicos excitados trataban de hacerse con los datos técnicos. Los indicadores clave estarían enterrados en los detalles finos. COBE cosechó sus datos comparando la temperatura de la radiación en diferentes direcciones del espacio, y construyó un mapa de manchas calientes y frías en el cielo. La causa de las variaciones de temperatura es el efecto del desplazamiento gravitatorio hacia el rojo creado por la gravedad de las acumulaciones de gas. Las manchas frías en el cielo son, por lo tanto, distorsiones del tiempo efectivamente creadas por agregaciones colosales de materia primordial. Muy pronto los cosmólogos empezaron a referirse a los rizados como «arrugas en el tiempo».

Estaba claro desde el principio que la magnitud de las variaciones de temperatura (aproximadamente treinta millonésimas de grado) era en promedio la misma sobre todo el intervalo angular examinado —aproximadamente de nueve grados hacia arriba. Esto tenía una consecuencia importante. No se manifestaba ninguna escala de tamaño especial: tan pronunciados eran los rizados de gran tamaño como los rizados de pequeño tamaño. La independencia de escala de los rizados deleitó a muchos teóricos, porque encaja exactamente con lo que esperan de su variante favorita de la teoría del big bang. Conocida como la «teoría del universo inflacionario», postula que inmediatamente después del big bang el efecto de frenado gravitatorio normal (recuérdese la figura 5.1) se interrumpió brevemente, y el universo saltó abruptamente en tamaño (se infló) en un factor enorme. Una consecuencia de la inflación sería borrar cualquier irregularidad inicial, en todas las escalas de longitud, dejando el liso universo prístino. Los rizados encontrados por COBE habrían sido presumiblemente añadidos después de la inflación, quizá como resultado de fluctuaciones cuánticas, y no tendrían ninguna escala de longitud preferida —exactamente lo que encontró COBE.

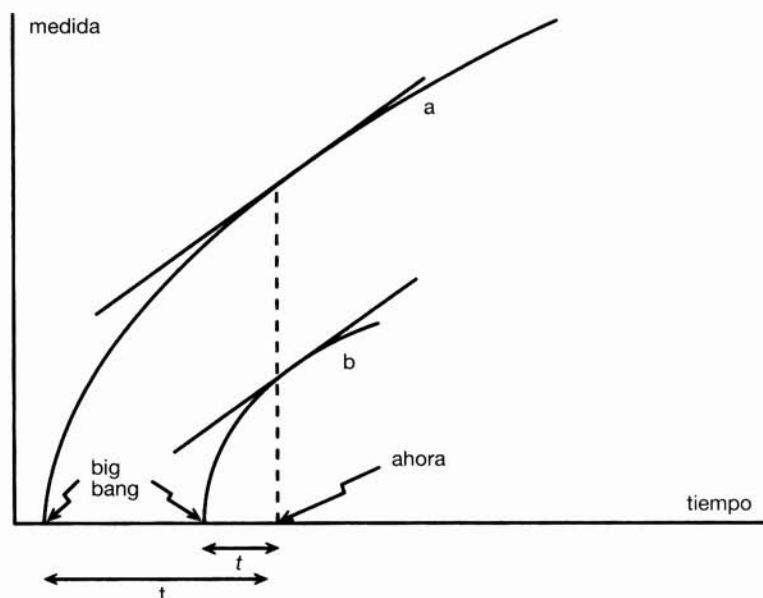
Sin embargo, la ausencia de una escala de longitud tenía otra implicación, esta vez concerniente a la edad del universo. Aquí el mensaje no era tan bueno. En el capítulo 5 expliqué que las ecuaciones de campo de Einstein predicen muchos modelos cosmológicos posibles. El trabajo del cosmólogo consiste en utilizar los hechos observacionales para seleccionar el modelo concreto que mejor ajuste. Los diversos modelos ofrecidos difieren en la forma precisa en que se

expande el universo a partir de su origen en el big bang. La tendencia general se ha presentado en la figura 5.1, que muestra cómo crece con el tiempo el tamaño de una región típica del universo. Nótese cómo la curva empieza verticalmente en el tiempo cero, correspondiente al origen explosivo, y se curva continuamente a medida que el frenado gravitatorio hace más lenta la expansión. La velocidad de expansión actual, deducida a partir de los datos del desplazamiento hacia el rojo, viene dada por la pendiente de la curva en la época presente, marcada «ahora». La edad del universo es la distancia sobre el eje X desde el comienzo de la curva hasta «ahora».

Para estimar la edad del universo, usted tiene que conocer dos cosas: la velocidad actual de expansión y la magnitud del efecto de frenado. Para ver por qué se necesitan *ambas* magnitudes, observemos la figura 6.2. La curva *a* muestra un universo que se frena débilmente, y la curva *b* una versión que se frena fuertemente. Nótese que la deceleración extra en *b* se manifiesta en la curvatura más pronunciada de la línea. Para un valor dado de la pendiente (es decir, la velocidad de expansión), es evidente que la curva *b* predice un universo mucho más joven que la curva *a*. La intensidad del frenado está determinada por la cantidad de materia en el universo. Cuanta más materia hay, más fuerte es su atracción gravitatoria y más se frena la velocidad de expansión. Como he mencionado, la cantidad de materia en el universo no es muy bien conocida. Aparentemente existe mucha materia oscura, pero los astrónomos no pueden ponerse de acuerdo en la cantidad exacta.

Oculto en estas gráficas está la historia de una lucha titánica entre la fuerza de gravedad, que trata de atraer a las galaxias que se apartan, y el impulso del big bang. La gravedad disminuye con la distancia, de modo que cuanto más se expande el universo, menos frenado hay. Por el contrario, la velocidad de expansión está disminuyendo continuamente. Si hay suficiente materia invisible en el universo (aproximadamente cien veces la cantidad de materia visible), la atracción gravitatoria combinada llegará a detener la expansión por completo y la transformará en un colapso. Por el contrario, si hay bastante menos materia, entonces la batalla será ganada por la expansión: en alguna etapa, las galaxias quedarán esencialmente liberadas de la restricción gravitatoria y se expandirán más o menos libremente a partir de entonces. En cualquier caso, habrá un «momento de la verdad» en el que se decide el resultado. En el caso del colapso, éste será la época en el que el universo alcance su máximo tamaño. Si la expansión continúa para siempre, será el momento en que el efecto de frenado se haga despreciable.

La existencia de un «momento de la verdad» concreto introduce un tiempo característico en la descripción del universo: el momento de decisión. Asociada con este tiempo habrá una escala de longitud característica: la distancia que la luz ha viajado entre el big bang y dicha época especial. Pero si el universo tiene incorporada una escala de longitud especial, esa longitud debería manifestarse en los rizados de COBE con el correspondiente tamaño angular. Pero no



6.2. Frenando el universo. Las curvas *a* y *b* comparan el comportamiento de universos con una densidad de materia baja y alta respectivamente. El modelo *b* se decelera más intensamente, debido a la mayor gravedad. Para una pendiente dada de la curva en el instante ahora (determinada por la velocidad de expansión actual), el tiempo *t* que ha transcurrido desde el big bang es mayor en *a* que en *b*.

se observa tal escala de longitud: el grado de irregularidad es el mismo en todas las escalas. ¿Por qué?

Una respuesta surge inmediatamente. Los dos escenarios recién resumidos —expansión libre y colapso— se mezclan en un caso límite para el que la atracción gravitatoria se debilita en proporción exacta a la disminución del impulso de la expansión. En otras palabras, la lucha antes mencionada está siempre equilibrada. Si el universo es así, la batalla no terminará nunca, lo que quiere decir que el universo se expandirá para siempre, aunque a una velocidad siempre decreciente. Esta situación a mitad de camino era, dicho sea de paso, el modelo que Einstein apoyó eventualmente después de conocer la expansión cosmológica. Hoy se denomina el «universo Einstein-de Sitter». Puesto que la batalla no tiene fin, el «momento de la verdad» queda pospuesto indefinidamente, de modo que no hay escala de tiempo ni escala de longitud características en la teoría. El modelo Einstein-de Sitter predice que las fluctuaciones de COBE deberían mostrar independencia de escala, exactamente como se observa. Afortunadamente, el modelo Einstein-de Sitter también se necesita en la versión más simple de la teoría inflacionaria.

Pero ahora tropezamos con una pega. Un problema del modelo Einstein-de Sitter es que da lugar a un frenado bastante mayor que el que la mayoría de los astrónomos desearía. En consecuencia, la edad inferida del universo se hace desagradablemente corta una vez más. Si tomamos un valor plausible para la velocidad de expansión del universo, el tiempo calculado a partir del big bang sólo es de aproximadamente 10.000 millones de años. Pero como he explicado ya en el capítulo 5, se conocen estrellas con edades de al menos 14.000 millones de años. Observaciones recientes han aumentado realmente esta cifra: es probable que las estrellas próximas a los centros de las galaxias grandes sean 1.000 o 2.000 millones de años más viejas que las que se encuentran en los cúmulos globulares. A veces se citan edades que llegan hasta los 17.000 millones de años, y una noticia reciente procedente de California sugiere que ahora se ha descubierto una estrella con una edad de 19.000 millones de años. Evidentemente algo va mal.

El problema de la edad deriva del hecho de que la velocidad de expansión del universo es «demasiado» alta: cuanto más rápidamente se expande el universo, más recientemente ha debido estar en su estado de big bang comprimido. La tasa de expansión se expresa en términos de velocidad dividida por la distancia. El propio Hubble le dio el valor de 540 kilómetros por segundo por megaparsec. (Un parsec es una unidad astronómica de distancia, igual a 3,26 años-luz.) Esta cifra significa que una galaxia a 10 megaparsecs de distancia se aleja a 5.400 kilómetros por segundo, mientras que una que está situada a 100 megaparsecs se aleja a 54.000 kilómetros por segundo, y así sucesivamente. Salvo que Hubble hiciera mal sus cuentas, como hemos visto. Un habilidoso y aplicado discípulo de Hubble, Allan Sandage, ha dedicado toda su vida a medir la velocidad de expansión. Muchos consideran a Sandage el astrónomo norteamericano por excelencia y el heredero natural de Hubble. Durante muchos años, él ha citado el valor de 50 kilómetros por segundo por megaparsec. Por desgracia, otro grupo de astrónomos, encabezado por el astrónomo de origen francés Gérard de Vaucouleurs* de la Universidad de Texas en Austin, discute ardorosamente esta cifra, y cita el valor mucho más alto de 100. La diferencia aquí es crucial. Si 50 es correcto, la edad de un universo de Einstein-de Sitter es de aproximadamente 13.000 millones de años. Quizá los astrónomos se han excedido algo en sus investigaciones de las edades de las estrellas más viejas y éstas encajan precisamente en el tiempo disponible. Pero si 100 es correcto, el universo tendría simplemente 6.500 millones de años y la inconsistencia es flagrante.

Curiosamente, hasta épocas recientes pocos astrónomos se sintieron inclinados a tomar el promedio de los valores de Sandage y De Vaucouleurs, prefiriendo apuntarse a un bando o al otro. Pero algunos análisis cuidadosos de

* Gérard de Vaucouleurs murió en Octubre de 1995, cuando ya se había publicado la edición inglesa de este libro. (N. del t.)

los datos han obtenido ahora valores en torno a 70 u 80. Esto todavía no encaja muy cómodamente con las edades de las estrellas si el modelo de Einstein-de Sitter es correcto. (Para 80, la edad calculada es un poco mayor de 8.000 millones de años.) Una vez más, parece que se nos impone la absurda conclusión de que la edad del universo es menor que la de alguno de sus componentes.

¿Qué significa esto? Algunos cosmólogos afirman que esto arroja dudas sobre la teoría del big bang en general. Su fracaso en un test crucial como este, dicen ellos, es decisivo y deja la puerta abierta para una reconsideración fundamental de la cosmología física. Después de todo, ¿son reales estos desplazamientos hacia el rojo discrepantes? ¿No será el tiempo cósmico diferente del tiempo terrestre, como Milne sugirió hace tiempo? ¿Quizá el big bang no sucedió después de todo, y el universo es infinitamente viejo?

En cualquier caso, estos rebeldes son una pequeña minoría. La mayoría de los científicos prefieren esperar y ver si se revisan los datos de la velocidad de expansión o de vida media estelar. Otros rechazan el escenario inflacionario, y piensan que es demasiado pronto para sacar muchas conclusiones de los datos de COBE. Antes de emitir un juicio quieren esperar hasta que esta información se complemente con observaciones, hechas desde tierra, de rizos en escalas angulares menores. Pero hay un aire inequívoco de incomodidad en torno al problema de la edad. Los astrónomos claramente prefieren no pensar sobre el tira y afloja necesario para comprimir 15.000 millones de años en 10.000 millones. Comentando recientemente la discrepancia de la escala de tiempo, Arp, Hoyle y colegas observaban: «Por alguna razón no se está discutiendo, pero, en términos de factores numéricos, el problema para el big bang ha vuelto de nuevo».²

Hay, sin embargo, un modo simple de mantener la teoría del big bang inflacionario y cuadrar todos los números, acomodando sin problemas los datos de COBE y los valores más embarazosos de la constante de Hubble. Esta mezcla feliz puede conseguirse convirtiendo el mayor error de Einstein en su mayor triunfo.

Un problema repulsivo

Fuera con el término cosmológico...

ALBERT EINSTEIN

En el capítulo 5 he explicado cómo Einstein, después de establecer sus bellas ecuaciones del campo gravitatorio en 1915, las «empaño» añadiendo un término extra: el término cosmológico o término Λ . Más tarde llegaría a lamentar amargamente este paso. En primer lugar, le arrebató la oportunidad de predecir la expansión del universo. En segundo lugar, el término extra olía a amaño. En realidad, Λ llegó a conocerse como el «factor amañado de Einstein», indig-

no de una teoría tan elegante y terriblemente poderosa como la relatividad general e impropio de un hombre de gustos tan puristas.

Inspirándose en el gran hombre, los científicos en general han tendido a considerar el término Λ tan repulsivo como la fuerza que describe. En parte esto es una reacción al espectacular giro de ciento ochenta grados de Einstein, y en parte se debe a la navaja de Ockham. ¿Por qué añadir un término extra a un conjunto de ecuaciones que ya es bastante exigente? Sólo sirve para multiplicar la elección de modelos cosmológicos ofrecidos y oscurece la interpretación de las observaciones astronómicas.

Hay otra razón por la que los científicos deberían hacer Λ igual a cero. Las observaciones cosmológicas limitan el tamaño de Λ a un valor muy pequeño. Como describí en el capítulo 5, una fuerza Λ es extraordinariamente débil para cualquier estándar: varios órdenes de magnitud más débil que cualquier otra cosa conocida. Muchos físicos sueñan que las diversas fuerzas de la naturaleza —gravitación, electromagnetismo y fuerzas nucleares— se combinarán un día en una teoría de campo unificado del tipo que Einstein trató heroicamente de construir en sus últimos años. Es difícil ver cómo una teoría semejante pudiera predecir una fuerza mucho más débil que todas las demás.

Stephen Hawking ha presentado un elegante argumento siguiendo estas líneas.³ Para cuantificar hasta qué punto es débil la fuerza Λ , debemos compararla con algo. Una forma conveniente de hacer esto es en términos del alcance en el que la fuerza se deja sentir. Como se ha explicado, la fuerza Λ es ciertamente despreciable a distancias menores que algunos miles de millones de años-luz. Cuanto más débil es la fuerza, mayor es el alcance en que se manifiesta. Si la fuerza es cero, el alcance es infinito. Uno puede también discutir el alcance de la fuerza electromagnética más familiar, pero en este caso las cosas van «de atrás hacia adelante». Como ya he señalado, la fuerza Λ es inusual porque se hace *más fuerte* con la distancia en lugar de hacerse más débil. Por el contrario, la fuerza electromagnética disminuye con la distancia, de modo que una medida de su alcance es la distancia *más allá* de la cual se hace despreciable.

Las observaciones de los campos magnéticos de las galaxias sugieren que los efectos electromagnéticos se extienden sobre al menos un millón de años-luz, pero poco se conoce sobre distancias mayores que ésta. Es *posible* que la fuerza electromagnética desaparezca abruptamente a, digamos, 1.000 millones de años-luz de su fuente, pero casi ningún físico cree esto. Argumentan que, dado que ya se conoce que el alcance es tan grande, realmente debería ser *infinitamente* grande, pues resulta difícil imaginar cómo podría entrar en las leyes básicas del electromagnetismo una distancia fundamental tan grande como 1.000 millones de años-luz. Antes que conceder sin más que el alcance de la fuerza electromagnética es cierta cantidad desconocida mayor que un millón de años-luz, los físicos apelan a un principio de simetría matemática (denominada «simetría gauge») que *fija* el alcance como verdaderamente infinito. Esta bella simetría, implícita ya en las ecuaciones electromagnéticas de Maxwell, también

sirve para hacer el electromagnetismo simple y elegante. Comparemos ahora la situación de la teoría electromagnética con la de la repulsión cosmológica. Se sabe que el alcance de la fuerza Λ es mucho mayor que un millón de años-luz. Si se adoptara el mismo razonamiento que antes, deberíamos argumentar que este alcance debería ser infinito y buscar un profundo principio de simetría matemática —afín a la simetría gauge electromagnética— que automáticamente fije que Λ sea *estrictamente* cero. Por desgracia, nadie ha descubierto todavía cuál es esta simetría.

Otro argumento para un valor estrictamente cero de Λ procede de un estudio de teorías que intentan unificar las fuerzas nucleares y la electromagnética. Incluso si estas otras fuerzas no tienen relación directa con la gravitación, casi todas las teorías unificadas contienen procesos físicos que remedan una fuerza Λ . En otras palabras, una fuerza cósmica aparece como un inevitable resultado de las otras fuerzas de la naturaleza. El problema es que la magnitud de este resultado es verdaderamente tremenda: el valor típico es 10^{120} veces superior al valor que han buscado los cosmólogos. Si existiera una fuerza semejante con esta enorme intensidad, ¡haría estallar el universo en menos de un microsegundo!

La existencia de una fuerza cósmica enorme en estas teorías unificadas entraña una grave dificultad. Una sugerencia acerca de cómo puede ser evitada consiste en suponer que muchos procesos físicos diferentes actúan para crear fuerzas tipo Λ , pero algunos de ellos producen valores negativos de Λ . Es entonces posible imaginar una cancelación entre contribuciones negativas y positivas, dando un valor neto nulo. Este tipo de cancelación exacta ya es conocido en física. Por ejemplo, existe una profunda simetría subyacente en la naturaleza respecto a la carga eléctrica: por cada carga positiva en el universo, hay una carga negativa que la compensa. No es demasiado difícil creer que haya una simetría de este tipo aplicada a Λ oculta en las leyes básicas de la naturaleza. Mucho más difícil de tragar, sin embargo, sería la hipótesis de que esta cancelación de valores positivos y negativos es casi pero no completamente exacta, de modo que queda una minúscula cantidad positiva. Aritméticamente, esto implica que los términos positivos y negativos se neutralizan hasta la absolutamente sorprendente fidelidad de 10^{119} , pero dejan de equilibrarse perfectamente por un desajuste tan pequeño como una parte en 10^{120} . ¿Podemos creer realmente que la naturaleza hiciera esto?

En sus intentos para eliminar Λ , los físicos teóricos han manejado diversas ideas. Una de éstas consiste en tratar el término Λ como si describiera un tipo de campo independiente, con su propia dinámica. Aplicando la mecánica cuántica a dicho campo se ha llegado a la conclusión de que el valor más probable está realmente muy cerca de cero.

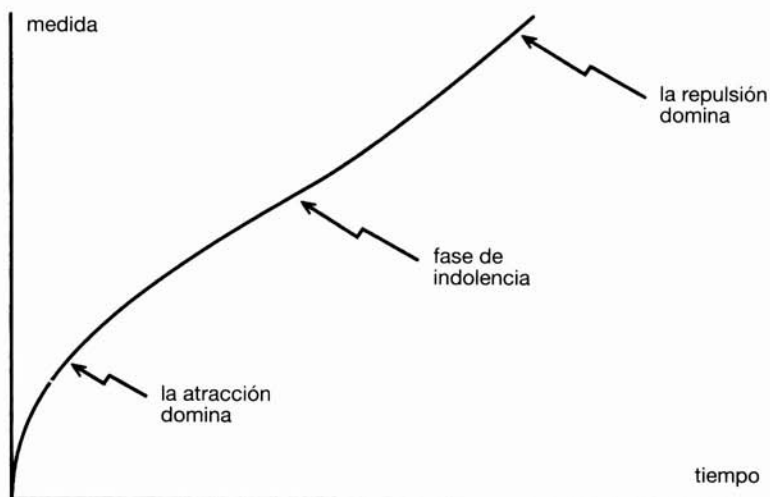
Por sugestivos que estos diversos cálculos y argumentos puedan ser, no han ganado una aceptación universal, y los físicos colocan «el problema de la constante cosmológica» en los primeros lugares de la lista de misterios científicos sobresalientes. ¿Por qué es un problema? Porque la mayoría de los físicos pre-

ferirían no tener una constante cosmológica, pero falta un argumento científico convincente para hacer Λ igual a cero. En ausencia de un argumento a favor de que Λ *debe ser* cero, ciertamente no podemos descartar un término cosmológico. El físico y cosmólogo norteamericano Stephen Weinberg señala que la naturaleza tiene tendencia a producir todas aquellas cosas que no están explícitamente prohibidas por un principio de simetría u otra forma de ley. «No hay razón para *no* incluir una constante cosmológica en las ecuaciones de campo de Einstein», mantiene.⁴

El universo indolente

No todos los cosmólogos han despreciado la constante cosmológica. Eddington, al menos, la acogió positivamente. Junto con Georges Lemaître, propuso un modelo de big bang del universo que contenía una fuerza Λ . El término cosmológico no supone virtualmente ninguna diferencia en la primera fase comprimida del universo, porque la fuerza Λ es muy débil a corta distancia. Sin embargo, a medida que el universo se expande, la repulsión gana en intensidad, y esto tiene el efecto de contrarrestar la atracción normal de la gravedad. Así como la gravedad normal actúa como un freno para la expansión, el término Λ actúa más bien como un acelerador, obligando al universo a expandirse más rápidamente. Al principio domina el efecto de frenado, de modo que la velocidad de expansión se decelera de la forma normal, pero a medida que el universo se hace más grande, la competencia entre estas fuerzas opuestas se hace más igualada. Finalmente se alcanza un estado en el que las fuerzas se neutralizan mutuamente y el universo duda, inseguro de si acelerarse o frenarse. El resultado es que empieza a «dejarse llevar» —es decir, se expande a una velocidad casi uniforme. No obstante, esta fase de indolencia no puede continuar indefinidamente, ya que la expansión continuada dará finalmente la última baza a la repulsión. Lenta pero inexorablemente, el universo empieza a acelerarse en su expansión, con la fuerza Λ en continuo aumento. La situación que existía poco después del big bang queda por consiguiente invertida, con una fuerza atractiva de la gravedad que se desvanece para dar paso a un universo dominado por la repulsión. Como consecuencia de esta victoria incontrolada, el universo sigue expandiéndose para siempre, haciéndose más y más grande a un ritmo acelerado.

El comportamiento general del modelo de Eddington-Lemaître se muestra en la figura 6.3, que debería contrastarse con el modelo Einstein-de Sitter ortodoxo mostrado en la figura 5.1. Siguiendo la curva a partir de la izquierda, vemos cómo el universo aumenta de tamaño constantemente, pero la gráfica empieza curvándose hacia la derecha y termina curvándose hacia la izquierda. En medio hay una sección aproximadamente recta: la fase de indolencia. La dura-

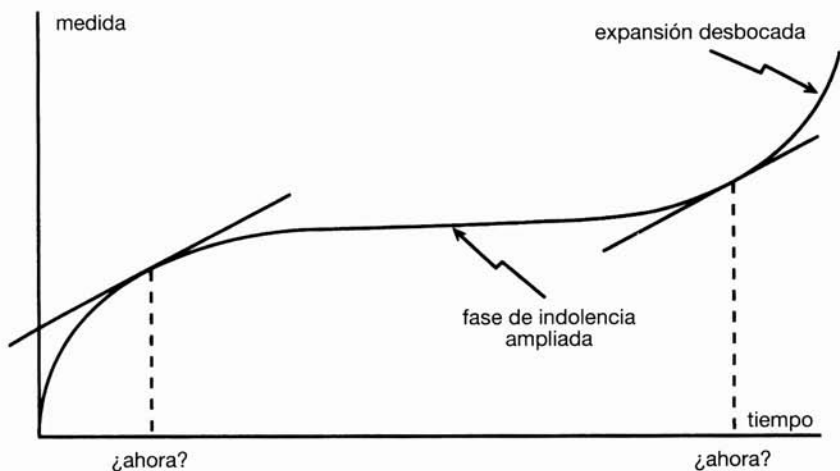


6.3. Universo indolente. Este modelo, propuesto por Eddington y Lemaître, incluye el efecto de un término de repulsión cosmológica. El universo se decelera lentamente, y tras una fase de expansión casi libre («indolencia») inicia una expansión acelerada.

ción de esta fase depende del valor escogido para Λ , pero puede hacerse tan larga como queramos mediante una elección cuidadosa.

El cambio de curvatura característico en la curva de la figura 6.3 contiene la clave del atractivo del modelo, pues aquí reside una solución inmediata al infame problema de la escala de tiempo. Esto es inmediatamente obvio en la figura 6.4, un caso deliberadamente exagerado en el que la constante cosmológica ha sido finamente ajustada para empalmar la atracción gravitatoria con alta precisión, produciendo una fase de indolencia muy larga. De hecho, la fase de indolencia se aproxima al modelo de universo estático original de Einstein, emparedado entre periodos de expansión decelerada y acelerada. Una ojeada muestra claramente que existen *dos* posibles posiciones en las que puede empalmarse a la figura 6.4 una línea recta con una pendiente dada, en contraste con el caso del modelo Einstein-de Sitter. El tiempo que ha transcurrido desde el big bang es obviamente mucho mayor si la pendiente se empalma en la posición del lado derecho que si lo hace en la del lado izquierdo. Si suponemos un periodo de indolencia suficientemente largo, la edad del universo puede extenderse indefinidamente.

Sin embargo, la curva tiene que ser consistente con las observaciones. Durante la fase de indolencia el universo se expande poco. Traducido en desplazamientos hacia el rojo, esto implica una acumulación de valores en el rango intermedio. En los años sesenta, los exámenes astronómicos de QSO dieron realmente con tal acumulación, pero datos mejores eliminaron el efecto. De for-



6.4. Cuando la atracción gravitatoria y la repulsión cósmica están más ajustadas, el universo permanece un tiempo mayor en su fase estacionaria. Un observador que mide una velocidad de expansión dada (pendiente de la curva) podría estar situado en una de las dos épocas, lo que lleva a estimaciones muy diferentes de la edad del universo.

ma más crítica, las observaciones de raros ejemplos donde los QSO distantes sufren el efecto de lente gravitacional por galaxias más cercanas pueden utilizarse para establecer límites estrechos a cuán recientemente el universo puede haber estado pasivo. Los resultados de estos estudios indican que cualquier fase de indolencia debe haber tenido lugar en una época muy temprana, cuando la fuerza Λ era aún muy débil. Pero puesto que la indolencia necesita equilibrar repulsión y atracción, la fuerza atractiva de la gravedad ordinaria debe haber sido también muy débil —es decir, tendría que haber muy poca materia en el universo—, mucho menos, de hecho, de lo que sugieren las observaciones. Por consiguiente, es poco probable que nuestro universo haya estado indolente un tiempo sustancial.

De todas formas, la existencia de una constante cosmológica siempre servirá para incrementar algo la edad del universo, por encima de la edad predicha por un modelo que tenga un valor nulo de Λ . Esto es así con o sin una fase de indolencia característica en el pasado, debido a la tendencia acelerativa. La razón se comprende fácilmente. Para alcanzar su actual tamaño y velocidad de expansión, el universo tuvo que expandirse rápidamente en el pasado para superar el efecto de frenado. Si el frenado fuera menor, el universo podría haber llegado a su estado actual con una expansión pasada menos rápida, pero una velocidad de expansión más lenta en el pasado implica que el universo ha durado más tiempo.

¿Qué pasa con COBE? La constante cosmológica actúa efectivamente como

otra forma de materia oscura, completando la masa del universo. Indudablemente también hay alguna materia oscura «ordinaria» ahí fuera, pero ya no es necesario suponer que al menos el 90 por 100 del material cósmico reside en una forma invisible desconocida. Es perfectamente posible tener un contenido total de materia de, digamos, sólo el 10 por 100 del valor de Einstein-de Sitter. Con una constante de Hubble de alrededor de 80 aún tendría una edad de 16.000 millones de años.

Un gran defensor del modelo de Eddington-Lemaître es el astrónomo de Oxford George Efstathiou, quien cree que resuelve limpiamente varios rompecabezas cosmológicos. En particular, él piensa que es posible dar cuenta del crecimiento de la estructura del universo a escalas a la vez pequeñas y grandes con sólo una modesta cantidad de materia oscura fría. En la reunión de la Real Sociedad Astronómica en Londres en 1993, Efstathiou presentó los resultados de observaciones detalladas, basadas tanto en tierra como en satélites, y las contrastó con modelos de ordenador del crecimiento de la acumulación con varios tipos de materia oscura. Mostró cómo modelos con un término Λ pueden ajustar todos los datos cómodamente.

Aunque el término cosmológico sigue siendo la forma más clara para resolver el problema de la edad cósmica, es demasiado pronto para dar un sí o no definitivo a la idea. Sin embargo, quizá no tarde mucho en llegar una respuesta. En 1990 un grupo de astrónomos japoneses y Edwin Turner de la Universidad de Princeton dieron independientemente con una nueva manera de medir Λ utilizando el efecto de lente gravitatoria de QSO. Puesto que un universo con un término cosmológico es más viejo, la luz procedente de QSO lejanos habrá estado viajando más tiempo, y así tendrá una mayor probabilidad de pasar cerca de una galaxia interpuesta y sufrir el efecto de lente. De este modo, un recuento del número de sucesos de tipo lente en el cielo puede ser utilizado para poner un límite al tamaño de Λ . Mi apuesta, en lo que pueda valer, es que las observaciones demostrarán finalmente la existencia de un término cosmológico. Seguramente representará la ironía suprema: a partir de un estudio de los anillos de Einstein, que el propio Einstein nunca creyó que fueran observables, los astrónomos habrían demostrado que el mayor error de Einstein fue, de hecho, su mayor triunfo.

En octubre de 1994 se anunciaron nuevos resultados sensacionales del Telescopio Espacial Hubble, que daban una constante de Hubble de aproximadamente 80. Algunos comentaristas infirieron una edad del universo de sólo 8.000 millones de años. La discrepancia con las edades estelares es ahora clamorosa, y la paradoja de la edad cósmica se ha introducido de nuevo en la agenda científica. Mientras que algunos cosmólogos empezaron a cuestionar el escenario estándar del big bang, un miembro del equipo Hubble, Barry Madore, sugirió que el término cosmológico podría tener un regreso. Él declaró al *Boston Globe*, «Einstein tuvo la respuesta en sus manos cuando formuló por primera vez la relatividad general».

El tiempo cuántico

Einstein decía que si la mecánica cuántica es correcta, entonces el mundo está loco. Bien, Einstein tenía razón. El mundo está loco.

DANIEL GREENBERGER

Tiempo para hacer un túnel

El ordenador CM5 de 1.024 nodos en la Universidad de Adelaida, supuestamente uno de los más rápidos del mundo, puede ejecutar 59.670 millones de instrucciones por segundo a velocidad máxima. Eso es mucho más rápido que la velocidad del pensamiento (para un ser humano). Puede que el CM5 no sea capaz de componer mejor que Mozart, enamorarse, o incluso puede no ser consciente de que es un as en computación, pero ciertamente puede hacer aritmética ágil.

Descompuesto en sus partes esenciales, un ordenador es una vasta red de interruptores y cables configurada para ejecutar rápidamente muchas tareas sencillas. Minúsculos pulsos eléctricos corren a través de los circuitos invisibles, intercambiando información frenéticamente. Complejas pautas de actividad eléctrica se mueven a través del hardware, y una miríada de microinterruptores se conectan y desconectan en silenciosa obediencia, regidos por las férreas reglas de la lógica.

En su búsqueda insaciable de una potencia de cálculo cada vez mayor, los científicos han construido circuitos e interruptores cada vez más rápidos. Poco a poco se están reorientando desde la electrónica hacia la fotónica —la utilización de luz en lugar de electricidad— para conseguir una rapidez extra. Pero más pronto o más tarde toparán contra una limitación fundamental en la velocidad propia de la naturaleza. El tiempo de Einstein impide que cualquier información viaje por la circuitería a mayor velocidad que la luz. Para un ordenador de un metro de tamaño, esto pone un límite de tres nanosegundos a la



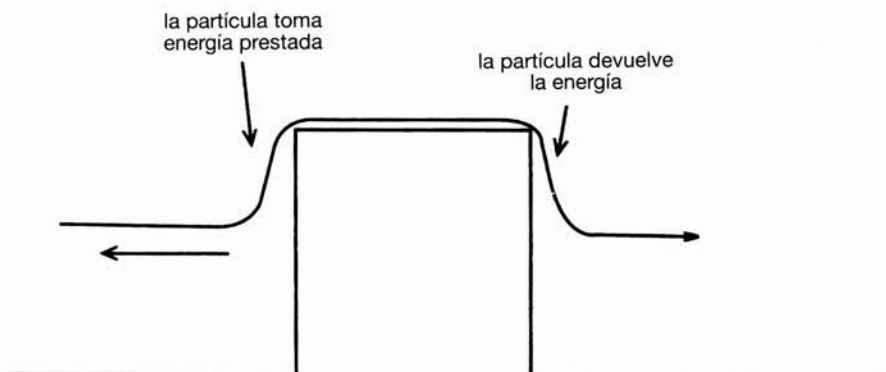
7.1. Efecto túnel a través de una barrera. Una corriente de partículas cuánticas procedentes del lado izquierdo encuentra una barrera. Algunas partículas rebotan, pero otras se materializan, mágicamente, en el lado opuesto de la barrera, y continúan su camino.

velocidad con que se transfiere la información a través de la máquina. Para evitar esto, los científicos de ordenadores han hecho sus componentes cada vez más pequeños. Pero ahora entramos en otro límite básico: la física cuántica. Los electrones y fotones individuales en una máquina computadora están sujetos al principio de incertidumbre de Heisenberg, que introduce una borrosidad irreducible en las mismas nociones de velocidad, tasa y tiempo.

Para apreciar el carácter espinoso de los problemas involucrados, consideremos uno de los procesos cuánticos más extraños utilizado ampliamente en dispositivos electrónicos prácticos. Se denomina «efecto túnel». Imaginemos que arrojamamos suavemente una piedra contra una ventana. Usted espera que la piedra rebote hacia atrás. Supongamos que, en lugar de rebotar en la ventana, la piedra la atraviesa y aparece en el lado contrario ¡dejando la ventana intacta! Cualquiera que vea que una piedra atraviesa una ventana sin romperla concluirá que ha sucedido un milagro, pero este milagro particular ocurre continuamente en el dominio subatómico, donde las reglas cuánticas desafían al sentido común.

En el nivel atómico, el papel de la piedra lo juega una partícula cuántica —digamos, un electrón o un fotón— y la ventana podría ser algún tipo de barrera delgada, quizá una lámina de material o simplemente un invisible campo de fuerza. Una partícula que se acerque a una barrera semejante sin energía suficiente para romperla se encontrará a veces en el otro lado, habiendo «hecho un túnel» aparentemente a través de la barrera (véase la figura 7.1).

El principio de incertidumbre de Heisenberg ofrece una clave para el truco del túnel. Como se dijo en el capítulo 3, la energía de una partícula cuántica no puede medirse con precisión total en un instante especificado. Usted puede llegar a un compromiso entre la incertidumbre en la energía y la incertidumbre en el tiempo, pero nunca eliminará ambas indeterminaciones simultáneamente: la naturaleza no nos permitirá conocerlo todo sobre una partícula cuántica a la vez. Una manera cruda pero útil de considerar esta difuminación de la ener-



7.2. Energía prestada. Según una vaga interpretación del principio de incertidumbre de Heisenberg, una partícula cuántica puede «tomar prestada» energía para ayudarse a superar la barrera. La energía debe ser devuelta rápidamente en el lado opuesto. Este es un eficaz ejemplo del efecto túnel.

gía y el tiempo consiste en imaginar que la partícula es mágicamente capaz de cambiar su energía (dentro de un intervalo estrictamente limitado) durante una corta duración. En efecto, la energía de la partícula puede saltar espontáneamente dentro de los límites establecidos por el principio de incertidumbre. A veces se dice que la partícula puede «tomar prestada» energía para este plazo fijo. El punto principal a señalar es que, cuanto más corto es el plazo del préstamo, mayor es el tamaño permitido; un electrón, por ejemplo, puede tomar prestada mucha energía durante un tiempo muy corto, o poca energía durante un tiempo algo mayor.

Para explicar el efecto túnel utilizando la incertidumbre energía-tiempo suponemos que a la partícula se le permite «tomar prestada» la energía con el objetivo de superar la barrera. Provista de este pagaré, la partícula puede entonces avanzar sin trabas, de la misma forma que un caminante debilitado llevado en teleski a lo alto de una montaña puede atravesar la cumbre (véase la figura 7.2). La pega es que la partícula cuántica está viviendo a un alto nivel con energía estrictamente prestada. Si no puede llegar al otro lado de la barrera y bajar de nuevo antes de que el préstamo sea reclamado perentoriamente, se verá obligada a volver. Tales partículas simplemente retroceden desde la barrera, tras haber penetrado en ella una corta distancia. Aunque la *máxima* duración del préstamo está establecida por ley, los arreglos concretos para cada partícula individual se deciden por una especie de lotería natural, y pueden quedarse muy cortos respecto a lo que se necesita para franquear la barrera. El proceso tiene, por lo tanto, un carácter fundamentalmente estadístico. Sólo una cierta fracción de las partículas la atraviesa, y no es posible saber por adelantado cuáles lo harán y cuáles tendrán que volver. Parte del trato, no obstante, es que cuanto

más ancha es la barrera, menos éxito tendrán las partículas en penetrarla —es decir, mayor es la fracción de partículas que rebotarán.

Cuando se descubrió por primera vez el efecto túnel hace varias décadas, una pregunta obvia era: ¿cuánto *tiempo* tardan las partículas en atravesar la barrera? Usted podría pensar que la presencia de una barrera frenaría las partículas. Estas serían malas noticias para los ordenadores de alta velocidad. Ciertamente, si las partículas se disparan con suficiente energía inicial para rebasar la barrera sin necesidad de un préstamo de Heisenberg (lo que corresponde a arrojar la piedra con bastante fuerza para romper la ventana), son de hecho frenadas. Pero cuando las partículas cuánticas penetran en la barrera por el mecanismo del efecto túnel, el razonamiento simple falla, y todavía no hay acuerdo en la respuesta.

De hecho, hay buenas razones para creer que la barrera tiene la virtud de hacer que las partículas que la atraviesan por el efecto túnel viajen *más rápidas*. Después de todo, cada partícula tiene una deuda que saldar, y la máxima duración del préstamo está fijada con completa independencia de la anchura de la barrera. Para barreras anchas, la partícula tiene que moverse mucho más rápidamente para llegar al otro lado a tiempo para saldar la deuda. Aparentemente, si se hiciera una barrera suficientemente ancha, la partícula tendría que moverse más rápida que la luz para atravesarla en el tiempo permitido. Esta es una posibilidad intrigante. Por desgracia, la fracción de partículas que atraviesan barreras con este tipo de anchura es extraordinariamente pequeña. Precisamente cuando la situación se hace interesante, el flujo de partículas que la atraviesan por el efecto túnel se reduce a un hilillo.

De todas formas, parece que debe ser posible determinar cuánto tiempo tarda una partícula en *hacer* un túnel a través de la barrera, incluso frente a dificultades enormes. Los libros de texto de mecánica cuántica dan respuestas variadas. Según algunos autores, el proceso es instantáneo: la partícula simplemente desaparece en un lado de la barrera y reaparece instantáneamente en el lado contrario. Otros dicen que el tiempo simplemente no está definido: nunca podemos saber la respuesta. Pero un científico de ordenadores puede determinar ciertamente a qué velocidad computará la máquina. Esta es una cuestión observable; en realidad, una cuestión práctica. Un montón de dinero podría tener influencia a la hora de batir cualquier límite cuántico aparente.

Observar pucheros

Existen indicios adicionales procedentes de otros procesos cuánticos. Cuando un átomo es excitado, un electrón atómico salta a un nivel de energía más alta. Se queda allí durante un cierto tiempo antes de caer a su estado fundamental: un proceso conocido como «desexcitación». El exceso de energía del proceso de desexcitación es liberado normalmente en forma de un fotón que sale expul-

sado. Detectando y midiendo la energía del fotón, podemos calcular la diferencia de energía entre los dos niveles atómicos.

El tiempo que el electrón pasa en un estado excitado varía de un caso a otro, pero puede hacerse una predicción definida utilizando la mecánica cuántica. Sin embargo, una característica esencial de la física cuántica es su indeterminación: el comportamiento de sistemas *individuales* no puede predecirse. La teoría puede dar la vida *media* del estado excitado, pero no puede decirle en cada caso particular cuándo va a desexcitarse ese átomo concreto exactamente. Esta borrosidad inherente nos impide dar una respuesta significativa a la pregunta aparentemente sencilla: ¿cuánto tiempo necesita el electrón para saltar de un nivel a otro? Por mucho que usted lo intente, nunca detectará al electrón en el acto de saltar, o a mitad de camino entre dos niveles. Hay una cierta probabilidad bien definida de que, al cabo de un cierto tiempo, el electrón haya vuelto a su estado fundamental, habiéndose desexcitado en algún instante inespecificado anterior. No podemos decir nada más que eso.

Esto es absurdo, interrumpe nuestro sagaz escéptico. ¿Por qué no observar el átomo continuamente provistos de un cronómetro, y atraparlo en el acto de desexcitarse?

¡Buena idea! De forma notable, existe la tecnología para hacer más o menos eso. Utilizando campos electromagnéticos se puede hoy día atrapar, frenar y almacenar átomos individuales durante largos periodos de tiempo, y luego se les puede sondear con láseres. Por desgracia, incluso estos trucos astutos no pueden sortear la cortina de humo de Heisenberg. Usted nunca puede detectar el átomo en el proceso de desexcitación. Lo que realmente sucede, si usted mira al átomo de cerca y continuamente, es que el propio acto de observación interfiere con el proceso de desexcitación y deja al átomo absolutamente bloqueado (es decir, en el estado excitado). Este fenómeno ha sido bautizado como «el efecto del puchero observado», debido a que recuerda el proverbio según el cual un puchero nunca hierve cuando es observado.* El efecto del puchero observado no puede evitarse: para monitorizar cualquier sistema cuántico, usted debe interactuar con él de alguna forma, y esta interacción perturbará inevitablemente el proceso bajo investigación. Pero aparte sus ojos por un momento ¡y el átomo se desexcitará exasperantemente cuando usted no esté mirando!

¿Pero no es cierto que la desexcitación tuvo lugar *realmente* en un instante concreto en que usted no estaba mirando? Puedo aceptar que el comportamiento de los átomos excitados sea algo incierto. Pero ¿debe haber un

* Se refiere al refrán inglés *A watched kettle never boils* (Nunca hierve un puchero cuando se le mira) que equivale aproximadamente al español *Quien espera desespera*. Por otra parte, este efecto fue bautizado como «paradoja de Zenón de la teoría cuántica» por B. Misra y E. C. G. Sudarshan, quienes lo estudiaron teóricamente por primera vez. (N. del t.)

instante definido, tras pasar un tiempo titubeando, en el que el electrón toma una decisión y comienza el salto —un instante de tiempo en el que el electrón deja el nivel energético excitado y empieza su viaje al estado fundamental? Y este viaje debe necesitar un intervalo de tiempo definido. Quizá sea frustrante que un ser humano no pueda ver cómo sucede, pero esto apenas es relevante.

No somos sólo nosotros los que estamos fastidiados. El principio de incertidumbre de Heisenberg impide que *cualquier* sistema de aparatos, o en realidad cualquier observador, determine el momento y la duración de la desexcitación. Es una limitación fundamental al conocimiento inherente en las leyes de la naturaleza, y no simplemente algún tipo de falibilidad humana. Por complicado que usted haga su aparato, nunca será capaz de sorprender en una mirada al átomo que se desexcita. Einstein pasó largo tiempo tratando de imaginar trucos para encontrar un camino para esto y finalmente abandonó la tarea como algo sin esperanza.

¿Está usted diciendo que el átomo no se desexcita en un instante concreto, o que lo hace pero nunca podemos determinar cuándo?

En física cuántica, usted tiene que ser preciso sobre lo que se está midiendo u observando y atenerse a ello. Usted no puede decir mucho sobre cosas que *no* están siendo observadas. En el caso del tiempo tenemos un problema doble, porque nunca medimos realmente el tiempo como tal (en ningún sentido objetivo). No calibramos una duración comparándola místicamente con alguna entidad separada —«el tiempo»— que domina cualquier actividad y lleva «muecas» incorporadas para hacer un registro de ellas. Si usted quiere medir el tiempo, tiene que especificar algún tipo de reloj que hará la medida, y luego hacer una observación del reloj. Pero un reloj es un objeto físico que cambia, y medimos el tiempo observando la *posición espacial* de alguna variable del reloj, tal como la manecilla. Cuando decimos «La Tierra tarda veinticuatro horas en dar una vuelta», *realmente* queremos decir «Si la manecilla de las horas señala las doce cuando la Tierra tiene una cierta orientación con respecto al Sol, entonces, la próxima vez que la Tierra tenga dicha orientación, la manecilla de las horas señalará de nuevo las doce» (después de dar dos vueltas, por supuesto).

Muy bien. ¡Diseñe un reloj que se detenga en el momento en que el átomo se desexcita!

Por desgracia, la naturaleza nos burla de nuevo astutamente. No hay nada semejante a un reloj cuántico perfecto. Todos los relojes reales, hechos de materia real, sufren la misma incertidumbre, la misma borrosidad cuántica, que cualquier otra cosa. Cuando usted acopla un reloj cuántico borroso a un átomo

mo excitado borroso, sigue teniendo al menos el mismo grado de borrosidad —y sigue sin poder decir cuándo se desexcitó el átomo concreto o cuánto duró el proceso. La naturaleza parece tener un proceso de censura incorporado que siempre nos impide saber precisamente cuándo suceden las cosas, por tortuosa que pueda ser nuestra estrategia.

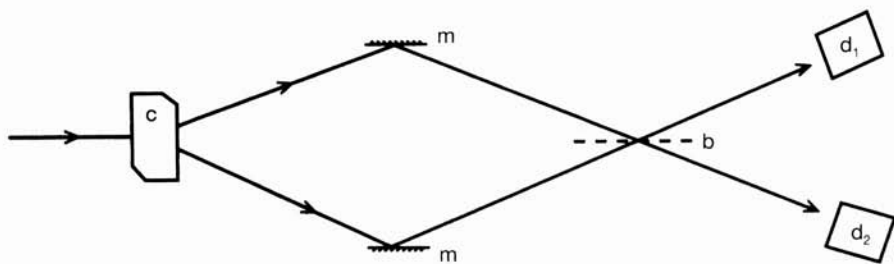
Borrar el pasado

Ni siquiera Dios puede cambiar el pasado.

AGATÓN

Los experimentos en los que se intenta determinar el momento exacto en el que un sistema cuántico «toma su decisión» dan resultados sorprendentes y frustrantes. Uno de éstos es el denominado borrador cuántico imaginado por el físico Marlan Scully, que está diseñado para que un experimentador cambie de idea sobre lo que observar o no en un sistema cuántico —¡incluso *a posteriori*! La figura 7.3 muestra una versión de un sistema borrador cuántico en el que las partículas cuánticas son fotones procedentes de un láser. El primer paso consiste en que un haz láser choca con un cristal especial que convierte cada fotón incidente en dos fotones más débiles. Estos fotones gemelos emergen del cristal siguiendo caminos diferentes, pero unos espejos los redireccionan de modo que se reúnen de nuevo en una lámina semitransparente llamada «divisor de haz». Este divisor de haz es un dispositivo que explota el efecto túnel: los fotones lo atravesarán con una probabilidad 50-50. Esto significa que el divisor de haz refleja la mitad de la luz y transmite la otra mitad. Sin embargo, la geometría del experimento está ideada de modo que ambos fotones gemelos deberían llegar al divisor de haz simultáneamente. Esto entremezcla su destino: aunque, debido al indeterminismo cuántico, usted no puede saber por adelantado qué fotón será transmitido y cuál será reflejado, los experimentadores encuentran que, *si* el fotón inferior es transmitido, entonces el superior es *siempre* reflejado, y viceversa. En cualquier caso, ambos fotones emergen de su encuentro moviéndose juntos a lo largo del mismo camino final. Ambos caminos —superior e inferior en el diagrama— son igualmente probables. Detectores D_1 y D_2 aguardan en cada camino para revelar el resultado concreto en cada caso individual.

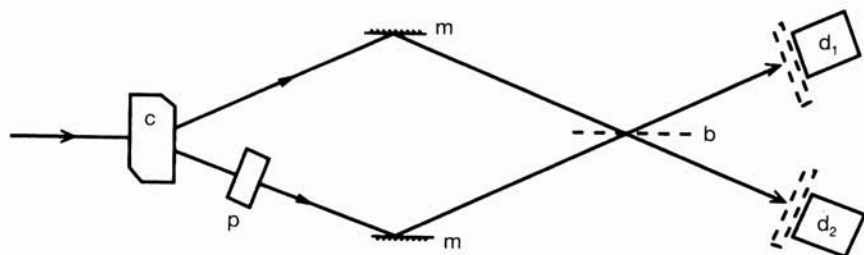
La razón de que ambos fotones acaben siempre en el mismo detector, ya sea el superior o el inferior, reside en el hecho de que, en el montaje recién descrito, el experimentador no puede saber qué fotón toma cada camino. Puede ser que el fotón 1 tome el camino superior y que el fotón 2 tome el camino inferior, o viceversa, pero, con la configuración mostrada, el experimento no puede revelar las rutas reales tomadas. Según las extrañas reglas de la física cuántica, esta falta de información sobre la ruta implica un mundo esquizofrénico



7.3. ¿Realidades múltiples? Los fotones tienen extrañas capacidades en este experimento realizado en la Universidad de California en Berkeley. Un fotón que viene de la izquierda procedente de un láser da lugar a dos fotones gemelos idénticos en el cristal c . Después de reflejarse en los espejos m , los gemelos se juntan de nuevo en un divisor de haz b , que transmite o refleja cada fotón con la misma probabilidad. Los detectores d_1 y d_2 controlan el resultado. Si los caminos de los fotones han sido de la misma longitud, ambos van al mismo detector —es decir, si uno es transmitido por b , el otro es siempre reflejado. La cooperación fantasmal tiene su origen último en el solapamiento o superposición de dos realidades alternativas, que coexisten aquí porque el experimentador no sabe qué fotón tomó cada ruta.

en el que *ambas* alternativas coexisten en una especie de realidad híbrida. Es decir, sin saber qué fotón toma cada ruta, tenemos que considerar el mundo como formado por ambas realidades potenciales que coexisten en una especie de solapamiento fantasmal. Esto no es simplemente una forma de visualizar los extraños tejemanejes, sino que conduce a efectos físicos reales. Por ejemplo, podemos decir que las dos alternativas «el fotón 1 toma el camino superior, el fotón 2 toma el camino inferior» y «el fotón 1 toma el camino inferior, el fotón 2 toma el camino superior» contribuyen *a la vez* al resultado, porque estas alternativas fantasmas se suman para producir resultados que son diferentes de cada alternativa por separado: un proceso conocido como «interferencia cuántica». En el presente ejemplo, es esta interferencia de caminos alternativos la que produce la concordancia antes mencionada, al dirigir ambos fotones al mismo detector.

La interferencia aparece como una consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la luz, y tiene que ver con el hecho de que las ondas que llegan en fase se refuerzan, mientras que las que llegan en oposición de fase se cancelan (discutí esto brevemente en relación con el experimento de Michelson-Morley en el capítulo 2). Ahora, la interferencia se produce entre ondas asociadas con una realidad alternativa que se combinan con ondas asociadas con la otra alternativa. El solapamiento de estas ondas de mundos alternativos puede ponerse de manifiesto de forma convincente si se aumenta lentamente la longitud de uno de los caminos hasta que las ondas asociadas con las realidades alternativas lleguen exactamente *en oposición* de fase. En este caso, la interferencia provoca



7.4. ¿Cambiar el pasado? El montaje mostrado en la figura 7.3 se modifica introduciendo un dispositivo p en el haz inferior diseñado para marcar al fotón que toma dicha ruta (cambiando su polarización). Esto proporciona un conocimiento de qué fotón siguió cada ruta. La cooperación descrita en la figura 7.3 se destruye entonces —los fotones actúan independientemente y pueden disparar ambos detectores simultáneamente. Sin embargo, un polarizador opcional insertado delante de los detectores puede utilizarse para borrar las marcas vitales con posterioridad. Cuando se hace esto, la realidad híbrida original queda restaurada, con ambos fotones yendo al mismo detector una vez más, incluso si, para el tiempo en que se hace el borrado, los fotones ya han atravesado el sistema óptico.

la *cancelación* de la onda, lo que significa que los dos fotones van ahora a detectores *diferentes* —es decir, los dos detectores se disparan simultáneamente. Un pequeño incremento adicional en la longitud del camino vuelve a poner las ondas en fase, y los fotones van al *mismo* detector una vez más. Alargando poco a poco un camino de esta manera, los experimentadores pueden obtener una serie de máximos y mínimos —característicos de una figura de interferencia— para los disparos simultáneos de los dos detectores.

La afirmación de que una conspiración fantasmal de semirrealidades alternativas conduce a la cooperación de los dos fotones puede confirmarse modificando el experimento de modo que se marquen de alguna forma los fotones individuales para determinar sus rutas reales. Esto puede conseguirse instalando un simple dispositivo en el camino inferior que provoca un giro de noventa grados en la polarización del fotón (véase la figura 7.4). Como resultado, el fotón que tome la ruta inferior será identificable, lo que capacitará al experimentador para decir qué fotón sigue cada camino. Cuando se hace esto, los fotones gemelos ya no terminan invariablemente en el mismo detector, sino que se comportan independientemente y pueden disparar *ambos* detectores simultáneamente, incluso cuando las longitudes de los caminos son iguales. Este experimento proporciona un claro ejemplo de la dualidad onda-partícula que discutí en el capítulo 3. Cuando no hay información sobre la ruta, la luz del láser se comporta como una onda, produciendo interferencia. Cuando se hace una modificación para permitir que la ruta quede determinada, la interferencia desaparece y la luz se comporta como si estuviera formada por partículas, siguiendo cada fotón una ruta particular arriba o abajo.

Sorprendentemente, no es necesario que el experimentador continúe realmente y mida las polarizaciones de los fotones —es decir, determine los caminos que han tomado— para que sea observado el cambio en el comportamiento del detector. El mero *amago* de obtener tal información es suficiente para destruir la superposición fantasmal de las realidades fantasmas híbridas. Es nuestro conocimiento *potencial* del sistema cuántico, y no nuestro conocimiento real, el que ayuda a decidir el resultado.

La característica misteriosa del experimento de Scully, que ha sido realizado por un grupo de óptica cuántica en la Universidad de California en Berkeley,² es que la amenaza de obtener información sobre la ruta puede ser retirada más tarde. Para lograr esto se instalan rotores de polarización adicionales delante de los detectores de fotones (véase la figura 7.4), de forma tal que hagan indistinguibles las direcciones de polarización originales (es decir, borren la información) y restauren así la indistinguibilidad de los caminos de los fotones. Cuando se hace esto, se recupera la situación original, observándose una vez más interferencia de tipo onda. La característica sorprendente de este experimento es que la retirada ocurre *después* de que los fotones hayan atravesado el sistema óptico! Es como si los fotones «supieran» de algún modo por adelantado que les aguardan polarizadores adicionales borradores de información, y ajustan su comportamiento en consecuencia. En efecto, la decisión de interponer los polarizadores adicionales sirve para determinar la naturaleza de la realidad que *fue* —o sea, para determinar si la situación dentro del sistema óptico fue tal que cada fotón tomó una ruta definida arriba o abajo, o si ambas alternativas coexistieron en una superposición.

¡Esto es increíble! ¿Está usted diciendo que el borrador cuántico puede borrar el pasado? Creía que el tiempo de Einstein descarta la causación retroactiva.

Es cierto que tales experimentos confirman los peores temores de Einstein. Pero, aunque las acciones del experimentador pueden ayudar a decidir la naturaleza de la realidad cuántica en el pasado, el experimento no puede ser utilizado realmente para enviar información al pasado, que es el punto crucial sobre la causalidad. Es de hecho la incertidumbre inherente de la mecánica cuántica (que Einstein odiaba y en la que nunca creyó) la que milagrosamente llega en rescate del tiempo de Einstein. Puesto que el experimentador no conoce por adelantado qué detector se disparará (sino sólo las probabilidades 50-50), él no tiene control sobre los detalles fotón por fotón. Cualquier intento de codificar un mensaje para ser enviado hacia atrás en el tiempo degeneraría en ruido blanco.

Usted sigue haciendo que parezca posible que un ser humano pudiera ayudar a conformar la realidad del pasado. ¿Qué sucedería si el experimento estuviera completamente automatizado?

El grupo de Berkeley ha sugerido esto. Su idea consiste en reemplazar cada borrador de polarización por otro tipo de divisor de haz que dirige fotones con diferentes polarizaciones a subdetectores superior e inferior diferentes. Entonces el examen de qué fotones van a cada subdetector, y cuándo, dará automáticamente información sobre las rutas que toman los respectivos fotones. Por el contrario, si se mezclan los datos de ambos conjuntos de subdetectores, dicha información quedará enmascarada. La salida de los detectores puede ser almacenada en un ordenador, y el análisis de los datos puede hacerse con tiempo en una etapa posterior. Los científicos pueden escoger entonces, a voluntad, entre inspeccionar los datos mezclados en los que la información sobre las rutas está totalmente camuflada o, alternativamente, seleccionar los datos para ver qué fotones tomaron cada ruta caso por caso. La teoría cuántica hace una predicción definida sobre el resultado. Los datos mezclados no deberían mostrar figuras de interferencia con altibajos en los disparos simultáneos de los dos detectores cuando se aumenta la longitud de un camino, pero si el experimentador decide separar los datos referentes a los subdetectores individuales, entonces se manifestará una figura de interferencia. En otras palabras, la figura de interferencia característica de los fotones «tomando ambos caminos» está oculta en los datos totales que describen a los fotones tomando un camino. Cuando inspecciona los datos del ordenador, mucho tiempo después de que haya terminado el experimento, el experimentador puede elegir entre «mirar y ver» qué camino tomaron los fotones, o ignorar esta información y «observar» (es decir, reconstruir) un mundo en el que ambos caminos contribuyen.

Todo esto es muy confuso. ¿Cuándo exactamente decide cada fotón si toma un camino o, por así decirlo, ambos caminos? ¿Cuándo atraviesa (o no) el rotor de polarización, cuándo llega al divisor de haz, cuándo encuentra a los mezcladores de polarización, o los detectores, o cuándo decide alguien cómo disponer los datos en el ordenador?

Su pregunta no tiene una respuesta. La idea de sentido común de que hay una realidad objetiva «ahí fuera todo el tiempo» es una falacia. Cuando realidad y conocimiento están entremezclados, la cuestión de *cuándo* algo *se hace* real no puede ser respondida de una manera simple.

Pero ¿no es cierto que el acto de rotar la polarización de un fotón tiene algo que ver con hacerle «decidir» por cuál de las realidades alternativas optará?

¡No! Resulta que no es realmente necesario intervenir en la carrera del fotón para determinar su ruta. Por increíble que parezca, es posible obtener información sobre el camino de un fotón sin hacerle algo directamente al fotón en cuestión.

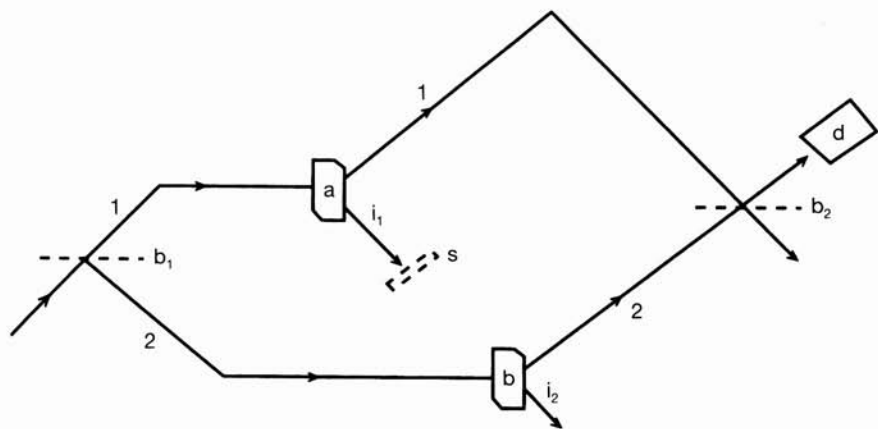
Señales fantasmales y partículas videntes

Todos *sabemos* qué es la luz; pero no es fácil *decir* qué es.

DR. SAMUEL JOHNSON

En lugar de marcar fotones mediante un giro de polarización, como en el montaje descrito antes, se utilizó una estrategia diferente en un experimento realizado recientemente en la Universidad de Rochester.³ En este caso se hacía que la luz láser atravesara *primero* un espejo semitransparente, que dividía el haz en dos, y luego se hacía pasar *cada uno* de los haces resultantes a través de un cristal convertidor para producir pares de fotones gemelos (véase la figura 7.5). Los fotones entran en el aparato de uno en uno. Los dos caminos de la luz superiores que emergen de los cristales se cruzaban en un segundo divisor de haz, al modo del experimento de Berkeley, de manera que los efectos de interferencia pudieran ser monitorizados por un detector de fotones. Los fotones que terminaban aquí se denominaban «fotones señalados». Los que emergían del cristal siguiendo los dos caminos inferiores se denominaban «fotones ociosos». La idea de este montaje consiste en que a partir de la observación de los fotones ociosos podamos obtener información sobre la ruta de los fotones señalados. El fotón incidente se convierte en un par de fotones: un fotón señalado y uno ocioso. Si ve que el fotón ocioso sale del cristal *a*, entonces el experimentador sabe que el fotón señalado ha tomado la ruta 1. Si el fotón ocioso emerge del cristal *b*, entonces es la ruta 2 la escogida por el fotón señalado.

Hasta aquí no hay nada sorprendente involucrado. Si el sistema funciona de esta manera, no habrá efectos de interferencia, puesto que el experimentador es capaz de decir en cada caso qué ruta toma el fotón señalado. En consecuencia, es la naturaleza corpuscular más que la naturaleza ondulatoria de la luz la que se manifiesta. El paso novedoso procede de *fusionar* los dos caminos inferiores de modo tal que sea imposible para el experimentador determinar de qué cristal ha venido el fotón ocioso. Cuando el grupo de Rochester hizo esto, los fotones señalados creaban la figura de interferencia característica en el detector. Una vez más, la figura aparece a causa del solapamiento de alternativas espectrales. Los mundos del camino 1 y del camino 2 se superponen para formar una realidad híbrida. Si los experimentadores lo quieren, podrían separar los haces ociosos (por ejemplo, bloqueando simplemente el camino ocioso del cristal *a*). Cuando hacían esto, el comportamiento de los fotones señalados quedaba espectacularmente alterado: la figura de interferencia desaparecía. ¡El cambio ocurría incluso si los fotones ociosos y los señalados permanecían físicamente bien separados en todo momento! Así, sin *hacer* realmente nada directamente a los fotones señalados —simplemente interrogando a sus gemelos ociosos en otra parte del laboratorio— los experimentadores encontraban que los fotones señalados ajustaban su comportamiento cortésmente. Es como si los fotones señalados fueran videntes: ellos «saben» que sus gemelos han sido interrogados y obligados a divulgar los detalles de la ruta.



7.5. Fotones psíquicos. El divisor de haz b_1 divide un haz luminoso en dos caminos, 1 y 2, que se cruzan de nuevo en un segundo divisor de haz, b_2 . Cualquier figura de interferencia en b_2 puede ser registrada por el detector d . Cada camino contiene un cristal para convertir el fotón incidente en un fotón señalado, que continúa a b_2 , y un fotón ocioso (i_1 o i_2), que puede ser dirigido a otra parte del laboratorio. Si los dos caminos ociosos se mezclan, el experimentador no puede saber qué camino tomó el fotón señalado: resulta una figura de interferencia. Si el camino superior ocioso está bloqueado por una pantalla opcional s , el experimentador puede deducir el camino del fotón señalado, y la figura desaparece. De alguna forma los fotones señalados «saben» qué les está sucediendo a los fotones ociosos lejanos.

Pero ¿cómo descubren eso? ¿Podría ser que el acto de observar los fotones ociosos envíe algún tipo de mensaje a través del laboratorio diciendo: «Cambia tu comportamiento, ¡Oh gemelo! Tu camino ha sido descubierto»?

Einstein consideró el problema de los mensajes cuánticos secretos. Hacía tiempo que era consciente de que la física cuántica resultaba amenazante cuando están involucradas observaciones «no locales» —es decir, cuando se realizan observaciones *simultáneas* en diferentes posiciones en el espacio. En 1935, instalado en Princeton, a mitad de su sexto decenio de vida y acercándose al final de su carrera productiva, ideó otro experimento mental con sus colegas Nathan Rosen y Boris Podolsky, conocido como el «experimento EPR» por las iniciales de sus creadores. La idea básica consiste en que dos partículas cuánticas se separan a partir de un punto de origen común y, cuando están bien separadas, se realizan observaciones simultáneamente sobre ambas partículas. Según la mecánica cuántica, el estado de las partículas ampliamente separadas permanece enmarañado de una forma que es imposible de cuadrar con el tipo de realidad fundada en el sentido común que anhelaba Einstein. Él quería creer que las partículas cuánticas tales como los fotones están realmente «ahí fuera»

con un conjunto completo de propiedades bien definidas (tales como posición, trayectoria y polarización) antes que alguien decida echarles una ojeada. Pero puede demostrarse que, si la visión de Einstein fuera correcta, las partículas sólo pueden satisfacer las reglas de la mecánica cuántica si de algún modo se comunican secretamente entre sí a través del espacio (Einstein lo llamaba «acción fantasmal a distancia»).

Pero Einstein rechazaba la idea de señales ocultas porque implicaba un diálogo *instantáneo* entre las partículas separadas. Aparte de ser absurdamente conspiratoria (imaginemos dos fotones separados a varios metros de distancia cooperando en el modo de comportarse en sus respectivos aparatos de medida), contradecía flagrantemente la teoría de la relatividad, que prohíbe enviar señales más rápidas que la luz. Si recordamos las aventuras de la señorita Mirluz (p. 82), tal señalización implicaría la posibilidad de causación retroactiva. Así, la señalización EPR instantánea y el fenómeno de borrar el pasado que aparece en los experimentos de Berkeley y Rochester, son realmente parte esencial del mismo dilema.

Los últimos experimentos de óptica cuántica bastan para hacer que Einstein se remueva en su tumba. Pero incluso podría haber cosas peores por venir. Recordemos que en el experimento de Berkeley mostrado en la figura 7.4, la decisión del experimentador sobre si observar o no figuras de interferencia de tipo onda puede ser demorada hasta *después* de que los fotones hayan atravesado el sistema óptico. Esto resulta bastante perturbador. Pero el grupo de Berkeley va un paso más allá y afirma que esta decisión crucial, que ayuda a formar la naturaleza de la realidad pasada, puede ser demorada ¡incluso hasta después de que los fotones señalados hayan sido *detectados*!

Para defender su argumento, Raymond Chiao y sus colegas en Berkeley han propuesto un refinamiento del montaje mostrado en la figura 7.5. Señalan que si los fotones ociosos que emergen siguiendo el camino i_1 son marcados de alguna forma (como mediante un giro de la polarización), entonces el experimentador puede decir qué camino tomó cada fotón señalado midiendo simplemente la dirección de polarización de su fotón ocioso asociado. Una vez más, no obstante, esta información puede borrarse insertando un segundo rotor de polarización. (Concretamente, el primer polarizador da un giro de 90° a la polarización de los fotones en el haz i_1 y el segundo polarizador es colocado a 45° del primero.) Pero en cada caso la decisión de realizar o no el segundo giro puede ser demorada en principio hasta *después* de que el fotón señalado haya sido detectado en d . Si se prescinde del segundo rotor de polarización, los fotones señalados se comportan como partículas, pero si se inserta, entonces se predice que reaparecerá la interferencia de tipo ondas —en forma de correlaciones con pautas características entre los fotones señalados y los fotones ociosos.

Hay planes en marcha para realizar experimentos de este tipo. No capacitarían realmente a los experimentadores para enviar señales al pasado o para alterarlo. Más bien demostrarían que la naturaleza específica de la realidad pasa-

da, que es desvelada por las observaciones experimentales, no queda fijada definitivamente hasta que el experimento entero ha concluido. Incluso cuando han sido detectados los fotones señalados, el registro del pasado no sólo permanece incompleto sino *incierto* debido al enmarañamiento sutil de largo alcance entre los fotones señalados y los ociosos.

Einstein utilizó la naturaleza inaceptable de la señalización retroactiva como un argumento para rechazar la mecánica cuántica, pero Bohr replicó que era la visión ingenua de la realidad por parte de Einstein la que debería rechazarse. Sencillamente las partículas no tienen atributos bien definidos antes de ser observadas, decía él. Con el tiempo, el experimento mental de Einstein se ha transformado ahora en una serie de experimentos reales, y los resultados han confirmado que Bohr tenía decididamente razón y Einstein estaba tristemente equivocado. Mientras que la causación retroactiva estricta está difuminada por la borrosidad cuántica, un preocupante vestigio de acción «fantasmal» sobrevive en los resultados de Scully y compañía.

Estos experimentos iluminan la naturaleza extraordinariamente peculiar del tiempo en la física cuántica. Aunque acatan la letra estricta de la ley que gobierna el tiempo de Einstein, violan el espíritu de la relatividad mezclando acciones del presente con la realidad del pasado.

¿Más rápido que la luz?

Diga lo que diga Salomón, en una carrera debe ganar la velocidad.

BENJAMIN DISRAELI

La conclusión de los diversos experimentos de dos fotones, muchos de los cuales sólo han sido realizados recientemente, es que no es posible en general decir cuándo «suceden realmente» las cosas en física cuántica.

¿Así que no hay esperanza de poder determinar cuánto tiempo necesita una partícula para abrir un túnel a través de una barrera?

De forma bastante extraña, aún puede ser posible. Hay una sutil diferencia entre determinar *cuándo* una partícula ha hecho el túnel, y *cuánto* tiempo ha tardado. Si sólo estamos interesados en la duración total entre el comienzo y el final, y no en el instante real del túnel, hay una probabilidad de que aún podamos medirlo.

De hecho, los investigadores de Berkeley intentaban hacer eso precisamente.⁴ Ellos basaban su experimento en el montaje mostrado en la figura 7.3; recordemos que, si ambos caminos para los fotones son iguales, los fotones llegarán al divisor de haz simultáneamente y, por razones de interferencia cuántica,

irán al mismo detector. La configuración óptica proporciona en efecto una pista de carreras para comparar los tiempos de viaje de los dos fotones.

Supongamos ahora que se inserta una barrera en uno de los caminos. Puesto que el fotón que sigue esa ruta tiene que hacer un túnel a través de la barrera, cabe la posibilidad de que no llegue al punto de encuentro en el mismo momento que su gemelo, en cuyo caso los delicados mecanismos de interferencia se perturban y hay una oportunidad de que vaya un fotón a cada detector. Sin embargo, ajustando la longitud de la otra ruta (la que tomó el gemelo) para compensar, usted puede restaurar la situación y disponer una llegada simultánea, y una cooperación infalible en el detector escogido, una vez más. Si el fotón se retrasa ligeramente al atravesar la barrera, entonces el camino del gemelo tendrá que ser alargado ligeramente para compensar. Midiendo la longitud extra, usted puede calcular cuánto tiempo tarda el fotón en hacer el túnel.

Cuando se realizó realmente el experimento, los resultados fueron sorprendentes. Con la barrera insertada, ¡el fotón que hacía el túnel llegaba primero! En otras palabras, parecía que la barrera aceleraba el fotón. Pero el fotón ya estaba viajando a la velocidad de la luz, de modo que aparentemente ¡el fotón que hacía el túnel viajaba más rápido que la luz! El grupo de Berkeley infirió un aumento de la velocidad del fotón de aproximadamente un 70 por 100 —es decir, el fotón hacía el túnel a más de 500.000 kilómetros por segundo.

¿Creó taquiones astutamente el grupo de Berkeley? De ningún modo. Una vez más, tenemos que ser muy cuidadosos al inferir, en el mundo loco de la física cuántica, que algo ocurre realmente «ahí fuera» sobre la base de los resultados de configuraciones experimentales concretas. Los taquiones que destruyen la causalidad presuponen la posibilidad de llevar a cabo un control del momento de la transmisión y detección de las partículas involucradas. Esto no es lo mismo que deducir, *a posteriori*, que algo podría haber superado la velocidad de la luz en el pasado, si tenemos en cuenta también que, si hubiéramos sometido dicho movimiento superliminal fugaz al examen observacional, no habríamos sido capaces de «atraparlo en el acto» en el instante concreto de tiempo que marca un reloj real.

¡El tiempo desaparece!

¿Deberíamos estar preparados para ver algún día una nueva estructura para los fundamentos de la física que elimina el tiempo? ... Sí, porque el «tiempo» está en dificultades.

JOHN WHEELER

Evidentemente, el tema del tiempo en física cuántica es decididamente oscuro, y por buenas razones. En primer lugar, como hemos visto, no hay nada que se parezca a un reloj perfecto en física cuántica: todos los relojes físicos están

sujetos a la incertidumbre cuántica. Esto influye en su funcionamiento de una manera impredecible, e incluso podría hacerles marchar hacia atrás. En segundo lugar, el tiempo de Einstein no es el tiempo de Newton; es un tiempo flexible, es maleable y está inseparablemente entretelado con la materia y la gravitación.

Puesto que se supone que las cosas, campos gravitatorios incluidos, están gobernadas por las extrañas reglas de la física cuántica, entonces no sólo los relojes sino también el *propio tiempo* estarán sujetos a la borrosidad cuántica. Esto nos lleva al difícil tema de la gravedad cuántica. Cuando se aplica la física cuántica al campo electromagnético se obtienen fotones y todos los fenómenos extraños y maravillosos que he discutido anteriormente. En el caso del campo gravitatorio, Einstein mostró cómo puede verse como una distorsión o curvatura del espacio-tiempo. Por consiguiente, cuando la física cuántica se aplica a la gravedad, el espacio y el tiempo también adquieren extrañas propiedades cuánticas. Esto exagera considerablemente «el problema del tiempo» en física cuántica, y queda un montón de rompecabezas que resolver en la agenda de los físicos.

La dificultad central con el tiempo cuántico remite a la misma noción del tiempo de Einstein: no hay un tiempo absoluto y universal. Mi tiempo y su tiempo son probablemente diferentes, y ninguno de ellos es «correcto» o «falso»: son igualmente aceptables. Visto en términos del espacio-tiempo tetradimensional, diferentes elecciones de tiempo corresponden a diferentes maneras de dividir, o descomponer, el espacio-tiempo en secciones (recordemos la figura 2.2 de la página 75). Christopher Isham, el mayor experto británico en gravedad cuántica, lo explica así:

Una característica fundamental de la teoría de la relatividad general es que todas estas descomposiciones del espacio-tiempo se consideran admisibles y con el mismo estatus. En este sentido «el tiempo» es una convención; cualquier elección proporcionará sólo esos sucesos que pueden ser unívocamente ordenados mediante los valores asignados de tiempo.⁵

La ausencia de cualquier tiempo absoluto subyacente implica que los procesos físicos no pueden nunca depender explícitamente del tiempo como tal; pues ¿qué tiempo escogerían? Usted podría intuir aquí una paradoja —parece sugerir que nada puede cambiar nunca en un universo cuántico— pero no es así. El asunto es, más bien, que la única forma significativa de medir el cambio físico en el universo de Einstein es olvidar el tiempo «como tal» y calibrar el cambio solamente mediante las lecturas de relojes físicos reales, no por alguna noción inexistente del «tiempo mismo».

Hay que decir que muchos físicos destacados están profundamente disgustados con la conclusión anterior y han trabajado duramente para sacar a la luz algún tiempo intrínseco «verdadero» oscuramente enterrado en las mate-

máticas de la relatividad general. Esperan que pueda revelarse que alguna combinación ingeniosa y sutil de magnitudes que describen la geometría del espacio-tiempo posea las cualidades que uno esperaría de una medida universal del tiempo, y que en lo sucesivo este tiempo universal podría servir como un «fondo» genuino para la medida del cambio. Hasta ahora, sin embargo, no hay evidencia de que exista semejante tiempo intrínseco.

¿Pero yo creía que usted dijo antes que *hay* una especie de tiempo cósmico universal, y que el tiempo de la Tierra casi coincide con él?

En efecto, lo hice. Sin embargo, el tiempo cósmico no servirá como un tiempo intrínseco en ningún sentido *fundamental*, puesto que su existencia depende, como usted recordará, del hecho de que el estado del universo es altamente uniforme y simétrico a gran escala. Un espacio-tiempo *general* no poseerá esta uniformidad. Según la convención, el trabajo del cosmólogo consiste en tomar las leyes de la física y explicar el universo, y no al contrario (como creía Milne). Queremos considerar el universo como un sistema mecánico gigantesco sujeto a las leyes de la física cuántica y, eso esperamos, explicar la razón de que haya uniformidad a gran escala. Pero para llevar a cabo esta tarea central de la cosmología cuántica necesitamos explicar cómo evoluciona el universo con el tiempo ¡sin hacer referencia al tiempo de ninguna forma básica!

¿No se podría utilizar la expansión del propio universo como un reloj?

Es posible. Un *corte particular* del espacio-tiempo en secciones espaciales mostrará cómo evoluciona la geometría del espacio con la coordenada temporal. En el caso sencillo de un universo uniforme, el espacio se expande precisamente a una cierta velocidad. Pero si tomamos un método de corte diferente, obtenemos una descripción diferente —por ejemplo, un tamaño y una velocidad de expansión diferentes— para el mismo valor particular de la coordenada temporal. El punto importante sobre el tiempo de Einstein es que todas estas descripciones deben ser equivalentes; el valor de la propia coordenada temporal es arbitrario.

Si, a pesar de todo, usted sigue adelante y utiliza una coordenada temporal arbitraria, y trata el movimiento del universo igual que el de cualquier otro sistema mecánico, entonces puede utilizar las ecuaciones de campo gravitatorio de Einstein para escribir ecuaciones de movimiento para el universo e identificar magnitudes familiares tales como la energía total. Pero aquí está el obstáculo. Para que las ecuaciones sigan siendo válidas cualquiera que sea el tiempo flexible (es decir, corte) que usted elija, resulta que la energía total del universo está obligada a ser estrictamente *cero*. De modo que la visión de Einstein del tiempo nos obliga a concluir que, si el universo como un todo se trata ingenuamente como un sistema mecánico ordinario, su energía está obligada a desapa-

recer. Este resultado notable, conocido por los físicos durante muchos años, tiene profundas consecuencias para una descripción cuántica. En física cuántica, la energía siempre va mano a mano con el tiempo. En cierto sentido, la cantidad de energía determina la velocidad a la que pasa el tiempo —el latido del reloj cuántico, si usted quiere. Energía nula significa que el reloj cuántico deja de marcar: de forma desconcertante el tiempo desaparece por completo de la descripción física. De modo que la cosmología cuántica, tratada de esta manera, no hace la más mínima referencia al tiempo: en efecto, ¡el tiempo también ha desaparecido totalmente! El espacio-tiempo, la entidad misma sobre la que estaba basada la teoría de la relatividad de Einstein, ha sido sustituido por una abigarrada colección de espacios con diferente geometría, pero no queda ningún tiempo para unirlos. Como el perro que no ladró en la historia de Sherlock Holmes, el reloj cósmico que no latió parece ser una clave crucial que puede ayudarnos a resolver el enigma del tiempo, pero nos falta el poder de razonamiento del detective para desentrañar el problema.

Todo esto es muy misterioso, ¿no cree? ¿Qué ha sucedido con el tiempo? Usted hace que suene como si nunca existió realmente.

Se ha evaporado en un soplo de borrosidad cuántica, de modo análogo a como otras nociones precisas, como la posición y la trayectoria del movimiento para las partículas, desaparecen en la mecánica cuántica convencional. La cosmología cuántica ha abolido el tiempo tan ciertamente como el estado alterado de consciencia de los místicos. Para un estado cuántico típico en esta teoría, *el tiempo carece simplemente de significado*.

Entonces ¿de dónde salió el tiempo? Si no tiene ninguna existencia física fundamental —si no se hizo, por así decir, en el big bang— ¿qué lo produjo?

Esta es una buena pregunta. Soy el primero en admitir que en el mundo cotidiano el tiempo tiene un significado importante. Ninguna teoría del universo puede ser creíble a menos que permita que emerja algún tipo de noción de tiempo del borrón cuántico. Lo que sugieren las últimas reflexiones entre los cosmólogos cuánticos es que el tiempo es meramente una noción *aproximada y derivada*. Se han hecho cálculos en un intento de elucidar precisamente cómo se «congela» o «cristaliza» la temporalidad cósmica a partir del juego cuántico intemporal de geometrías retorcidas que cubrieron el big bang. En el momento en que escribo, estos cálculos siguen siendo (en mi opinión) tan resbaladizos como el tiempo que pretenden capturar. Todo lo que parece claro es que un estado cuántico general del universo no tiene un tiempo bien definido en absoluto.

La dificultad a la que se enfrentan estos cálculos es que la borrosidad cuántica no desaparece simplemente de forma espontánea. Afecta no sólo a las iden-

tidades del espacio y el tiempo, sino también a la *geometría* del espacio-tiempo. En una descripción cuántica no hay un simple espacio-tiempo con una geometría bien definida que está «ahí»; en su lugar, usted debe imaginar todas las geometrías posibles —todos los espacio-tiempos posibles, distorsiones del espacio y distorsiones del tiempo— mezclados en una especie de cóctel, o «espuma», al modo de las realidades alternativas representadas por los caminos de los fotones que discutí en el capítulo anterior. De algún modo, a partir de esta confusión espumosa ha cristalizado alguna especie de espacio y tiempo con una geometría específica. Nadie sabe exactamente cómo sucedió la cristalización, pero hay razones para creer que puede exigir un conjunto de circunstancias muy especiales. Es decir, si usted toma simplemente cualquier viejo big bang cuántico espumoso, usted no terminará con un tiempo bien definido. La regla general es: una vez espumoso y borroso, siempre espumoso y borroso. Aparentemente, sólo condiciones iniciales *muy especiales* —esto es, sólo universos que parten de una espuma configurada de forma muy especial— evolucionará hacia realidades aproximadamente «clásicas» (es decir, no cuánticas) que poseen tiempo, espacio y objetos materiales macroscópicos bien definidos. Por razones que no conocemos (aunque véase mi libro *La mente de Dios*), el estado cuántico de nuestro universo es afortunadamente uno de aquellos estados muy especiales que permiten que el tiempo emerja de este amasijo primordial a medida que el universo «evoluciona» desde el big bang, de una forma borrosa y mal definida. Y eso son buenas noticias, puesto que la vida sería difícil en un universo sin ninguna especie de tiempo.

Si estas ideas están en el camino correcto (y ciertamente son muy especulativas), entonces la magnitud llamada «tiempo», tan crucial para nuestras vidas y nuestras descripciones del mundo físico, puede revelarse un concepto enteramente secundario que no tiene relación con las leyes básicas del universo. La historia habría rizado el rizo desde Newton, quien colocó al tiempo en el centro de su descripción de la realidad. Ahora vemos que el tiempo puede haberse originado casi por accidente. Podemos imaginar que, en el principio, cerca del big bang, el tiempo no existía. El hecho de que haya emergido el tiempo de un modo aproximado —como una especie de reliquia— a partir de la agitación primordial e intemporal del cosmos naciente, se debe simplemente a que el estado cuántico del universo es peculiar. Puede parecer alarmante que la física cuántica elimine el tiempo cerca del big bang, pero existe una compensación que agradecer: puede ser precisamente el hueco que se necesita para explicar cómo llegó a la existencia el universo en primer lugar.

El tiempo imaginario

Así que, tal vez, lo que llamamos tiempo imaginario es realmente más básico, y lo que llamamos tiempo real es simplemente una idea que inventamos para ayudarnos a describir cómo pensamos que es el universo.

STEPHEN HAWKING

Puesto que los *Matemáticos* utilizan frecuentemente el Tiempo, deben tener una idea precisa del significado de dicha Palabra; de lo contrario son Charlatanes...

ISAAC BARROW

Las dos culturas revisadas

Los catedráticos ... la mayoría de ellos, son completamente inútiles.

JOHN MAJOR, primer ministro británico

Nunca olvidaré el momento en que vi, o más bien oí, por primera vez a Stephen Hawking. Era el año 1969, y yo estaba asistiendo a una conferencia sobre teoría de la gravitación en el King's College de Londres, situado en el Strand, cerca de la famosa Fleet Street. Era un pequeño respiro en medio de los rigores de mi trabajo de tesis. El conferenciante en ese momento era el matemático Roger Penrose, famoso en todo el mundo. Estaba a mitad de su conferencia cuando fue repentinamente interrumpido por una voz que procedía de la primera fila. Al principio tuve la impresión de que un borracho o un loco había irrumpido en el auditorio con intención de molestar (estas cosas no son desconocidas en las conferencias de física). La interrupción, con una voz borrosa y lenta que resultaba completamente incomprensible para mí, conti-

nuó durante dos minutos enteros. Para mi asombro, Penrose esperó en pie pacientemente durante todo este tiempo, y luego procedió a articular una larga respuesta técnica a lo que evidentemente había sido una pregunta muy pertinente del joven Hawking.

Nunca llegué a entender completamente el habla confusa de Hawking, aunque aprendí a seguir el hilo de sus comentarios. Antes de que fuese equipado con un sintetizador de voz, las conversaciones con él siempre estaban abiertas a malentendidos, a veces de carácter humorístico. En una ocasión memorable en Boston, mientras estábamos discutiendo el programa de una conferencia durante una comida en un restaurante, Stephen preguntó repetidamente si íbamos a beber vino o no. Después de tratar sin éxito que eligiera una botella de la carta de vinos, comprendí de repente que él estaba hablando de Weinberg, el físico.*

Ya en aquellos primeros días, Hawking estaba interesado en el problema de si el tiempo tuvo un origen o se extendía hacia atrás para siempre. ¿Tuvo un primer tic el gran reloj cósmico, por decirlo así, o ha estado marchando durante toda la eternidad? Cuando, veinte años después, Hawking resumió sus reflexiones sobre el tema en el libro *Historia del tiempo*, se convirtió al instante en una celebridad, comparable a Einstein. Quizá inevitablemente, su popularidad provocó una reacción en contra. Los intelectuales de salón británicos se sintieron especialmente ultrajados por Hawking y sus atrevidas ideas. Tradicionalmente, la vida intelectual británica ha estado dominada por la hermandad de las artes y las letras, como los lectores de C. P. Snow saben bien. En realidad, a los científicos raramente se les concede siquiera el estatus de «intelectuales». La ciencia, en la medida que es tenida en cuenta por los formadores de opinión británicos, se considera en el mejor de los casos un mal necesario que sirve para alimentar costosas tecnologías, y en el peor, una conspiración tecnocrática. Existe una suposición tácita de que las teorías científicas son parte de un truco gigantesco diseñado para acrecentar el poder y la importancia de científicos que velan sólo por sus intereses. El discurso científico se trata con sospecha como un código esotérico, creado para mantener la exclusividad del club y diseñado deliberadamente para deslumbrar a los no científicos a base de matemáticas y jergas impenetrables.

Mientras los científicos se queden en sus laboratorios, son tolerados por el sistema literario —dejados de lado como reductos de poca importancia— y las implicaciones de su oscuro e incomprensible trabajo son ignoradas. Pero lo que más irrita a estos literatos categóricos es que los científicos se atrevan a tratar cuestiones del «significado de la vida». La comunidad de artes y letras ha creído siempre que posee un monopolio de origen divino sobre estas cuestiones. El hecho de que Stephen Hawking, un científico, tuviera la audacia de extraer

* Téngase en cuenta que en inglés hay una similitud fonética entre la palabra *wine* (vino) y la sílaba inicial de Weinberg. (*N. del t.*)

profundas conclusiones sobre el origen del universo, el papel de un Creador, o el lugar de la humanidad en el cosmos a partir de su arcana disciplina se pasaba de la raya. Aunque yo no estoy de acuerdo con todas las conclusiones de Hawking, él simplemente expresa lo que es una posición bastante común entre los científicos, y no debería ser vilipendiado por hacer esto.

El coro de irritación que surgió en respuesta al libro de Hawking tomó la forma de denuncias públicas por parte de políticos y periodistas que se pretendían moralmente superiores y diatribas casi histéricas en la prensa británica por parte de reputados escritores y académicos. Su disgusto estaba alimentado por el hecho de que pocas de estas personas podían comprender el contenido del libro, puesto que virtualmente ninguno de ellos tenía ninguna formación científica y eran en general hostiles a la ciencia por motivos ideológicos. Se esgrimió el débil argumento de que cualquier verdad importante debería resultar transparente para todas las personas pensantes. El argumento era: «Soy instruido» —es decir, versado en artes y literatura— «y no puedo entender estas afirmaciones de los físicos y los cosmólogos. Por lo tanto, las afirmaciones deben ser absurdas y los científicos son un fraude».

Para hacer esto, los comentaristas adoptaron el hábito de asustar a los científicos planteándoles la pregunta: ¿Qué sucedió antes del big bang? La idea parecía ser esta: «Ustedes los científicos creen que son muy inteligentes al explicarlo todo. Bien, incluso si ustedes explican el big bang, aún no han explicado qué había antes, ¿o lo han hecho?».

Cómo empezó el tiempo

Por desgracia, el desafío antes mencionado revela una ignorancia no sólo de la ciencia sino también de la historia de la filosofía y la teología. Como hemos visto, san Agustín propuso hace siglos que el mundo fue hecho *con el tiempo* y no *en el tiempo*. Reconocía que el tiempo es en sí mismo parte del universo físico —parte de la Creación— y que por ello no tiene sentido hablar de «antes» de la Creación.

Todo esto está muy bien, contesta el escéptico (que más bien se pone del lado de los hombres de letras británicos): afirmar que san Agustín lo aclaró todo. Pero decir escuetamente que el tiempo no existía antes de que naciera el universo es simplemente un montón de palabras. ¿Cómo podemos imaginar algo semejante? ¿Cómo empezó el tiempo de repente de forma espontánea?

San Agustín estaba más interesado en la teología que en la física. Como he mencionado, su idea resolvía limpiamente el dilema de lo que Dios estaba haciendo antes de que creara el universo. Pero los problemas del tiempo y de

la Creación no desaparecieron. La mayoría de los teólogos y científicos aún suponían que el tiempo es eterno y no tuvo principio. Si, por consiguiente, el universo de materia y energía tenía un origen definido (por ejemplo, fue creado por Dios en algún momento específico), entonces debe haber habido un suceso singular inicial, dentro del tiempo, en el que el universo comenzó abruptamente a existir.

En el siglo xvii, Gottfried Leibniz, que quería creer que Dios creó el universo en un momento preciso del pasado, se sentía de todas formas perturbado por el hecho de que Dios, que se supone es perfecto e inmutable, decidiera repentinamente hacer un universo en algún momento particular:

Puesto que Dios no hace nada sin razón y no puede darse ninguna razón de por qué no creó el universo antes, se seguirá o bien que Él no creó nada en absoluto o bien que creó el mundo antes de cualquier tiempo asignable, es decir, que el mundo es eterno.¹

El tema fue asumido por Immanuel Kant, que ingeniosamente avanzó argumentos que arrojan dudas sobre *ambas* alternativas. El universo no puede ser ilimitado en el pasado, razonaba él, porque eso significaría que deben haber ocurrido un número infinito de sucesos o una sucesión infinita de estados del mundo. Pero puesto que el infinito no puede alcanzarse nunca «por síntesis sucesivas», la hipótesis de un universo eterno tiene que ser falsa. Por el contrario, si el universo llegó a existir en algún instante particular en el tiempo, entonces debe haber habido un tiempo antes de que existiera (Kant lo llamó «tiempo vacío»). Pero luego argumentaba, oscuramente, que nada puede originarse en un tiempo vacío, «porque ninguna parte de un tiempo semejante contiene una condición distintiva de ser, con preferencia a la de no ser». Kant aceptaba que escapar de su dilema temporal significaría negar «la existencia de un tiempo absoluto antes del mundo», pero él no estaba dispuesto a hacer esto, dijera lo que dijera san Agustín.²

¿Qué sentido puede darse a la idea de un tiempo anterior al universo? Si no existen «cosas», sino simplemente un vacío eterno donde nada sucede, entonces conceptos como sucesión y duración no parecen tener ningún significado en absoluto.

Muchas personas tienen una imagen de la época anterior al universo como un espacio oscuro, inerte y vacío. Pero para el cosmólogo moderno, ni el tiempo ni el espacio existían antes del big bang. El origen del universo significa el origen del espacio y del tiempo tanto como de la materia y la energía.

Si el tiempo no existió siempre, entonces ¿no debería haber habido una discontinuidad en la que el tiempo «se puso en marcha abruptamente»? Y

esto significa que tuvo que haber un primer suceso —o Primer Suceso. El Primer Suceso no puede ser como los sucesos ordinarios, puesto que nada había antes de él. ¿Sería un suceso sin causa, un suceso singular y sobrenatural?

El trabajo inicial de Hawking se centraba en el problema del Primer Suceso. Fue capaz de demostrar, utilizando la teoría de la relatividad general, que el origen del universo fue en realidad singular —en el sentido matemático bastante preciso que introduje en el capítulo 4. Si el modelo simple del big bang se sigue hasta sus últimas consecuencias, entonces el universo estuvo infinitamente comprimido en el principio mismo. Este estado tiene un campo gravitatorio infinito, que representa una distorsión infinita del espacio-tiempo. Usted no puede continuar el espacio-tiempo más allá de una singularidad semejante de la misma forma que no puede continuar un cono más allá de su vértice.

¿De modo que el primer suceso fue una singularidad espacio-temporal —un estado de densidad y curvatura infinita?

No exactamente. Hay aquí una sutileza. La singularidad (que es en cualquier caso un artificio matemático) se define como una *frontera* del tiempo, pero no es parte estrictamente del propio tiempo: no es realmente un suceso como tal. La singularidad limita al tiempo en el pasado, implicando que el tiempo no ha durado para siempre. De todas formas, no es necesario que haya habido un primer momento.

¿Qué? ¿No es cierto que si el tiempo no ha durado eternamente, entonces debe haber habido un primer momento?

No. ¿Existe un número mínimo mayor que cero? Evidentemente no. Trate de escoger un número (una milmillonésima, una billonésima...). Dicho número siempre puede ser dividido por la mitad, y dividido una vez más, para obtener números cada vez más pequeños. Si el tiempo es continuo, entonces en ningún momento (una milmillonésima de segundo, una billonésima de segundo...) habrían faltado momentos precedentes. Por supuesto, el tiempo puede no ser continuo. El gran drama cósmico podría ser parecido a una película: una secuencia de fotogramas estáticos que pasa a tal velocidad que no notamos las uniones. Puede simplemente dar la ilusión de continuidad. Se han propuesto teorías que incluyen «cronones» —átomos de tiempo— (la más notable debida a David Finkelstein, a quien mencioné en el capítulo 4), pero sin mucho éxito. En el frente experimental, los físicos estudian rutinariamente secuencias de sucesos que ocurren en una escala de tiempo de aproximadamente una cienquatrillonésima de segundo, y todavía no se ha puesto de manifiesto ningún indicio de discontinuidad temporal. Por lo tanto, si *hay* cronones de tiempo, deben ser absolutamente breves.

Muy bien. Puedo ver que hay algunas sutilezas matemáticas técnicas. Pero, primer momento o no, un origen singular del universo significa que el tiempo se puso en marcha repentinamente, sin razón aparente. Tal «acontecimiento» (no quiero llamarlo suceso) parece completamente sobrenatural. No veo cómo el origen del tiempo como tal pueda ser englobado dentro del ámbito de la ciencia.

Esto era la creencia general hasta hace unos pocos años. La elección parecía bastante simple: o bien el universo (y el tiempo) no tuvieron principio, y han existido desde siempre, o hubo un principio singular que no podía ser explicado por la ciencia. En cualquier caso, había problemas. Sin embargo, todo cambió cuando los físicos empezaron a tener en cuenta efectos cuánticos. La propiedad crucial de la física cuántica es que causa y efecto no están rígidamente unidos, como lo están en la física clásica y lo sugiere el sentido común. Hay indeterminismo, lo que significa que algunos sucesos «simplemente ocurren» —espontáneamente, por así decir— sin una causa anterior en el sentido normal de la palabra. Súbitamente los físicos fueron conscientes de alguna forma de que el tiempo podía «comenzar por sí mismo» —espontáneamente— sin ser «creado deliberadamente».

La teoría de Hartle-Hawking

La noción de tiempo se desvanece graciosamente...

CHRISTOPHER ISHAM

Stephen Hawking y James Hartle de la Universidad de California en Santa Bárbara esbozaron un modo en el que el tiempo podría ponerse en marcha por sí mismo, mecanocuánticamente, en el big bang. Utilizaron un esquema matemático que combinaba de una forma muy sugestiva el tiempo (y el espacio) de Einstein con las leyes de la física cuántica. Debería dejar claro de entrada que la teoría de Hartle-Hawking es pura especulación basada en fundamentos algo inciertos, pero al menos representa un intento honesto de tantear sistemáticamente lo que es quizá el reto científico definitivo.

La piedra angular de su teoría es algo que Hawking ha llamado «tiempo imaginario». Por desgracia, muchas personas han tomado esto como si significara algo más bien místico, como «el tiempo de nuestra imaginación». Otros piensan que significa un tipo de tiempo que sólo podemos imaginar, y no el tiempo «real» de la experiencia. De hecho, la palabra «imaginario» se utiliza aquí en un sentido matemático técnico, y no tiene nada que ver con la imaginación.

Permítanme explicarme. En la escuela se nos enseña a elevar números al cuadrado. Por ejemplo, el cuadrado de 2 es $2 \times 2 = 4$, el cuadrado de 3 es

$3 \times 3 = 9$, y así sucesivamente. Seguir el camino inverso se denomina «sacar la raíz cuadrada». Así, la raíz cuadrada de 4 es 2, la raíz cuadrada de 9 es 3, etc. Los estudiantes más avanzados aprenden a elevar al cuadrado números negativos. La regla es que la multiplicación de dos números negativos da un número positivo, de modo que $(-3) \times (-3) = 9$. Esto significa que existen dos números que dan 9 cuando se elevan al cuadrado (a saber, 3 y -3). Recíprocamente, si usted quiere tomar la raíz cuadrada de 9, la respuesta correcta es 3 o -3 .

Surge un problema si usted quiere sacar la raíz cuadrada de un número *negativo*, como -9 . Puesto que tanto los números positivos como los negativos dan un número *positivo* cuando se elevan al cuadrado, ningún número ordinario puede ser elevado al cuadrado para dar un número negativo. Si usted quiere hablar de la raíz cuadrada de números negativos, tiene que inventar algunos números nuevos para este cometido, números que no están contenidos en el conjunto familiar 1, 2, 3 ... ni en $-1, -2, -3 \dots$ Esto se hizo en el siglo XVI. Los nuevos números se denominaron «imaginarios», no porque sean menos reales que los números «ordinarios», sino porque no aparecen en la aritmética cotidiana como la que se necesita para contar ovejas y monedas. El sugestivo término «imaginario» es típico de la jerga matemática. Existen también números irracionales y trascendentales, por no mencionar los números reales, complejos, racionales y transfinitos y las fracciones ordinarias. Los nombres son simplemente históricos.

Puesto que los números imaginarios son nuevos, no podemos utilizar ninguno de los símbolos reservados para números «normales», de modo que en su lugar se utilizan letras. Empecemos con el número imaginario más sencillo, la raíz cuadrada de -1 . Se denota por i . Así pues, $i \times i = -1$. Esto es simplemente una definición. Afortunadamente, no es necesario tener una lista interminable de bonitos nuevos símbolos para números imaginarios. Sólo se necesita un símbolo nuevo, ya que todos los demás números imaginarios pueden construirse multiplicando i por un número «real» (es decir, ordinario). Por ejemplo, la raíz cuadrada de -9 es $3i$, y así sucesivamente. Los números imaginarios pueden parecer poco familiares, pero se utilizan ampliamente en ciencia y en ingeniería tanto como en matemáticas, dando lugar a menudo a una gran simplificación.

¿Qué tiene que ver todo esto con el tiempo? La conexión remite al trabajo de Hermann Minkowski. Recordemos del capítulo 2 que Minkowski explicaba que un simple continuo «espacio-temporal» se seguía naturalmente de la teoría de la relatividad especial de Einstein. El tiempo fue tratado más o menos como una cuarta dimensión por Minkowski, casi como el espacio. Pero no completamente igual. Hay una diferencia en la forma en que tiempo y espacio entran en la descripción del espacio-tiempo. Para ver la diferencia, usted tiene que considerar el concepto de distancia en el espacio-tiempo. La distancia entre dos puntos en el espacio se entiende bastante bien; significa la longitud de una re-

gla que conecta los dos puntos en una línea recta. La distancia en el tiempo es también fácil: el intervalo entre dos sucesos es simplemente la diferencia de tiempo que señala un reloj en reposo en el sistema de referencia de interés. Pero ¿cómo va usted a mezclar los dos cuando espacio y tiempo se unen en un espacio-tiempo unificado?

Suponga que usted quiere conocer el intervalo espacio-temporal entre Nueva York a la una en punto y Londres a las dos en punto. Minkowski dio la regla que usted necesita para calcular esto. Primer paso: tome la diferencia de tiempos y multiplíquela por la velocidad de la luz. Esto convierte unidades de tiempo en unidades de espacio. Así, un segundo se convierte en 300.000 kilómetros (puesto que la luz tiene una velocidad de 300.000 kilómetros por segundo). Segundo paso: eleve el resultado al *cuadrado*. Tercer paso: eleve al *cuadrado* la distancia en el espacio (en kilómetros). Cuarto paso: *reste* el primer número del segundo. Esto es algo inusual. Normalmente cuando se combinan distancias se utiliza la suma, pero cuando está involucrado el tiempo hay que restar, un procedimiento que es la clave de nuestros intereses. Paso final: saque la raíz cuadrada. Usted tiene ahora el intervalo entre dos sucesos en el *espacio-tiempo*, expresado en kilómetros.

Permítanme poner un ejemplo. Puesto que la velocidad de la luz es tan grande, una fracción minúscula de tiempo (por ejemplo, un segundo) equivale a una tremenda cantidad de espacio (300.000 kilómetros), de modo que, para hacer el ejemplo interesante, calcularé la distancia espacio-temporal entre la Tierra a la una en punto y algo muy lejano —el Sol— a la 1:05 p.m. La distancia Tierra-Sol es de 150 millones de kilómetros, de modo que al elevarla al cuadrado da 22.500 billones de kilómetros cuadrados. Cinco minutos multiplicados por la velocidad de la luz da 90 millones de kilómetros, y elevando esto al cuadrado se obtiene 8.100 billones de kilómetros cuadrados. Ahora tenemos que hacer la resta crucial: 22.500 billones menos 8.100 billones es igual a 14.400 billones. Finalmente, tomando la raíz cuadrada obtenemos 120 millones de kilómetros para el intervalo *espacio-temporal* entre estos dos sucesos. Nótese que esto es *menor* que la distancia espacial en 30 millones de kilómetros.

Obviamente, cuanto más grande es el intervalo temporal entre los dos sucesos, más pequeña es la respuesta final que se obtendrá. Si consideráramos que el segundo suceso ocurre a la 1:08 p.m., calcularíamos un intervalo espacio-temporal de sólo 42 millones de kilómetros en lugar de lo anterior. Con una diferencia temporal de 8 1/3 minutos, el intervalo espacio-temporal se reduciría realmente a cero. Esto resulta una sorpresa. ¿Cómo es posible que dos sucesos separados tanto en el espacio como en el tiempo, puedan tener una separación *nula* en el espacio-tiempo? Un modo de ver cómo es esto posible consiste en notar que la respuesta cero ocurre en este ejemplo cuando la diferencia de tiempo es exactamente igual al tiempo que tarda la luz en viajar entre la Tierra y el Sol. ¿Recuerdan a las dos gemelas, Ann y Betty? El viaje de Betty necesitaba cada vez menos tiempo, en su sistema de referencia, cuanto más se acercaba

a la velocidad de la luz. A la misma velocidad de la luz, el tiempo se detenía. La teoría de la relatividad no permite a Betty alcanzar esta velocidad, pero un pulso de luz puede hacerlo. Desde el punto de vista del pulso no transcurre ningún tiempo en absoluto mientras, en nuestro sistema de referencia, atraviesa el sistema solar. Está aquí y está allí —¡instantáneamente! Para la luz, *no hay* ninguna separación entre la Tierra a la 1:00 p.m. y el Sol a la 1:08 $\frac{1}{3}$ p.m.

Las dificultades llegan cuando la diferencia temporal es mayor que 8 $\frac{1}{3}$ minutos. Supongamos que se toma 1:10 p.m. El tiempo al cuadrado es ahora 32.400 billones. Esto es *mayor* que los 22.500 billones de los que tenemos que restarlos, de modo que el resultado es un número *negativo*: -9.900 billones. Pero ahora nos enfrentamos al paso final: sacar la raíz cuadrada para encontrar la distancia espacio-temporal. Sacar la raíz cuadrada de un número negativo significa que obtenemos un número imaginario como respuesta. No hay que asombrarse por eso. Físicamente, si la distancia espacio-temporal es imaginaria, ello significa simplemente que los puntos están más separados en el tiempo de lo que lo están en el espacio. El ejemplo más sencillo es el de dos sucesos sucesivos en el mismo lugar. Aquí hay entonces una separación espacial *nula*, de modo que la respuesta tiene que ser imaginaria. Por ejemplo, Nueva York a la 1:00 p.m. y Nueva York a la 1:05 p.m. están separados por 90.000.000 *i* kilómetros.

El hecho de que *i* aparece cuando calculamos algunos intervalos espacio-temporales pero no cuando calculamos otros es un signo de que el espacio y el tiempo no se mezclan demasiado íntimamente. La *i* señala intervalos temporales, mientras que la ausencia de *i* significa que estamos tratando con separaciones espaciales: hay una clara diferencia. Así, incluso si el espacio de Einstein y el tiempo de Einstein están entrelazados en el espacio-tiempo de Minkowski, el espacio sigue siendo espacio y el tiempo sigue siendo tiempo. El tiempo puede ser la cuarta dimensión, pero no es una dimensión *espacial*, como nos dice la *i*. Si la geometría del espacio de Minkowski tiene la curiosa forma a que me referí en el capítulo 2 es porque las distancias espacio-temporales se hacen pequeñas cuando combinamos separaciones espaciales y temporales cerca de la velocidad de la luz.

Ahora diré algo sobre el tiempo imaginario. Si multiplicamos intervalos temporales por *i*, entonces ya no son números imaginarios sino números reales, exactamente igual que los intervalos espaciales. Esto se debe a que *i* multiplicado por un número imaginario da un número real (recuérdese que, $i \times i = -1$). De este modo, si adoptamos la ficción de que los intervalos temporales son números imaginarios, entonces espacio y tiempo se hacen idénticos en lo que respecta a las reglas del espacio de Minkowski, y el tiempo es realmente una cuarta dimensión del espacio.

Por supuesto, el mundo no es realmente así, pero la idea de Hawking es que puede haber sido así una vez. (En la cita que encabeza este capítulo, Hawking incide en una creencia de que quizá el mundo es realmente así incluso hoy.

Yo tengo que discrepar.) Concretamente, el tiempo podría haber sido imaginario (es decir, precisamente como el espacio) cerca del big bang. Esta idea no salió del aire. Las cantidades imaginarias brotan por todas partes en la física cuántica, y a veces provocan dificultades matemáticas. Durante años los físicos han trapeado ocasionalmente tratando artificiosamente el tiempo como si fuera imaginario, de modo que pueden acabar sus cálculos en lugar de quedarse bloqueados. A veces es simplemente un dispositivo dudoso que de todas formas puede dar la respuesta correcta; a veces puede ser justificado por una teoría más profunda. En el caso de la aplicación de la física cuántica a la cosmología, proyecto que emprendieron Hartle y Hawking, hay en realidad alguna justificación. Vuelvo a señalar que la incertidumbre cuántica tiene el efecto de emborronar o introducir una borrosidad en todas las cantidades medibles a escala microscópica. Esto incluye el espacio y el tiempo. Cuando se funden como espacio-tiempo puede suceder que la borrosidad cuántica emborrona algunos fragmentos de espacio y algunos fragmentos de tiempo. En otras palabras, los intervalos temporales podrían ser indistinguibles de los intervalos espaciales: de ahí el «tiempo imaginario». El emborronamiento y la combinación de espacio y tiempo pasan por supuesto inadvertidos en la vida diaria. Está limitado a intervalos minúsculos (alrededor de 10^{-33} centímetros de espacio y 10^{-43} segundos de tiempo). De todas formas, si ocurre, altera espectacularmente la naturaleza del problema del Primer Suceso.

El emborronamiento cuántico no es algo discontinuo: el tiempo puede estar un poco emborronado o muy emborronado, lo que significa que puede ser poco espacializado o muy espacializado. Podemos imaginar una secuencia continua donde el tiempo «empieza» como espacio y gradualmente «se convierte» en tiempo. (O, en el lenguaje de tiempo invertido, el tiempo se desvanece gradualmente a medida que uno se remonta hacia el origen.) Este enunciado supone varios abusos de lenguaje. El tiempo es siempre tiempo; no «se convierte» en algo. Más precisamente, lo que llamamos tiempo puede haber tenido una vez algunas de las propiedades que normalmente asociamos con el espacio. Y «gradualmente» significa durante simplemente 10^{-43} segundos, ¡lo que es bastante rápido para la mayoría de los patrones! En cualquier caso, en esta teoría no hay origen singular del tiempo, no hay un «arranque» abrupto en $t = 0$.

Por el contrario, el tiempo *no* se extiende infinitamente hacia atrás. Está ciertamente acotado por el big bang en la teoría de Hartle-Hawking, como lo está en la teoría convencional, donde hay una singularidad espacio-temporal que bloquea al universo físico en esa vía. Muchas personas suponen erróneamente que Hawking ha suprimido el origen del universo. Esto es completamente erróneo. En esta teoría el tiempo está definitivamente acotado en duración, pero no hay ni un Primer Suceso ni un origen repentino, singular y sobrenatural. Y excepto la extrañeza mencionada alrededor de los 10^{-43} segundos, las secuelas del big bang son prácticamente las mismas que antes.

Estas ideas pueden aplicarse también al fin del universo. Podemos imagi-

nar que el tiempo no continuará para siempre, sino que se desvanecerá continuamente, espacializándose, de la misma forma que se originó. Entonces no habría Suceso Último, no habría Instante Final, no habría Nanosegundo del Juicio Final. Pero el futuro estaría también acotado.

Usted debe entender que la descripción que he dado del trabajo de Hartle y Hawking tiene una multitud de pecados. En particular, el simple enunciado de que el tiempo «emerge» continuamente a partir de una dimensión de espacio es bastante fácil de establecer en palabras, pero el mecanismo de dicha emergencia está lejos de ser claro. De hecho, como comenté en el capítulo anterior, aún es un misterio profundo cómo una noción del tiempo (y el espacio) bien definida emergió de la borrosidad cuántica del big bang.

Relojes imaginarios

Todo esto está muy bien, se queja el escéptico, para usted que flota en conceptos matemáticos abstractos como el tiempo imaginario y el tiempo cuántico borroso, pero ¿qué conexión, si la hay, tienen estos tiempos teóricos con el tiempo honesto, «real» cotidiano —el tiempo humano si usted quiere? ¿Cómo llega usted a medir el tiempo imaginario?

Cuando los físicos y los cosmólogos usan la palabra «tiempo» en relación con el universo muy primitivo, están haciendo abstracciones, extrapolaciones e idealizaciones de varias formas. En primer lugar, ningún reloj conocido puede medir intervalos de tiempo menores que aproximadamente una billonésima de billonésima de segundo. Es posible que existan relojes con mejor resolución temporal, pero todavía no los hemos descubierto. Para discutir duraciones menores que estos (decididamente breves) intervalos, usted tiene que suponer: *a*) que el tiempo es realmente continuo en escalas más cortas, y *b*) hay al menos algún proceso físico periódico que sucede más rápidamente que esto y que puede ser utilizado para definir un reloj. Además, su reloj tendría que ser pequeño. Si ningún efecto físico puede viajar a mayor velocidad que la luz, entonces un reloj no puede medir el tiempo de forma más precisa que el tiempo que necesita la luz para viajar entre los componentes de dicho reloj. En una billonésima de billonésima de segundo la luz viaja una distancia menor que el tamaño de un núcleo atómico. De modo que el reloj tendría que ser algún tipo de entidad subnuclear, tal como una partícula. Luego están todos aquellos delicados problemas sobre la medida del tiempo cuántico con relojes cuánticos que discutí en el capítulo 7.

Incluso suponiendo que puede definirse (aproximadamente) un reloj apropiado para hacer la crónica hipotética de la temprana historia del universo, usted tiene que suponer que permanece en reposo en un sistema de referencia privilegiado en el que se mide el tiempo cósmico. Esto es ciertamente una ficción.

Si usted imagina las experiencias de, digamos, una partícula subatómica en el universo primitivo caliente y denso, sufrirá innumerables impactos de alta velocidad y pasará la mayor parte de su tiempo viajando a velocidad próxima a la de la luz, recibiendo golpes de todas las direcciones. En el sistema de referencia de la partícula habrá un enorme efecto de dilatación temporal, lo que significa que el tiempo que experimenta nuestro «reloj» será una medida enormemente extendida del tiempo cósmico «real».

Más que imaginar algún tipo de reloj hipotético y muy artificial usado para calibrar la actividad del cosmos primordial, podríamos volver del revés el problema y utilizar la *actividad* para calibrar el *tiempo*. En otras palabras, podríamos definir la unidad de tiempo como la duración requerida para que ocurra algún tipo de actividad física. Por ejemplo, la duración media entre colisiones de partículas es una medida posible de actividad. Puesto que el universo se hace más caliente y los movimientos de partículas se hacen más frenéticos a medida que se acerca al origen, esta medida del tiempo se estirará a un ritmo creciente cuando remontamos el tiempo hacia atrás; puede ser incluso infinita, dependiendo de cómo eran las cosas realmente cerca del origen. Si fuera así, entonces en cierto sentido (desde el punto de vista de la partícula) ¡el universo habría existido desde siempre!

Pero ¿cómo se relacionan estos relojes hipotéticos con el tiempo humano, el tiempo tal como lo experimentamos nosotros?

Bien. Como no había seres humanos justamente después del big bang, esta pregunta es algo ambigua. Usted puede preguntar qué tipo de tiempo experimentan *ahora* los seres humanos, y encontrar un reloj que mide más o menos este tiempo humano contemporáneo (por ejemplo, el reloj de mi pared); luego puede usted imaginar un reloj hipotético que coincide con este reloj pero que de alguna manera hubiera sobrevivido mágicamente sano y salvo en las condiciones extremas del big bang. Por lo que se refiere a esta escala de tiempo, el universo empezó aparentemente hace varios miles de millones de años.

Sin embargo, usted podría ver las cosas de forma un poco diferente. Después de todo ¿qué es lo que determina la medida del tiempo humano? Este es un tema importante que retomaré en el capítulo 12, pero de momento permítanme hacer simplemente el comentario de que nuestra percepción del tiempo tiene evidentemente algo que ver con nuestros procesos cerebrales. Si nuestros cerebros funcionasen al doble de su velocidad real, entonces un segundo parecería lo que ahora nos parecen dos.

La velocidad de los procesos físicos depende de la temperatura: cuanto más caliente está el sistema, más rápidamente suceden las cosas —y en consecuencia los pensamientos. Por supuesto, la temperatura del cerebro humano está regulada dentro de límites muy precisos, pero podemos imaginar seres sensibles que viven a temperaturas mayores con un ritmo metabólico mayor y que

experimentan un tiempo subjetivo más rápido comparado con nosotros. Si (¡de algún modo!) los procesos frenéticos que ocurrían en el universo primitivo soportaban algún tipo de actividad mental, entonces el tiempo subjetivo de este ser primordial crecería hacia el infinito a medida que se acercaba al origen del universo. En otras palabras, si usted mide el tiempo que ha transcurrido desde el big bang en términos de un hipotético tiempo *sensible* (la sensibilidad del ser primordial, no la nuestra), éste es probablemente infinito.

El mismo estado de cosas prevalecería si el universo fuera a colapsar en un big crunch. A medida que se acercase al final, el universo se haría cada vez más caliente y el ritmo de actividad crecería, quizá sin límite. El físico Frank Tipler ha especulado (libremente) sobre un supercerebro en el futuro lejano que se extiende por el espacio hasta que abarca el universo entero.³ Este individuo cósmico podría ser capaz de pensar un número infinito de pensamientos diferentes antes de que llegue el crunch final, aprovechándose de la actividad física creciente que utiliza en sus propios procesos cerebrales. A medida que se aproximara el crunch, pensaría cada vez más rápido. El que la velocidad de los pensamientos del supercerebro pudiera crecer literalmente sin límites depende crucialmente (como se explicó en el capítulo 5) de las limitaciones de la física fundamental, tales como la velocidad de la luz y el emborronamiento cuántico. Tipler ha investigado esto. Él encuentra que para la mayoría de los modelos de universo colapsante, tales limitaciones obstaculizarían la búsqueda del supercerebro de una potencia de pensamiento sin límites. Pero existen ciertos modelos complicados en los que pueden evitarse las limitaciones conocidas. Tipler afirma que el superser viviría entonces literalmente para siempre, en el sentido de que su tiempo *subjetivo* sería infinito, incluso si, en una extrapolación de tiempo humano, su existencia está acotada en el futuro.

El escenario inverso ha sido discutido por Freeman Dyson, quien imagina una clase diferente de seres sensibles llevando una triste y desesperada existencia durante billones de años, cuando el universo se ha hecho gélido y se está aproximando a una muerte térmica.⁴ Si el universo no colapsa, como Tipler supone, sino que continúa expandiéndose para siempre, entonces todas las fuentes de energía conocidas se agotarán, y nuestros descendientes supervivientes se frenarán inexorablemente, tanto física como mentalmente. Se verán obligados a recoger residuos energéticos para combustible en dominios cósmicos cada vez mayores, y conservarse en largos periodos de hibernación para hacerlos durar. En este caso, el tiempo subjetivo de estos individuos acuciados y de pensamiento lento se haría cada vez más estirado con respecto al tiempo cósmico. (Usted puede saber más sobre las aventuras del superser achicharrado de Tipler y de los recogedores de fósiles congelados de Dyson en mi libro *The Last Three Minutes*.)

Tipler y Dyson ofrecen imágenes del fin del tiempo en abrupto contraste: una en la que la actividad mental se acelera y el tiempo se frena, y otra en la que la actividad mental se frena y el tiempo se acelera. Pero hay también una tercera posibilidad. El tiempo podría invertirse.

La flecha del tiempo

Todos los cambios, y la flecha del tiempo, apuntan en la dirección de la corrupción. La experiencia del tiempo es el engranaje de los procesos electroquímicos en nuestros cerebros con esta deriva sin objetivo hacia el caos a medida que nos hundimos en el equilibrio y la tumba.

PETER ATKINS

Coger la onda

Uno de los científicos más interesantes y poco convencionales de los años de posguerra fue David Bohm, un físico teórico de origen norteamericano que trabajó principalmente en Londres, en el Birkbeck College. Me encontré por primera vez con Bohm cuando yo era un ávido e inquisitivo estudiante de doctorado de veintitrés años en la Universidad de Londres. El propósito del encuentro era discutir un aspecto de mi proyecto de tesis que se relacionaba con una persistente paradoja acerca de la naturaleza del tiempo. Expresada crudamente, la paradoja es como sigue. Damos por hecho que, cuando una estación de radio transmite una señal, nosotros recibimos la señal en el aparato de nuestra casa *después* de que ha sido enviada por el transmisor. El retraso no es muy largo —simplemente una fracción de segundo de un punto a otro de la Tierra— de modo que normalmente no somos conscientes de ello. Pero una conversación telefónica transmitida vía satélite puede introducir un retardo temporal apreciable. En cualquier caso, la cuestión es que nunca oímos la señal de radio *antes* de que sea enviada.

¿Por qué tendríamos que hacerlo?, puede preguntar usted. Después de todo, los efectos no preceden a las causas. El problema que había en la raíz de mis preocupaciones proviene de mediados del siglo XIX, cuando James Clerk Maxwell escribió sus famosas ecuaciones que describen la propagación de ondas electromagnéticas tales como las de luz y las de radio. Hizo esto mientras tra-

bajaba en el King's College de Londres, tan sólo a 2 o 3 kilómetros de Birkbeck. La teoría de Maxwell predice que las ondas de radio viajan a través del espacio vacío a la velocidad de la luz. Lo que las ecuaciones de Maxwell no nos dicen, sin embargo, es si estas ondas llegan antes o después de que sean transmitidas. Son indiferentes a la distinción entre pasado y futuro. Según las ecuaciones, es perfectamente admisible que las ondas de radio viajen hacia atrás en el tiempo tanto como hacia adelante. Dada una pauta de actividad electromagnética, tal como la que corresponde a ondas de radio que se extienden por el espacio procedentes de un transmisor, la pauta invertida en el tiempo (en este caso, ondas convergentes) está igualmente permitida por las leyes del electromagnetismo.

En la jerga de la física, las ondas que viajan hacia adelante en el tiempo se denominan «retardadas» (puesto que llegan más tarde) y las ondas que viajan hacia atrás en el tiempo se denominan «avanzadas» (puesto que llegan antes). Debido a que no advertimos ondas de radio avanzadas, u ondas electromagnéticas de cualquier tipo avanzadas, las soluciones avanzadas de las ecuaciones de Maxwell simplemente se suelen descartar como «no físicas». Pero ¿qué justificación tenemos para hacer eso? ¿Hay otra ley de la física, además de las leyes del movimiento ondulatorio, que afirma: «No hay soluciones avanzadas en *este* universo!»? Si no, ¿qué otra cosa podría llevar a la naturaleza a preferir ondas retardadas sobre ondas avanzadas, dado que ambas variedades cumplen aparentemente con las leyes del electromagnetismo?

Siempre me he sentido atraído por este enigma desde que asistí a una reunión de la Royal Society en 1967, en la que el astrónomo de Cambridge Fred Hoyle presentó su propia solución al enigma de la asimetría temporal. Hoyle estaba convencido de que la respuesta residía en la forma en que se expande el universo. La sugerencia de que lo que sucede en mi aparato de radio está ligado de alguna forma al destino del cosmos me pareció decididamente cauteladora, y decidí trabajar en ello. Centré mis investigaciones en el sistema más simple que podía transmitir y recibir ondas electromagnéticas: un simple átomo. Si una onda electromagnética incide sobre un átomo en su estado normal, o fundamental, el átomo puede ser inducido a hacer un salto cuántico a un estado excitado absorbiendo un fotón de la radiación electromagnética. Esto corresponde a una antena «receptora» de la onda. Recíprocamente, si un átomo está inicialmente en un estado excitado, puede hacer una transición cuántica a su estado fundamental y emitir un fotón. Esto corresponde a la transmisión. En el nivel cuántico, entonces, el proceso parece bastante simétrico: el inverso en el tiempo de un átomo que absorbe un fotón es un átomo que emite un fotón.

De hecho, Einstein había apelado tiempo atrás a esta simetría entre emisión y absorción de fotones para calcular el ritmo al que un átomo excitado emitiría espontáneamente un fotón en el espacio libre. Hizo esto en 1916, poco después de su ruptura matrimonial con Mileva, y mucho antes de que la mecánica cuántica hubiera sido completamente desarrollada. Su ingenioso cálculo incluye tam-

bién una expresión para el ritmo al que un átomo radiará fotones si es bombardeado por otros fotones, un proceso llamado «emisión estimulada», que iba a convertirse en el principio que subyace en el láser desarrollado casi medio siglo después.

La simetría entre emisión y absorción de fotones por los átomos descansa, sin embargo, en una hipótesis oculta. Cuando, siguiendo a Einstein, usted calcula el ritmo al que un átomo no excitado absorberá fotones, los libros de texto le piden que suponga que no hay ninguna correlación entre los fotones que llegan al átomo. En el lenguaje de las ondas esto significa que todas las ondas electromagnéticas aleatorias individuales que corresponden a estos fotones están completamente desordenadas: sus fases están distribuidas al azar. Yo quería saber de dónde procedía esta hipótesis de fases aleatorias, tan crucial para establecer la simetría temporal entre emisión y absorción de fotones por los átomos. De modo que fui a ver a Bohm.

Aunque llevaba camino de convertirse en una figura de culto con seguidores en todo el mundo, Bohm era un hombre más bien retraído. Tenía inclinación a agitarse cuando entraba en calor con su tema. Su habla era correcta, pero en su excitación hablaba cada vez más rápido, tendiendo a cortar palabras a medida que avanzaba, de modo que tenías que concentrarte mucho para seguir su conversación. Muchos años después, tuve ocasión de entrevistarle en un estilo deliberadamente combativo para la BBC, y realmente se agitó mucho. Me preocupaba que los oyentes se quedasen sin entender nada de las palabras técnicas que él pronunciaba a un ritmo acelerado. Una preocupación bastante más seria era que le diera un ataque al corazón en el estudio, ya que todavía se estaba recuperando de una operación de un triple by-pass. De hecho, vivió varios años más.*

Aunque Bohm tenía fama por sus escritos y obras filosóficas, particularmente entre lectores de inclinación mística, él era una figura curiosamente aislada entre la comunidad física. Quizá era mejor conocido por su libro de texto de los años cincuenta sobre mecánica cuántica. Pero muy pronto decidió que a él no le gustaba la mecánica cuántica tal como se formulaba convencionalmente, *à la* Bohr. De modo que apareció Bohm versus Bohr. Bohm asumió así la antorcha solitaria del disenso cuántico donde Einstein la había dejado en su lecho de muerte. Con la ayuda de una pequeña banda de devotos, especialmente su colega de Birkbeck Basil Hiley, Bohm buscó una teoría en la que los aspectos aparentemente aleatorios e impredecibles de los fenómenos cuánticos tenían su origen en ciertos procesos deterministas en un nivel más profundo.

Bohm sostenía la idea fascinante según la cual, aunque algunos aspectos del mundo podrían parecer complicados, e incluso aleatorios, por debajo de ellos había un orden oculto, de algún modo «plegado». En años posteriores lo llamó «el orden implicado». Solía realizar una demostración entretenida e ins-

* Bohm murió de un ataque cardíaco en octubre de 1992. (N. del t.)

tructiva del orden plegado utilizando una gota de tinta depositada en una jarra de glicerina. La jarra tenía una manivela que podía utilizarse para remover la tinta en la glicerina, de modo que al cabo de algún tiempo parecía uniformemente grisácea. Pero el desorden aparente de la tinta es sólo ilusorio, porque, si se gira la manivela en sentido contrario, entonces —sorpresa, sorpresa— la tinta se «desmezcla» de la glicerina y vuelve a su ordenación original como una gota. En el estado emborronado, el orden de la tinta estaba simplemente oculto: estaba «plegado». ¿Pudiera darse el caso, cavilaba yo, de que las fases aleatorias de las ondas electromagnéticas —lo que me intrigaba en mi trabajo de tesis sobre la naturaleza del tiempo— representara un tipo de orden plegado o implicado?

El Birkbeck College estaba situado a unos pocos cientos de metros del Departamento de Física del University College, donde yo estaba estudiando, pero sólo hice la peregrinación una vez. Expliqué cuidadosamente mi proyecto a Bohm, quien escuchó cortésmente. Con cierto azoramiento, por temor a estar planteando al gran hombre una cuestión estúpida, me atreví a preguntar: ¿Cuál es el origen de la hipótesis de las fases aleatorias? Para mi asombro y pesar, Bohm simplemente se encogió de hombros, y masculló: «¿Quién sabe?».

«Pero usted no puede hacer muchos progresos en física sin hacer esa hipótesis», protesté.

«En mi opinión —replicó Bohm—, ¡el progreso en la ciencia se hace normalmente *abandonando* hipótesis!»

Esto parecía un golpe humillante en esa época, pero siempre he recordado aquellas palabras de David Bohm. La historia demuestra que son correctas. En efecto, a menudo los progresos mayores en ciencia vienen cuando el paradigma ortodoxo choca con un nuevo conjunto de ideas o alguna nueva evidencia experimental que no encaja en las teorías dominantes. Entonces alguien desecha una hipótesis estimada, quizá una que se ha dado por supuesta y no se ha establecido explícitamente, y repentinamente todo se transforma. Ha nacido un nuevo y más acertado paradigma. Esto sucedió cuando Einstein formuló la teoría de la relatividad especial. Todo el mundo había supuesto, sin pensar siquiera sobre ello, que el tiempo es absoluto y universal: la totalidad de la física clásica estaba fundada sobre esta creencia. Pero era errónea —una hipótesis injustificada que puso a las leyes del movimiento de Newton en conflicto con el electromagnetismo y el comportamiento de las señales luminosas. Cuando Einstein abandonó la hipótesis, todo encajó en su lugar.

En cualquier caso, salí de mi encuentro con Bohm aún perturbado por la hipótesis de las fases aleatorias, de modo que decidí buscar lo que Einstein tenía que decir sobre la cuestión. En 1909, aproximadamente en la época en que había sido nombrado profesor asociado en la Universidad de Zurich, Einstein publicó una nota corta con Walther Ritz, un físico joven pero enfermizo de la Universidad de Gotinga en Alemania.¹ Aunque favorable a la teoría de la relatividad, Ritz pensaba que Einstein no entendía completamente la naturale-

za de la radiación electromagnética. Estaba convencido de que se había pasado por alto una ley de la naturaleza que favorecía las ondas electromagnéticas retardadas y eliminaba la variedad avanzada. Ritz llamó a esto la «teoría de emisión de la luz», porque distinguía entre la emisión y su inversa en el tiempo: la absorción. Él creía que esta era la explicación para la direccionalidad en el tiempo que observamos en la vida diaria.

Einstein discrepaba. Insistía en que las leyes del electromagnetismo deben ser simétricas con respecto al tiempo. La asimetría de las ondas retardadas procede, afirmaba él, de consideraciones estadísticas. Para ver lo que Einstein entiende por esto, imaginemos que se arroja una piedra a un estanque. Eso crea rizos que se extienden a partir del punto de impacto y eventualmente desaparecen en las aguas poco profundas, perdidas entre los juncos ondulantes. Estas son ondas retardadas. Una película de esta secuencia, pasada al revés, mostraría ondas avanzadas —rizos que aparecen en los bordes del estanque y convergen hacia un punto en una ordenada estructura circular. El último escenario no es imposible, estrictamente hablando. Es concebible, aunque muy poco probable, que el movimiento de los juncos se las arreglara cooperativa y conspirativamente de tal forma que creara precisamente la mezcla correcta de pequeños rizos para producir una pauta exactamente circular de ondas convergentes. La conspiración implica que muchas perturbaciones ondulatorias independientes se coreografían para llegar al centro del estanque precisamente al mismo tiempo y con un paso perfecto —es decir, con fases correlacionadas. En realidad, nosotros esperaríamos que el movimiento al azar de los juncos fuera básicamente no correlacionado, y que las fases de las ondas fueran aleatorias.

Traduciendo esto en términos electromagnéticos, concluimos que una onda avanzada no es imposible, sino sólo extraordinariamente improbable. Imaginemos ondas de radio procedentes de un transmisor que se propagan en las profundidades del espacio, donde algún día pueden ser absorbidas por polvo estelar o alguna otra materia difusa. La película invertida de esta secuencia de sucesos consiste en miríadas de minúsculas emisiones de radio procedentes de todo el cosmos que llegan coincidentemente, en el mismo instante, en fase exacta, a un punto de la Tierra. Aunque el material cósmico es ciertamente una fuente de ondas de radio, y la Tierra navega en este ruido electromagnético incidente, no hay correlación evidente entre ondas que emanan de, digamos, la dirección de Leo y las procedentes de Piscis. Esperar que la haya equivale a creer en una coordinación cósmica fundamental, por la que regiones ampliamente separadas del universo actúan cooperativamente para enviar hacia nosotros una radiación cuidadosamente sincronizada al unísono. Pero, en la práctica, las muchas ondas diferentes llegan con fases entre las que no hay ninguna correlación. Así pues, según Einstein, ¡el retardo de las ondas electromagnéticas deriva de la hipótesis de las fases aleatorias!

La naturaleza unidireccional en el tiempo de las radioondas y otras formas de radiación electromagnética sólo es parte de una elaborada matriz de fenó-

menos físicos que imprimen en el universo una flecha del tiempo. En la vida diaria no tenemos problemas para designar la dirección de esta flecha, porque estamos rodeados de procesos que parecen ser irreversibles —el envejecimiento humano, por poner uno. Pero el origen último de la flecha es un misterio sorprendente. En el capítulo 1, conté cómo Boltzmann creía que había encontrado la fuente de la flecha en la segunda ley de la termodinámica, sólo para ver cómo la base de su demostración era refutada por Poincaré. La relación entre la segunda ley y la flecha del tiempo fue ampliamente popularizada por Arthur Eddington en los años veinte, y desde entonces ha sido un engañoso tema de investigación. Aún no tenemos una respuesta definitiva a este misterio.

El mandamiento de que el calor debe fluir siempre en una dirección de lo caliente a lo frío está claramente en la raíz de muchas manifestaciones «cotidianas» de la flecha. En una escala cósmica, esta ley describe un universo obligado inexorablemente a seguir el camino de la degeneración, deslizándose hacia la muerte térmica final. El coste de combustible para el Sol, dicho sea de paso, es de aproximadamente un billón de billones de dólares por segundo, según precios de 1993. De esto, todo salvo unos pocos miles de millones se pierde en las profundidades del espacio, malgastado; el resto calienta los planetas. Usted no puede recuperar esta energía: se pierde irremisiblemente. Mientras el sistema solar asiste al rítmico fluir del tiempo en miles de millones de años, ciclo tras ciclo, un reloj unidireccional late en el corazón del Sol, y hace el cálculo del combustible. No hay ciclos aquí; sólo un coste de energía en aumento y unas reservas de combustible que disminuyen: irreversible, finita, inevitablemente. Con el tiempo el Sol morirá, como lo harán todas las estrellas y quizá el universo como un todo —a menos que colapse antes en un big crunch.

Señales del futuro

En 1941, John Wheeler, un físico de Princeton, tomó a su cargo a un brillante joven estudiante de Nueva York llamado Richard Feynman, un hombre de viva personalidad, tocado por el genio y destinado a convertirse en uno de los científicos más conocidos y más queridos de Norteamérica. Confieso que siempre me ha admirado la idea de la colaboración entre estos dos estadounidenses, tan diferentes como el día y la noche. Wheeler es un hombre refinado, aristocrático, de buenas maneras e impecablemente correcto. Un colega dijo una vez de Wheeler que es un perfecto caballero dentro del que hay un perfecto caballero. Feynman, en cambio, era famoso por su carácter insolente, irreverente, mujeriego, y bromista, y por tocar los bongos.

Pese a lo poco probable que parecía que hicieran buena pareja, Wheeler y Feynman formaron un equipo formidable. Disfrutaron de una fructífera y cordial relación de trabajo que se prolongó durante muchos años. En vísperas de la segunda guerra mundial, antes de que ambos se involucrasen en el proyec-

to Manhattan de la bomba atómica, decidieron investigar la naturaleza del tiempo y el comportamiento de las ondas electromagnéticas. Wheeler quería determinar qué sucedería si las ondas electromagnéticas avanzadas y retardadas fueran producidas siempre en pie de igualdad. Esto significaría, entre otras cosas, que un transmisor de radio enviaría la mitad de su potencia ondulatoria hacia el futuro, y la mitad hacia el pasado. Parecía un ejercicio disparatado y sin sentido.

En ciencia, sin embargo, la marca de una idea realmente buena es que lo que puede parecer una locura puede resultar un triunfo. Usted pensará que uno de ellos o ambos conjeturaron la respuesta por adelantado o que pudieron haber malgastado una gran cantidad de tiempo atascados en cálculos complejos. Para la mayoría de la gente, sin embargo, el resultado es una sorpresa total: ¡resulta que todas las ondas avanzadas desaparecen de la vista! La razón es la siguiente. Cuando las ondas retardadas de una fuente concreta en la Tierra, habiéndose difundido por el universo, encuentren materia, serán absorbidas. El proceso de absorción implica la perturbación de cargas eléctricas por las ondas electromagnéticas, y como resultado se produce radiación secundaria por parte de aquellas cargas lejanas. Esta radiación también es mitad retardada y mitad avanzada, de acuerdo con la hipótesis de la teoría. La componente avanzada de esta radiación secundaria viaja hacia atrás en el tiempo, y parte de ella llega a la fuente en la Tierra. Naturalmente, esta onda secundaria es tan sólo un pálido eco de la onda original, pero una miríada de tales pálidos ecos de todo el universo puede sumar un efecto sustancial. Wheeler y Feynman demostraron que, bajo ciertas circunstancias, la radiación secundaria avanzada puede duplicar la intensidad de la onda primaria retardada, llevándola a plena intensidad, mientras que también cancela la onda avanzada de la fuente original por interferencia destructiva.² Al final, cuando se suman todas las ondas y sus ecos, hacia atrás y hacia adelante en el tiempo, el resultado neto es remedar una pura radiación retardada. ¿Quizá es *esta* la razón para la flecha del tiempo en el comportamiento de las ondas electromagnéticas?

Para que funcione el ingenioso hallazgo de Wheeler y Feynman es esencial que la materia en el universo sea suficientemente importante para absorber toda la radiación que fluye al espacio. En otras palabras, el universo debe ser opaco a todas las ondas electromagnéticas. Este es un requisito indispensable. Frente a ello, el universo parece casi completamente transparente a muchas longitudes de onda. En realidad, no seríamos capaces de ver galaxias distantes si no lo fuera. Por el contrario, no hay límite de tiempo para el proceso de absorción, porque los ecos avanzados (hacia atrás en el tiempo) pueden viajar hacia atrás en el tiempo y en el espacio desde el futuro muy lejano tan fácilmente como desde el futuro próximo. De modo que el éxito de la teoría depende de si una onda electromagnética saliente será *finalmente* absorbida en algún lugar del cosmos, quizá incontables eones más tarde.

Por supuesto, no podemos saber si esto será así, porque no podemos predecir el futuro, pero podemos extrapolar las tendencias actuales en el universo

y hacer una conjetura válida. Cuando se hace esto, el resultado parece ser negativo —es decir, el universo *no* es completamente opaco. Esto parece acabar con la idea de Wheeler-Feynman, pero sigue habiendo una posibilidad más intrigante. Supongamos que hay suficiente materia en el universo para absorber la mayor parte de la radiación, pero no toda ella. Según Wheeler y Feynman, esto llevaría a una cancelación incompleta de las ondas avanzadas. ¿Podría darse el caso de que *existan* algunas ondas avanzadas «viajando hacia el pasado» —o dicho de otra forma, viniendo del futuro— pero con una intensidad tan baja que todavía no las hemos detectado?

En 1972, un astrofísico norteamericano llamado Bruce Partridge subió a la cima de una colina para verificar esta romántica conjetura.³ Llevó con él un transmisor de microondas con un gran cuerno en forma de cono. En noches despejadas durante agosto y septiembre, dirigió el cuerno hacia el cielo, teniendo cuidado de evitar la Vía Láctea, y conectó el transmisor. La antena lanzaba un haz de ondas electromagnéticas de 9,7 gigahertzios al espacio, en pulsos de un milisegundo. En los intervalos entre los pulsos, toda la señal de salida era dirigida hacia un absorbente cerrado unido al aparato. El sistema estaba así diseñado para interrumpir mil veces por segundo la transmisión de ondas de radio al universo —quizá para que sean absorbidas dentro de un billón de años— y llevarlas a una pantalla y a una absorción segura un instante más tarde. Partridge registró cuidadosamente la pérdida de potencia para ver si mostraba cualquier indicio de una variación de milisegundos. Luego repitió el procedimiento colocando una gran pantalla absorbente delante del cuerno, y comprobó que no había diferencia en comportamiento.

La teoría que subyace en el experimento es que si cualquier microonda estuviese siendo emitida hacia el pasado, entonces, desde un punto de vista «hacia adelante en el tiempo», esto representaría una potencia electromagnética que fluye *hacia* la antena en lugar de salir de ella. Tendría el efecto de suministrar alguna energía al aparato para ayudar a pagar la energía transportada al cuerno y emitida al espacio por las microondas normales «retardadas». Si estuviera sucediendo esto, habría una ligera diferencia en la pérdida de potencia cuando la antena estaba emitiendo hacia el espacio respecto a cuando estaba emitiendo hacia el absorbente cerrado. Por desgracia, Partridge no encontró ninguna huella de oscilaciones de milisegundo en la potencia de salida, dentro de un margen de una parte en mil millones. Evidentemente, la transmisión de radio hacia atrás en el tiempo, si existe, es extraordinariamente débil. Partridge estimó que sólo alrededor del 3 por 100 de la potencia sería absorbida por la atmósfera, y menos de un 1 por 100 por la galaxia: el resto se iría al gran vacío intergaláctico. El que estas ondas se absorban o no con el tiempo depende del futuro lejano del universo —incluso de su destino final— sobre el que sólo podemos teorizar. Podría ser que el universo *sea* un absorbente eficiente de microondas, y que la teoría de Wheeler y Feynman sea correcta. O puede significar que la teoría es simplemente falsa, y que el 100 por 100 de las ondas emitidas por las

antenas de microondas son retardadas. Cualquiera que sea el caso, el experimento de Partridge y una versión mejorada llevada a cabo unos años después por Riley Newman, son los únicos ejemplos de un experimento cosmológico (en contraposición a observación pasiva) en la historia de la ciencia.

Una propuesta bastante diferente para buscar efectos avanzados fue sugerida en 1969 por un físico de Oregón, Paul Csonka.⁴ Su experimento concierne a neutrinos más que a ondas electromagnéticas. El razonamiento aquí es que los objetos físicos adquieren su sentido de la dirección del tiempo interactuando con el mundo, de modo que las cosas que sólo interactúan débilmente pueden tener solamente un débil sentido de la orientación del tiempo. En el caso de los neutrinos, su interacción con la materia ordinaria es tan increíblemente débil que, según Csonka, pueden acabar por «extraviarse en el tiempo» por completo. Para darle una idea, un neutrino típico procedente del Sol (una fuente local importante) está tan poco afectado por la materia ordinaria del universo que es probable que viaje un millón de billones de billones de años-luz antes de ser dispersado o absorbido. El universo material es por ello casi enteramente invisible para él. Quizá, entonces, el neutrino no pueda «saber» de qué modo está fluyendo el tiempo en el ancho mundo, y por ello puede estar inclinado a «hacer las cosas hacia atrás» en ocasiones. O al menos eso supuso Csonka. Él sugirió echar una mirada cuidadosa a haces de piones. Estos son partículas subatómicas que se desintegran en neutrinos, entre otras cosas. Si Csonka tiene razón, un haz de piones no sólo creará un haz de neutrinos, sino que también «atraerá» una especie de haz de neutrinos en la sombra que queda detrás, que consiste en neutrinos «hacia atrás en el tiempo» que llegan a tiempo para que los piones se desintegren (el análogo en neutrinos a la radiación avanzada de Wheeler y Feynman). Estos neutrinos en la sombra podrían ser detectables, aventuraba Csonka. Lamentablemente, detectar cualquier tipo de neutrinos, en la sombra o no, es un reto formidable, como indica la debilidad de su interacción, y, por lo que yo sé, nadie ha tratado siquiera de buscarlos.

Según el escritor Paul Nahin, el propio Einstein se tomó un interés pasajero por la teoría de Wheeler y Feynman al seguir un seminario sobre el tema en la Universidad de Princeton.⁵ Señaló que la idea básica le había rondado durante años, y para demostrarlo desenterró un artículo del físico alemán Hugo Tetrode publicado en 1922. Lo que sólo demuestra que no hay nada nuevo bajo el Sol, incluso cuando se trata del propio tiempo.

Una cuestión de inversión temporal

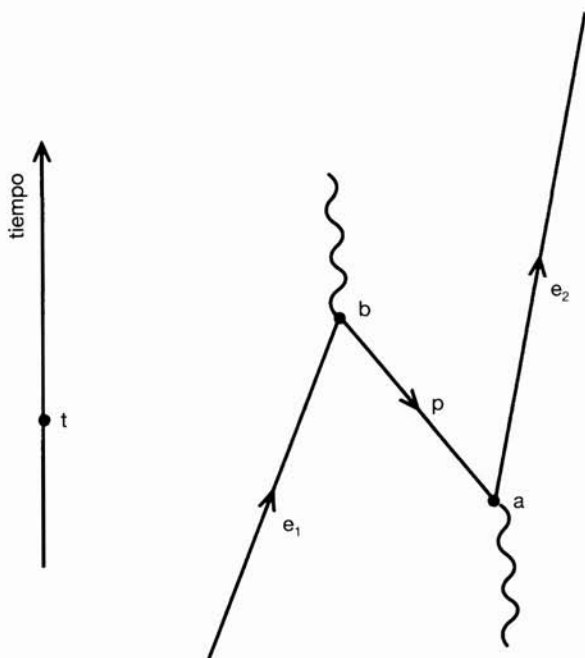
Poco después de que Wheeler y Feynman desarrollaran su curiosa teoría, Wheeler propuso a Feynman otra idea extraña que implicaba retroacción en el tiempo. Esta vez tenía que ver con la antimateria. El concepto de antimateria se remon-

ta a aproximadamente 1930 y a una famosa predicción de Paul Dirac, quien había estado tratando de fusionar la nueva mecánica cuántica con la teoría de la relatividad especial de Einstein. Dirac quería saber cómo se comportaría una partícula cuántica tal como un electrón cuando se movía a velocidad próxima a la de la luz. Descubrió una ecuación que parecía cumplir los requisitos, pero se sorprendió al encontrar que cada solución de la ecuación que describía a un electrón venía emparejada con una especie de solución especular que no parecía corresponder a ninguna partícula conocida. Tras mucho pensar, Dirac llegó a una hipótesis capital. Las soluciones «especulares», afirmó, corresponden a partículas que son idénticas a los electrones, salvo que sus propiedades están invertidas. Por ejemplo, en lugar de tener carga negativa, las partículas especulares deberían estar cargadas positivamente. En el plazo de uno o dos años, los «positrones» de Dirac se habían encontrado en chaparrones de rayos cósmicos. Realmente existen.

Los físicos llegaron a comprender con el tiempo que todo tipo de partícula subatómica en la naturaleza tiene una correspondiente antipartícula. Además de los antielectrones (aún llamados positrones) existen antiprotones, antineutrones y así sucesivamente. Hoy día estas antipartículas se producen rutinariamente en el laboratorio y son bien conocidas, pero en los años cuarenta eran todavía algo misterioso. Sólo el positrón era familiar. Los positrones se crean como gemelos de los electrones en choques violentos entre rayos gamma y la materia. Típicamente, un fotón de rayos gamma que colisiona con un átomo produce un par electrón-positrón. El electrón recién nacido escapa para disfrutar de una existencia más o menos permanente, pero el pobre positrón se enfrenta a aventuras desde el primer momento. Si un positrón tropieza con un electrón (y el universo está lleno de ellos), el par se aniquilará instantáneamente, invirtiendo el proceso de creación de pares y dando de nuevo fotones. Esto supone en general una corta carrera para el positrón.

Volvamos ahora a la propuesta de Wheeler, tal como la desarrolló Feynman. La figura 9.1 es un diagrama espacio-temporal que muestra la creación y posterior aniquilación de un positrón. En general, la forma de interpretar este diagrama es que el fotón de rayos gamma, representado por la línea ondulada que proviene de la parte inferior, crea un par electrón-positrón en el suceso a , el electrón (designado « e_2 ») sale hacia la derecha, mientras que el positrón, designado « p », se dirige hacia la izquierda, golpea a un segundo electrón (designado « e_1 ») en el suceso b y se aniquila, creando de nuevo un fotón. El efecto neto es que el electrón e_1 ha desaparecido en un lugar para ser reemplazado por un electrón e_2 en otro. La audaz conjetura de Feynman era que los electrones e_1 y e_2 son realmente la misma partícula, ¡incluso si en el intervalo entre los sucesos a y b ambos electrones están presentes a la vez!

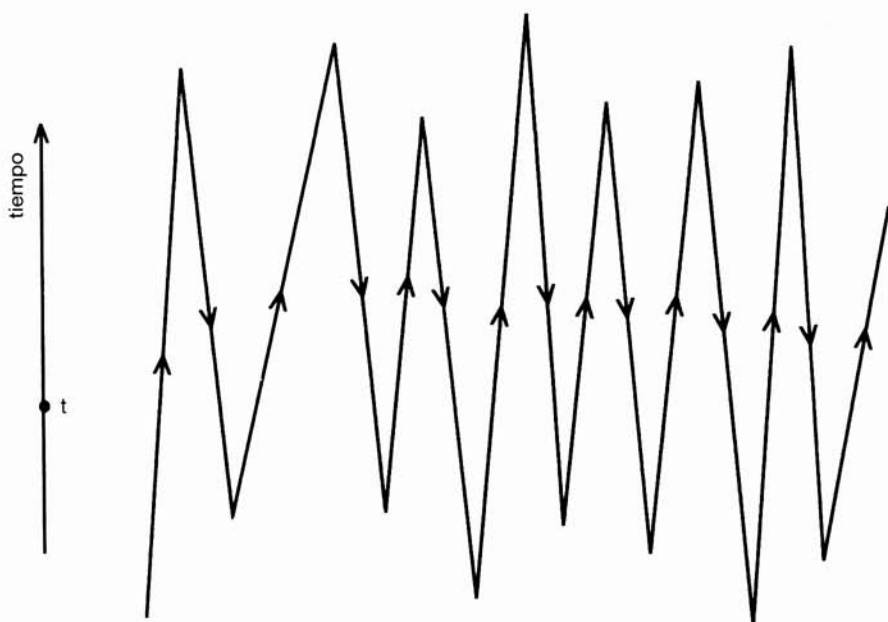
La idea de Feynman es que la línea continua en zigzag en la figura 9.1 no debería verse como una concatenación de tres líneas de universo de partículas distintas, sino como un camino espacio-temporal continuo de *un solo* electrón.



9.1. El diagrama espacio-temporal representa un fotón que crea un par electrón-positrón (e_2 , p) en a , siendo el positrón posteriormente aniquilado por el electrón e_1 en b . En el instante t , un observador vería tres partículas existentes: p , e_1 y e_2 . Según Feynman, la línea en zigzag puede verse como la línea de universo de una sola partícula, un electrón que viaja hacia atrás en el tiempo entre b y a (véanse las flechas).

El segmento de la línea con pendiente hacia atrás —el fragmento correspondiente al positrón— representa entonces al electrón que va *hacia atrás en el tiempo*. Este cambio temporal se representa por las flechas en la línea de universo. En su fase electrónica normal las flechas apuntan hacia adelante en el tiempo, pero durante la fase positrónica apunta hacia atrás. Visto de esta forma, el electrón original no perturbado (e_1) emite un fotón (en b) y rebota hacia atrás en el tiempo, luego absorbe un fotón (en a) y rebota de nuevo hacia el futuro. Un observador situado en un tiempo entre a y b vería dos electrones y un positrón, pero Feynman afirma que es realmente sólo una partícula vista tres veces: primero (como e_1) en su forma original no perturbada, luego (como el positrón) regresando del futuro, y finalmente (como e_2) viajando hacia adelante en el tiempo una vez más.

La idea esencial puede ampliarse para incluir muchos más electrones y positrones permitiendo que la línea de universo zigzaguee repetidamente (véase la figura 9.2). De hecho, Wheeler propuso que todos los electrones en el uni-



9.2. Los zigzags múltiples podrían explicar por qué todos los electrones son idénticos: todos ellos son la misma partícula, rebotando repetidamente hacia atrás y hacia adelante en el tiempo. Un observador en el instante t interpretaría erróneamente la única línea de universo como una multiplicidad de segmentos inconexos.

verso son realmente la misma partícula, ¡simplemente rebotando de un lado a otro en el tiempo! En otras palabras, usted y yo, la Tierra, el Sol, la Vía Láctea y todas las demás galaxias estamos compuestos de sólo *un* electrón (y también un protón y un neutrón) visto innumerables veces. Esto ofrece una neta explicación de por qué todos los electrones parecen idénticos. Por supuesto, también predice que el universo tendrá exactamente el mismo número de positrones que de electrones, puesto que todo zig tiene un correspondiente zag. En otras palabras, el universo estaría compuesto de una mitad de materia y una mitad de antimateria.

El nexo entre la simetría de inversión temporal y la simetría materia-antimateria es de hecho muy profundo. Ya tomemos o no muy seriamente la idea de positrones como electrones viajando hacia atrás en el tiempo, puede demostrarse sobre bases bastante generales que, si las leyes del universo son estrictamente simétricas con respecto al tiempo, entonces el universo debería tener iguales contribuciones de materia y antimateria. Algunos cosmólogos han sugerido precisamente eso. La antimateria tiene la misma *apariencia* que la materia, de modo que usted no puede decir a partir de una inspección casual si

la galaxia Andrómeda, pongamos por caso, está o no hecha de materia o antimateria. ¿Quizá la mitad de las galaxias son de una forma y la mitad de la otra? Para poner a prueba esta fascinante posibilidad, los astrónomos han buscado modos en que la antimateria podría revelar su presencia. Cuandoquiera que la antimateria se encuentra con la materia, se producen enormes cantidades de radiación gamma, con energías características. Existen muchos ejemplos conocidos de galaxias en colisión, de modo que si la mitad de las galaxias están hechas de antimateria, podríamos esperar que el universo estuviera repleto de rayos gamma característicos; sin embargo, todavía no han sido encontrados. Esto sugiere un predominio fundamental de electrones sobre positrones y, en general, de materia sobre antimateria.

La conclusión que podemos sacar de estas observaciones —y es una conclusión muy profunda— es que en la naturaleza no hay simetría entre materia y antimateria, de modo que las leyes del universo *no* son exactamente simétricas en el tiempo. Cualesquiera que sean los procesos físicos que han dado lugar a la creación del material cósmico, presumiblemente en las condiciones extremas del big bang, deben haber estado sesgados en su relación con el tiempo, aunque sólo sea ligeramente. En otras palabras, debe haber al menos un proceso físico básico que no es exactamente simétrico bajo inversión temporal.

La partícula que puede indicar el tiempo

La idea de que una ley física fundamental pudiera violar la simetría exacta de inversión temporal no figuraba siquiera en la agenda cuando Feynman estaba urdiendo su concepto de antimateria y tiempo invertido. Pero, por azar, precisamente en esa época se descubrió una nueva partícula subatómica que resultó tener implicaciones cruciales para la cuestión de la simetría temporal. La nueva partícula fue bautizada como «kaón». Aunque yo había oído hablar vagamente sobre los kaones desde mis días en el instituto —suficiente para saber que eran partículas subnucleares altamente inestables y de corta vida— yo les presté atención por primera vez en 1966, cuando leí en la prensa de Londres acerca de una extraña teoría. El artículo del periódico sugería que los kaones podrían saltar ocasionalmente a otro universo, donde el tiempo estaba corriendo hacia atrás, y luego podrían regresar al primero. Esto era cosa de ciencia ficción, y me dejó profundamente intrigado, en buena medida porque el autor de la teoría, Russell Stannard, era uno de mis profesores en el University College.

La especulación de Stannard se basaba en un sorprendente descubrimiento que había tenido lugar dos años antes, y que apuntaba a que los kaones podían «comportarse de forma extraña» con respecto al tiempo. El explicar precisamente qué es lo que pueden hacer requiere algunos conocimientos básicos. Cuando los kaones se descubrieron por primera vez, en 1947, su existencia se puso de manifiesto por las misteriosas trazas en forma de V que se creaban en cámara

ras de niebla expuestas a rayos cósmicos. Desde el primer momento los físicos habían sospechado que había algo singular en ellos. Los kaones pueden crearse por colisiones entre partículas nucleares tales como protones y neutrones, pero una vez creados no duran mucho tiempo. Al cabo de unos pocos nanosegundos la mayoría de ellos se habrán desintegrado, principalmente en piones. Kaones y piones pertenecen a una clase de partículas subnucleares llamadas colectivamente «mesones». Una propiedad importante que los mesones comparten con los protones y los neutrones es que ellos interaccionan entre sí muy fuertemente, lo que significa que las reacciones que implican la transmutación de un tipo de partícula en otro tienden a ocurrir casi instantáneamente. Esta fuerza nuclear fuerte debe contraponerse a otra, enteramente diferente, llamada fuerza nuclear «débil». La fuerza débil, extraordinariamente débil en comparación con la fuerte, es responsable de muchos procesos nucleares muy lentos, tales como la desintegración beta. Para dar un ejemplo, una típica interacción de fuerza fuerte necesita una billonésima de billonésima de segundo, mientras que la desintegración del neutrón, que está inducida por la fuerza débil, necesita aproximadamente quince minutos.

Todas las partículas afectadas por la fuerza fuerte están constituidas por combinaciones de partículas más pequeñas llamadas «quarks». Por ejemplo, los protones y los neutrones tienen tres quarks cada uno, los mesones tienen dos quarks (estrictamente, un quark y un antiquark). Hay probablemente seis variedades distintas de quarks (cinco son definitivamente conocidas),* y el mismo número de antiquarks, de modo que existen treinta y seis combinaciones diferentes de un quark y un antiquark. Esto supone una gran cantidad de mesones posibles. El pión y el kaón estuvieron entre los primeros en descubrirse, puesto que son los más ligeros. Los kaones se dan en tres variedades: eléctricamente neutros, cargados positivamente y cargados negativamente.

Fue el modo en que se desintegran los kaones lo que alertó a los físicos sobre sus peculiaridades especiales. Un kaón típico es producido por la interacción fuerte, en un abrir y cerrar de ojos, tras la colisión de dos partículas nucleares que interaccionan fuertemente. Sin embargo, aunque el kaón se desintegra en otras partículas fuertemente interactuantes (piones), necesita un tiempo de un nanosegundo para hacerlo. Fue como un mazazo. Si una partícula puede formarse en una billonésima de billonésima de segundo por un tipo particular de proceso, ¿por qué no se desintegra la partícula en aproximadamente el mismo tiempo por el mismo tipo de proceso? Lo que funciona hacia adelante debería funcionar hacia atrás. La situación es muy similar a arrojar una bola al aire y encontrar que necesita un millón de años para el vuelo de caída. ¿Qué es lo que lleva al kaón a necesitar para desintegrarse un tiempo billones de veces mayor que el que necesita para ser producido?

* Actualmente ya hay evidencia concluyente de la existencia del sexto quark, o quark *top*. (N. del t.)

Aquí había en juego un principio casi sagrado de la física que había sido aceptado sin discusión durante todo el tiempo que uno pueda recordar: el principio de reversibilidad de todos los procesos físicos fundamentales. Un modo pintoresco de ver este principio consiste en imaginar que se toma una película del proceso en cuestión y luego se pasa al revés. Si el proceso es reversible, entonces la película invertida debería mostrar también un proceso físico posible. Así, una película de un planeta que gira alrededor del Sol, pasada hacia atrás, mostraría un planeta que gira en sentido contrario. No hay nada erróneo en esto. Por supuesto, todos hemos detectado películas que se estaban pasando al revés porque muestran cosas extrañas como ríos que fluyen colina arriba y gente que anda hacia atrás. Sin embargo, estas escenas implican procesos complicados, y yo me estoy restringiendo por el momento a fenómenos *básicos* que incluyen sólo algunas partículas elementales.

La reversibilidad de los procesos físicos básicos procede de la simetría temporal de las leyes que subyacen en ellos. Esta simetría de inversión temporal se denota normalmente por la letra «T». Usted puede considerar T como una operación (imaginaria) que invierte la dirección del tiempo —es decir, intercambia pasado y futuro. Las leyes simétricas respecto al tiempo tienen la propiedad de que, cuando se invierte la dirección del tiempo, las ecuaciones que las describen permanecen iguales: son «invariantes» bajo T. Un buen ejemplo lo proporcionan las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo, que son ciertamente T-invariantes. Si usted aplica T a una onda retardada, obtiene una onda avanzada —como ya he descrito. Las ondas avanzadas son físicamente posibles, aunque por alguna razón no las vemos.

Usted puede invertir el tiempo matemáticamente en un conjunto de ecuaciones sin ningún esfuerzo, pero usted no puede invertir tan fácilmente el flujo del tiempo en el laboratorio. Sin embargo, la simetría T puede ser verificada experimentalmente invirtiendo el *proceso* en cuestión —usted puede hacer que todas las cosas implicadas en el proceso vayan hacia atrás, de modo que esto es realmente «inversión del movimiento», lo que normalmente equivale a una inversión del tiempo. Cuando usted hace eso, normalmente encuentra que el proceso original se invierte en realidad y vuelve a donde usted había empezado, con el estado físico inicial restaurado. Además, el proceso inverso transcurre a la misma velocidad que el proceso directo.

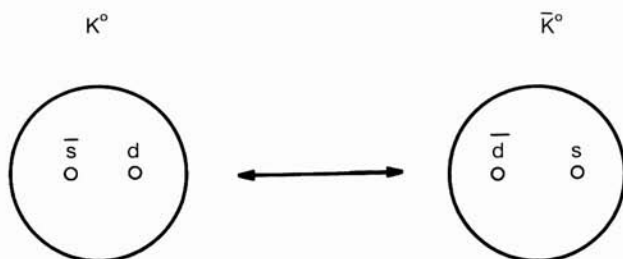
Durante décadas los físicos dieron por supuesta la reversibilidad temporal exacta, sin que hubiera ninguna razón muy buena para ello. Existía la vaga sensación de que algo tan simple como una partícula elemental o una onda electromagnética no podía tener un sentido intrínseco de pasado y futuro. El hecho de que el kaón parecía burlar esta regla al necesitar un tiempo billones de veces mayor para desintegrarse que para ser producido era por consiguiente muy extraño —tan extraño, de hecho, que los científicos involucrados en el descubrimiento confirieron al kaón una nueva cualidad que llamaron «extrañeza». No mucho tiempo después, se encontraron otras «partículas extrañas». El ori-

gen de su extrañeza fue con el tiempo rastreado hasta un culpable: cada partícula extraña contenía un tipo particular de quark —un quark extraño.

Pronto se hizo clara la razón del extraño comportamiento de las partículas extrañas. Aquí está la esencia tal como la entendemos hoy. Una partícula extraña se produce cuando se crea un quark extraño (entre otros) en una colisión de partículas nucleares de alta energía. La colisión también produce un antiquark extraño. Puesto que el antiquark tiene «antiextrañeza», no hay producción neta de extrañeza en este proceso, de modo que podría ir al revés, con el par quark-antiquark aniquilándose. Sin embargo, el par quark-antiquark se separa inmediatamente, con el quark extraño encerrado dentro del kaón. El kaón es así incapaz de desintegrarse a menos que por azar se encuentre con una partícula perdida que contenga un antiquark antiextraño —lo que es muy poco probable en la práctica. El proceso sería permanentemente irreversible salvo que la fuerza nuclear débil sea capaz de cambiar un tipo de quark en otro. En particular, puede cambiar un quark extraño en uno de la variedad ordinaria de quarks no extraños. Una vez que esto ha sucedido, se abre un camino de desintegración para el kaón. Pero el proceso débil es muy lento, razón por la que el kaón necesita tanto tiempo (relativamente) para desintegrarse. El resultado es que los procesos de producción y desintegración del kaón no son realmente uno el inverso del otro, después de todo, y la ley de reversibilidad temporal no es violada por estos extraños procesos.

Pero esto fue sólo el comienzo de la historia. Había aún algo extraño sobre el kaón eléctricamente neutro, denotado K^0 . Cuando los físicos trataron de medir cuánto tiempo tarda en desintegrarse en piones, quedaron sorprendidos al descubrir que estos kaones parecen tener dos vidas medias completamente diferentes. A veces se desintegran en dos piones al cabo de diez billonésimas de segundo, y otras veces se desintegran en tres piones con una vida media miles de veces mayor que esto. Era casi como si hubiese dos identidades diferentes habitando en la misma partícula —una especie de existencia de Jekyll y Hyde.

Pronto iba a llegar una explicación para este enigma adicional. El K^0 consiste en un antiquark antiextraño ligado a un quark de otro tipo llamado *down* (véase la figura 9.3). La fuerza débil puede cambiar el quark *down* en un quark extraño, y al mismo tiempo cambiar el antiquark antiextraño en un antiquark *antidown*. El efecto neto de estas dos transmutaciones es convertir el K^0 en su antipartícula, denotada \bar{K}^0 . Este cambio espontáneo de identidad puede darse también en dirección contraria, llevando de nuevo el \bar{K}^0 a un K^0 . El kaón neutro tiene así una especie de crisis de identidad permanente: no sabe si es un K^0 o su antipartícula \bar{K}^0 , y se mantiene oscilando entre los dos. Esta rápida mezcla de identidades significa que los físicos que registraban la desintegración del kaón se las estaban viendo realmente con una identidad híbrida: un kaón-antikaón. De hecho es más complicado todavía. Existen *dos* de estas entidades, puesto que la mezcla de K^0 y \bar{K}^0 puede darse de dos formas diferentes, según la mezcla sea simétrica o no bajo reflexión *espacial*. (Por esto en-



9.3. Crisis de identidad. El kaón neutro, K^0 , está formado por dos partículas más pequeñas: un antiquark antiextraño (\bar{s}) y un quark *down* (d). La antipartícula, \bar{K}^0 , consta de un quark extraño (s) y un antiquark *antidown* (\bar{d}). La fuerza débil puede cambiar d en s y \bar{s} en \bar{d} , y viceversa. Esto provoca que la identidad del kaón vacile entre K^0 y \bar{K}^0 .

tiendo que, si las dos mezclas se vieran reflejadas en un espejo, una sería la imagen invertida de la original y la otra no.) Habiendo descubierto la existencia de estos dos modos de mezcla diferentes, los físicos podían comprender por qué había dos esquemas de desintegración diferentes. La mezcla 1, mejor conocida como K_1 , no cambia al reflejarse en un espejo, de modo que tendría que desintegrarse en un número *par* de piones, al ser esto también simétrico por lo que respecta a los espejos. Por el contrario, la mezcla 2, llamada K_2 , se invierte en un espejo, de modo que debería desintegrarse en un número *impar* de piones. Hay así dos esquemas de desintegración completamente diferentes, uno en dos piones y otro en tres, dependiendo de qué mezcla de K^0 y \bar{K}^0 exista cuando tiene lugar la desintegración. Puesto que el proceso a tres piones es más lento, la ruta de desintegración tiene una vida media correspondientemente mayor.

Para entender completamente la importancia de los dos esquemas de desintegración, usted tiene que tener en cuenta que hay un nexo bastante elemental entre reflexión especular y reflexión temporal. Por ejemplo, una esfera rotatoria vista en un espejo gira en sentido contrario, y parece exactamente como si se hubiese invertido su movimiento. Puede demostrarse con bastante generalidad que la reflexión especular es físicamente equivalente a la inversión temporal —con una advertencia: usted tiene que intercambiar las identidades de las partículas y sus correspondientes antipartículas. De modo que la existencia de dos diferentes esquemas de desintegración dos-piones/tres-piones, al conservar la simetría de reflexión temporal, expresa claramente la invariancia de la naturaleza bajo inversión temporal.

Hasta aquí todo está bien. Sin embargo, se produjo una nueva conmoción cuando, en 1964, un grupo de físicos de Princeton dirigido por Val Fitch y James Cronin descubrieron que una de cada pocos cientos de partículas K_2 ¡se desintegraba en *dos* piones en lugar de tres! Yo todavía estaba en el instituto en aquella época, y recuerdo que supe del descubrimiento de forma bastante

accidental por medio de la persona invitada para pronunciar el discurso de honor en la charla anual del instituto. Las implicaciones del experimento de Fitch-Cronin eran casi iconoclastas (y esta es la razón de que el citado conferenciante considerase que era oportuno un comentario en una ocasión formal). Pronto quedó establecido que el comportamiento rebelde del kaón implicaba la violación del hasta entonces principio sagrado de la simetría de inversión temporal.

Una posible forma de considerar cómo viola el kaón la simetría T es esta: los estados K_1 y K_2 surgen, como he explicado, como una especie de híbrido o mezcla de kaón y antikaón. Imaginemos que la partícula está cambiando rápidamente una y otra vez de identidad: kaón-antikaón-kaón-antikaón... Uno puede preguntar si estos cambios son *perfectamente* simétricos —es decir, si la velocidad de ida de kaón a antikaón es exactamente igual a la velocidad de vuelta de antikaón a kaón. Si no lo es, la entidad híbrida podría pasar más tiempo como kaón que como antikaón, o viceversa. Todo el mundo suponía que, puesto que las leyes que inducen los cambios kaón-antikaón deberían ser exactamente simétricas en el tiempo, la naturaleza no debería distinguir un proceso de su inverso, y las dos velocidades coincidirían exactamente. Pero hay una tendencia del kaón a pasar más tiempo como un \bar{K}^0 que como un K^0 .

Este comportamiento inesperado implica que el kaón posee un sentido *intrínseco* de «pasado-futuro». Aunque el efecto es minúsculo, es profundamente significativo y profundamente misterioso —de aquí la especulación desbordada de Russell Stannard para explicarlo en términos del salto del kaón para visitar temporalmente un universo paralelo con el tiempo invertido. El columnista de *Scientific American* Martin Gardner comentó: «La visión de Stannard bifurca el cosmos en regiones contiguas, cada una de las cuales enrolla su alfombra mágica simultáneamente (¡cualquier cosa que pueda significar “simultáneamente”!) pero en direcciones opuestas».⁶

Usted no me ha oído durante bastante tiempo, pero ahora estoy desesperadamente confuso sobre algo. Yo creía que Einstein había acabado con los conceptos de pasado y futuro. ¿Cómo pueden afirmar los físicos que los kaones tienen un sentido intrínseco de asimetría pasado-futuro?

Buena pregunta. Tenemos aquí un problema con el lenguaje. Einstein descartó la división absoluta del tiempo en *el* pasado y *el* futuro separados por un instante presente universal o «ahora». Pero esto no impide que distingamos de una forma absoluta entre *direcciones* pasada y futura en el tiempo. Utilizamos las palabras «pasado» y «futuro» aquí de dos formas sutilmente diferentes. Una diferencia similar aparece en nuestro uso de las palabras «norte» y «sur». Frecuentemente hablamos de «el Norte» o «el Sur» cuando nos referimos a *lugares*, igual que hablamos de «norte» y «sur» entendiendo *direcciones* en el espacio. En Estados Unidos, «el Sur» significa estados como Alabama y Texas; en Gran Bretaña, «el Norte» se asocia con ciudades como Manchester

y Newcastle. Hay incluso una asimetría entre norte y sur, debida al hecho de que la Tierra está girando. Esta asimetría se denota por la flecha de la aguja de la brújula, que juega un papel para la asimetría espacial análogo al de la flecha del tiempo. El humilde kaón es capaz de marcar el tiempo en un sentido limitado: conoce la diferencia entre las dos *direcciones* del tiempo, pasado y futuro. Pero de ningún modo el kaón *divide* el tiempo en pasado, presente y futuro.

El universo sesgado

El minúsculo sesgo en el tiempo que infecta el dominio subnuclear lleva consigo un sesgo relacionado en conexión con materia y antimateria. Recordemos que la violación de T puede remitirse al hecho de que la velocidad a la que los kaones se convierten en antikaones no equilibra exactamente el proceso inverso, antikaones en kaones. Si existe una asimetría semejante entre materia y antimateria, incluso en el nivel minúsculo observado, podría ofrecer una explicación natural de por qué el universo está hecho predominantemente de materia. Podemos imaginar que la mayoría de la materia del universo se produjo en el big bang caliente. Inicialmente había una mezcla explosiva de materia y antimateria, pero las proporciones no eran exactamente iguales: había un ligero exceso de materia debido a los efectos de la violación de T. La mezcla no hubiera sobrevivido más de un segundo aproximadamente antes de que una aniquilación global lo convirtiera casi todo en rayos gamma. Esto habría eliminado toda la antimateria, pero hubiera quedado el minúsculo exceso de materia, ileso. Era este exceso el que llegó a formar las galaxias, mientras que los rayos gamma, muy debilitados por la expansión del universo, se convertían en la radiación térmica de fondo cósmico. Si esta teoría es correcta, entonces puede considerarse que nuestra existencia depende crucialmente del minúsculo sesgo temporal que permite la naturaleza. Es una asimetría tan pequeña como para ser casi una idea fugaz, pero sin ella no estaríamos aquí.

Una vez que la idea de la violación de T había entrado en las mentes de los físicos tozudos, empezó la búsqueda en serio del modo más sensible de medirla. El lugar donde esta investigación se ha seguido con más asiduidad está en un espectacular valle fluvial al sureste de Francia, no lejos de las estaciones turísticas de esquí alpino. Aquí se encuentra la vieja ciudad de Grenoble, lugar de nacimiento del famoso músico Hector Berlioz, quien una vez comentó ingeniosamente: «El tiempo es un gran maestro, pero por desgracia mata a todos sus discípulos». ⁷ Es también el emplazamiento del principal laboratorio de física nuclear. Los científicos franceses han dirigido su atención no a los kaones, sino al humilde neutrón, que puede tener escondida en sus propiedades electromagnéticas una clave vital para el sesgo temporal de la naturaleza.

A usted se le perdonará el que pueda suponer que los neutrones, al ser eléc-

tricamente neutros, no tienen propiedades electromagnéticas asociadas. La mayoría de los físicos supusieron lo mismo cuando el neutrón fue descubierto por primera vez. Por consiguiente, se manifestó algún asombro cuando, en 1933, el físico alemán Otto Stern descubrió que un neutrón actúa como si contuviese una minúscula barra imanada. Hoy, el origen de este magnetismo no parece tan misterioso. Sabemos que, aunque el neutrón es eléctricamente neutro, no es una partícula puntual sino un cuerpo compuesto que contiene tres quarks eléctricamente cargados. La carga total suma cero, pero los quarks pueden crear un campo magnético porque todos los neutrones están girando. Usted puede imaginar cada neutrón como una pequeña bola girando alrededor de su propio eje como un planeta minúsculo, salvo que todos los neutrones giran exactamente a la misma velocidad —el espín es una cantidad fija para el neutrón, como lo es su masa. Un examen más cercano revela una imagen más complicada: son los quarks cargados dentro del neutrón los que están girando, cada uno de ellos constituyendo una minúscula corriente eléctrica que crea un campo magnético. El efecto global es producir un campo magnético neto alineado en la dirección del eje de giro del neutrón con la forma conocida como un «dipolo». Este nombre deriva del hecho de que, como en una barra imanada, hay un polo norte en un extremo y un polo sur en el otro.

La existencia de partículas cargadas dentro del neutrón abre otra posibilidad. El eje de giro del neutrón define una dirección dada en el espacio. Incluso si la carga total del electrón pudiera sumar cero, podría suceder que la carga positiva prefiera, en promedio, congregarse en una región con respecto a la dirección del espín, y la carga negativa en otra. Esto crearía un campo *eléctrico* dipolar. Si el neutrón puede tener un dipolo magnético, ¿no podría tener también un dipolo eléctrico?

Aquí es donde interviene la flecha del tiempo. Imaginemos que pasamos una película del neutrón hacia atrás. Nada cambia mucho, salvo que el neutrón gira ahora en la dirección opuesta. Por el contrario, si el neutrón tiene un dipolo eléctrico no estaría afectado por la inversión temporal, puesto que no depende de los movimientos de los quarks, sino sólo de sus posiciones. Por consiguiente, la inversión del tiempo tiene el efecto de permutar las direcciones relativas del espín y del dipolo eléctrico. Esto se ve más fácilmente utilizando un diagrama (véase la figura 9.4). La dirección de espín puede representarse por analogía con la rotación de la Tierra. Tal como se ha dibujado, el neutrón tiene su «hemisferio norte» en la parte superior, donde está localizada la carga +, pero en la versión con el tiempo invertido el hemisferio norte está en la parte inferior, con la carga -.

La relación de oposición entre espín y dipolo eléctrico bajo inversión temporal se manifestaría si el neutrón estuviese inmerso en un campo eléctrico externo. El campo eléctrico actuaría sobre el dipolo eléctrico y trataría de girar el neutrón de modo que el extremo + esté hacia el - del campo y viceversa. Esta interacción implica una cierta cantidad de energía. Si pudiéramos mirar un neu-



tiempo hacia adelante



tiempo invertido

9.4. Visualizando la violación de la simetría temporal. El espín del neutrón cambia de dirección cuando se invierte el tiempo. El dipolo eléctrico no queda afectado.

trón particular e invertir la dirección del tiempo, el neutrón giraría en sentido contrario, pero el dipolo y el campo eléctrico externo permanecerían sin cambios. Aunque no podamos realmente invertir el tiempo, *podemos* invertir el campo eléctrico externo. Esto deja la dirección de espín sin cambio, pero cambiaría la energía de interacción eléctrica con el dipolo (porque el + y el - se intercambiarían efectivamente con respecto al campo externo). Esto es completamente equivalente a la inversión temporal, puesto que todo lo que importa es la dirección *relativa* del espín y el dipolo eléctrico. De este modo, usted puede verificar la inversión temporal invirtiendo el campo eléctrico aplicado y viendo si cambia la energía del neutrón.

Vale la pena señalar que no puede hacerse lo mismo con el campo magnético del neutrón. Como se ha explicado, el dipolo magnético del neutrón aparece a causa de corrientes eléctricas minúsculas dentro del neutrón, y si el tiempo fuera invertido, la dirección de dichas corrientes también se invertiría. A diferencia del caso de un dipolo eléctrico estático, un dipolo magnético causado por cargas giratorias cambia bajo la inversión del tiempo junto con la dirección del espín. Así pues, la orientación relativa de un dipolo magnético y la flecha del espín sigue siendo la misma cuando se invierte el tiempo. Cualquier energía de interacción con un campo magnético externo también quedaría sin cambio. La conclusión de esta cadena de razonamientos es que la existencia de un momento dipolar eléctrico en el neutrón sería signo de que el mundo *no* es simétrico bajo inversión temporal. En otras palabras, si el neutrón poseyera un dipolo eléctrico, por pequeño que fuera, tendría un sentido intrínseco de la dirección del tiempo.

Para medir un dipolo eléctrico en la práctica, usted coloca su neutrón en un potente campo eléctrico, invierte la dirección del campo, y ve si cambia la energía del neutrón. Para controlar la energía, usted proporciona también un campo magnético. El neutrón trata de girar y alinearse con el campo magnético. Para ayudarlo, se dirige una onda electromagnética de radiofrecuencia al neutrón, y si la frecuencia de la onda coincide precisamente con la diferencia de energía entre los estados de espín «hacia arriba» e «invertido», entonces la

onda induce un cambio en la dirección del espín. Cualquier energía extra debida al dipolo eléctrico en interacción con el campo eléctrico debería manifestarse en el ajuste fino de la radioonda. Este experimento es un test muy sensible de la simetría de inversión temporal.

Hasta ahora no se ha descubierto ninguna violación semejante. Según los expertos franceses, si los quarks cargados se distribuyen de un modo sesgado dentro del neutrón, entonces la separación media de la región de carga positiva y la región de carga negativa debe ser menor que 10^{-25} centímetros, o una diezbillonésima del tamaño del neutrón. Esto es ya terriblemente pequeño, aunque los científicos no se desaniman. Muchas teorías divulgativas de física de partículas implican la violación de T, pero sugieren que la simetría temporal debería romperse en un nivel justo un poco más allá de la capacidad del experimento francés para ser detectada. En un nivel aún mucho más débil, la misma fuerza débil que induce la desintegración de los kaones debería afectar también a los neutrones, de modo que una medida suficientemente sensible debe detectar un dipolo eléctrico.

La suposición de que la simetría de inversión temporal tiene que romperse en algún nivel ha espoleado a los experimentadores de todo el mundo para buscar minúsculos dipolos eléctricos, no sólo en los neutrones, sino también en átomos y moléculas. Los favoritos actuales son el mercurio y el fluoruro de talio. Los experimentos con moléculas prometen ser mucho más sensibles que los experimentos con núcleos, y deberían capacitar a los físicos para encontrar evidencia de la violación de T a su debido tiempo. Un grupo de la Universidad de Yale espera ser capaz de detectar dipolos tan pequeños como de 10^{-28} centímetros utilizando la exótica molécula de fluoruro de iterbio (YbF).

La importancia de un resultado positivo en estos experimentos de dipolos estaría en que una partícula fundamental tal como un neutrón —un constituyente de la materia ordinaria— tendría una orientación temporal *intrínseca*. Por extensión, el contenido material del universo poseería un minúsculo, pero en cualquier caso importante, sentido de la dirección del tiempo. Pasado y futuro estarían grabados a fuego en la estructura de la materia en un nivel básico.

¡Esto es completamente sorprendente! Pasado y futuro en el universo están relacionados con principio y fin. ¿Cómo puede una partícula minúscula como un neutrón o un kaón saber del big bang y el origen cósmico? No hay ningún poste de señales en el tiempo que diga «En esta dirección está el big bang», ¿o lo hay?

Realmente, lo hay. La expansión del universo define una dirección temporal desde el big bang hacia el futuro.

¿Quiere usted decir que los kaones están sintonizados con el cosmos?

¿Pueden sentir ellos la expansión del universo? Esto parece tremendamente inteligente para una humilde partícula subatómica.

En realidad lo es. Pero nada menos que un físico como Yuval Ne'eman, que ayudó a establecer las bases de la teoría de los quarks como componentes elementales de la materia, sugirió esto mismo en 1970. Afirmaba que la dirección en el tiempo ligada a la desintegración del kaón está directamente relacionada con el movimiento cosmológico. Por lo tanto, si el universo se estuviera contrayendo en lugar de expandirse, la asimetría temporal de la desintegración del kaón sería en sentido contrario. En efecto, «un universo de materia en contracción es igual que un universo de antimateria en expansión».⁸

Pero, ¿cómo puede un kaón, o cualquier otra partícula subatómica, saber qué está haciendo el universo?

Todo remite de nuevo a la gravedad. Fue la teoría de la gravitación de Einstein la que nos dio la posibilidad de un universo en expansión. ¿Quizá existe algún aspecto mal comprendido de la gravitación que se relaciona con la violación de T? Después de todo, la gravitación nos da una de las más conspicuas flechas del tiempo —a saber, los agujeros negros. Usted puede caer dentro de un agujero negro, pero no puede salir de él. Análogamente, la formación de un agujero negro a partir del colapso de una estrella es un proceso irreversible. Por desgracia, ha habido algún abierto desacuerdo entre los expertos en este tema. En 1974, Stephen Hawking fue catapultado a la fama por su descubrimiento de que los agujeros negros no son negros, sino que brillan con radiación cuántica. Los agujeros negros pequeños se hacen realmente muy calientes, y finalmente se evaporan con una explosiva liberación de energía. Análisis matemáticos cuidadosos mostraban que el agujero negro actúa como el definitivo productor de aleatoriedad: si cae en él materia ordenada, su energía vuelve a salir completamente lavada, en forma de radiación totalmente desordenada con fases perfectamente revueltas. (¡Otra vez aquellas fases aleatorias!)

El efecto Hawking señalaba una única flecha del tiempo: de orden a desorden, gracias al agujero negro. Pero el propio Hawking veía las cosas de forma diferente. Poco después de que se pusiera de moda el término «agujero negro», la gente empezó a hablar de agujeros blancos. ¿Qué son? Pues son agujeros negros al revés. En lugar de tragar cosas vorazmente, ellos las escupen. No se conoce que existan agujeros blancos, y la mayoría de los científicos los descartan, como todos los artefactos con el tiempo invertido. La manera en que lo veía Hawking, sin embargo, consistía en que si los agujeros negros emiten radiación, tendrán la apariencia de agujeros blancos. Confinados en una caja en equilibrio termodinámico a temperatura constante, un agujero negro y un agujero blanco parecerían indistinguibles. Una persona que puso objeciones a esta intrigante afirmación fue Roger Penrose, quien insistía en que un agujero ne-

gro y un agujero blanco son completamente diferentes. A mediados de los años setenta, él y Hawking expusieron sus visiones respectivas en entretenidos encuentros públicos.*

Penrose cree que la gravedad mantiene la clave de la flecha del tiempo: que existe un sesgo intrínseco en el tiempo cuando se llega a campos gravitatorios. Al menos allí donde dichos campos están situados en la vecindad de singularidades espacio-temporales del tipo que existe en el centro de los agujeros negros (y agujeros blancos) y en el big bang (y en el big crunch). Penrose admite que él no conoce el origen de este sesgo, pero piensa que podría estar ligado de algún modo a la violación de T de los kaones.

¿Significa esto que si el universo empieza a contraerse, la flecha del tiempo se invertirá?

¡Ah, esa es una cuestión interesante! Ahora sigamos...

* Un debate mucho más reciente, aunque algo técnico, puede encontrarse en *La naturaleza del espacio y el tiempo* de S. Hawking y R. Penrose (Editorial Debate, Madrid, 1996). (N. del t.)

Hacia atrás en el tiempo

El tiempo correrá hacia atrás, en busca de la edad de oro.

JOHN MILTON

Una inversión de la flecha haría que el mundo externo pareciera absurdo.

ARTHUR EDDINGTON

Marcha atrás

Pero por desgracia yo he nacido en el extremo equivocado del tiempo, y tengo que vivir de adelante hacia atrás.

T. H. WHITE

La idea de que el tiempo puede correr hacia atrás puede parecer sorprendente, pero no es nueva ni mucho menos. Cuando usted se para a pensar sobre ello, cualquier creencia en que el tiempo es cíclico debe implicar el «ir marcha atrás» en alguna etapa, de modo que el mundo pueda retornar a su estado inicial. Platón dio una descripción gráfica de esta fase, vista a través de los ojos de un extranjero imaginario:

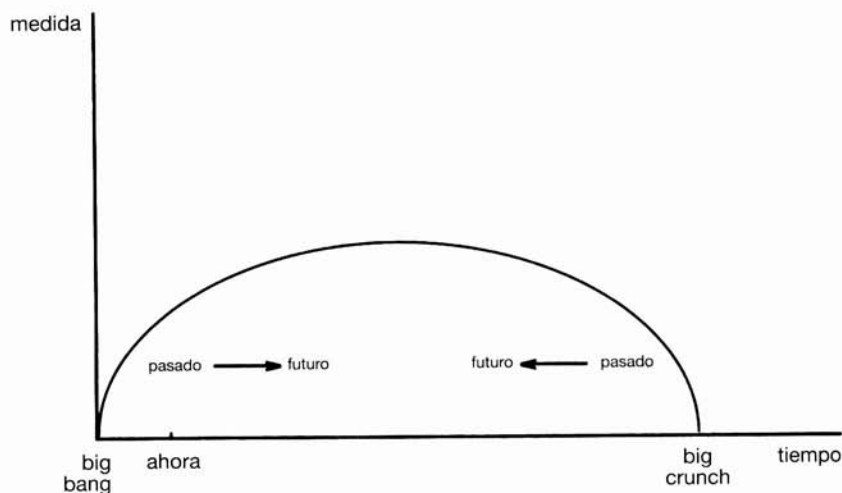
Primero, la vida de todos los animales llegó a detenerse, y la naturaleza mortal dejó de ser o parecer más vieja, y luego se invirtió y se hizo joven y delicada; las canas de los ancianos se oscurecieron de nuevo, y las mejillas de los hombres barbados se hicieron suaves y recuperaron su primer rubor; los cuerpos de los jóvenes se hicieron más tiernos y más pequeños, continuamente, día y noche, regresando y asimilándose a la naturaleza de un niño recién nacido tanto en mente como en cuerpo: en la siguiente fase, se consumieron y desaparecieron.¹

En los años sesenta, el astrofísico Thomas Gold propuso una teoría muy parecida a esta. Llegó a ella reflexionando sobre el hecho incuestionable de que la flecha del tiempo realmente importante en el universo es el flujo de calor desde el Sol y las estrellas hacia el espacio. Este, razonaba Gold, es el proceso básico que imprime una asimetría pasado-futuro en el mundo. ¡Aquí reside la flecha del tiempo!

Gold trataba de identificar el origen último de la flecha preguntando por qué hay un flujo unidireccional de calor desde las estrellas hacia el espacio. ¿Qué lo causa? Una respuesta ingenua viene inmediatamente a la mente: las estrellas están calientes, pero el espacio exterior es frío. El calor fluye de lo caliente a lo frío, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica. Pero uno puede seguir preguntando *por qué* el universo es frío y oscuro. La respuesta a eso tiene algo que ver con su expansión. Cuanto más grande se hace el universo, más calor puede absorber. «Es como echar agua en un barril que nunca se llena, no porque tenga una fuga sino porque está aumentando de tamaño continuamente», explicaba Gold.²

Para aclarar esto, Gold nos invitaba a imaginar una caja perfectamente reflectante colocada por arte de magia alrededor del Sol, aislándolo del resto del universo. El contenido de la caja alcanzaría con el tiempo el equilibrio termodinámico, estableciéndose a alguna temperatura uniforme muy alta. No fluiría ni se desperdiciaría más calor; toda la energía quedaría atrapada y retenida. El Sol permanecería así para siempre, con la flecha del tiempo desaparecida. Ahora bien, si alguien fuese a abrir un agujero pequeño en la caja para que escapase algo de radiación, el balance del equilibrio termodinámico se rompería; el calor empezaría a fluir de nuevo y un cambio irreversible ocurriría una vez más; la flecha del tiempo estaría temporalmente restaurada. Cerramos el agujero, y la flecha desaparecerá de nuevo. De modo que la flecha del tiempo asociada con el flujo de energía del Sol depende de que sea capaz de derramar su calor sin restricciones a la fría vastedad del espacio.

Si el universo fuera estático y las estrellas hubieran estado brillando regularmente durante el tiempo suficiente, el universo como un todo estaría lleno de calor y de radiación luminosa de forma muy similar a la caja de Gold, pero a una escala mayor. La radiación se acumularía en el espacio entre las estrellas, haciéndose poco a poco cada vez más caliente, hasta que finalmente el cosmos estaría muy caliente en todas partes: no quedarían espacios oscuros y fríos. Desde la Tierra, el cielo entero parecería incandescente como un horno. Finalmente el equilibrio prevalecería y el universo alcanzaría una temperatura alta uniforme: una muerte térmica. No tendría lugar ningún cambio posterior para mejor o para peor. Este estado de cosas no tiene por qué suceder puesto que el universo no es estático; está en expansión. Con la misma rapidez que las estrellas tratan de calentar el universo, el espacio se extiende algo más y lo mantiene frío. Además, las estrellas no han estado brillando el tiempo suficiente para arrojar cantidades verdaderamente grandes de calor al espacio: el universo se originó hace sólo unos pocos miles de millones de años.



10.1. Universo con inversión temporal. El gráfico muestra un universo que se expande a partir de un big bang, alcanza un tamaño máximo, y colapsa en un big crunch. El tiempo corre hacia adelante en la primera mitad y hacia atrás en la segunda mitad; su dirección está mostrada por las flechas. Debido a la simetría, las palabras «bang» y «crunch» y «pasado» y «futuro» son intercambiables. Nuestra propia época está indicada, utilizando la convención temporal adoptada.

Una vez que había establecido la relación entre la flecha del tiempo y la expansión del universo, sólo faltaba un pequeño paso para que Gold llegara a suponer que, si el universo empezaba a contraerse en alguna etapa, la flecha se invertiría. Luego «la radiación tendería a converger en los objetos y a calentarlos; el calor fluiría en general desde los cuerpos fríos a los cuerpos calientes», sugirió.³ En otras palabras, el tiempo «correría hacia atrás».

Gold tenía en mente un ciclo cósmico de decenas de miles de millones de años de duración (véase la figura 10.1). La inversión no tendría lugar hasta que hubieran transcurrido miles de millones de años, cuando los hombres barbados de Platón y los jóvenes serían sin duda un recuerdo hace tiempo desaparecido. De todas formas, la perspectiva de que el universo pudiera no morir ni seguir degenerándose para siempre, sino que de algún modo podría rebobinarse, es profundamente intrigante, incluso si ya no hay nadie para observarlo.

Pensar hacia atrás

¡Es una pobre memoria la que sólo funciona hacia atrás!

LEWIS CARROLL

Por supuesto, si hubiera alguien, resulta fascinante considerar qué experimentaríamos realmente. La flecha del tiempo es tan poderosa y penetrante que su inversión dejaría a un ser perplejo, con una percepción del tiempo futuro extraña e inútil. Imaginemos que presenciamos que unos huevos rotos se recomponen como por milagro, el agua corre hacia arriba, la nieve se hace en muñecos de nieve, el agua hierve espontáneamente en pucheros sin calentar, y así sucesivamente. Estos procesos no parecerían simplemente insólitos y sorprendentes, sino que golpearían al mismo corazón de la racionalidad. La predicción y la memoria juegan una parte vital en todas nuestras actividades, y un ser que encontrara estas facultades actuando en sentido equivocado con respecto al mundo externo se vería completamente inútil.

La asimetría impuesta en el mundo por las leyes de la termodinámica implica también una direccionalidad *lógica*. Por ejemplo, yo sé que si dejo una bebida caliente durante una hora más o menos, estará fría cuando la pruebe. Pero no puedo estar seguro de que una bebida fría estaba caliente una hora antes. Podría haber estado caliente diez horas antes, o estar fría desde el primer momento. Tanto las bebidas calientes como las frías se convierten en bebidas frías una hora más tarde. De este modo, el razonamiento de-caliente-a-frío no funciona marcha atrás. Muchos estados iniciales conducen al mismo estado final; la retrodicción no tiene una respuesta única. La flecha lógica es similar a la aritmética. Todo el mundo puede deducir que $12 + 15 = 27$, pero nos quedamos bloqueados ante la pregunta: «¿Qué suma 27?». Ir marcha atrás unívocamente desde la respuesta hasta la pregunta es en general imposible: el número 27 podría obtenerse de $10 + 17$, o de $3 \times 3 \times 3$, o de alguna otra forma.

El concepto de causalidad tiene también un nexo direccional. Nos gusta suponer que la causa precede al efecto. Nos sentiríamos incómodos con la idea de que la rotura de una ventana es causa de que una piedra sea arrojada, o que una sombra que cruza la Tierra es causa de que la Luna se mueva en el camino del Sol. Sería difícil dar sentido a un mundo donde causa y efecto estuvieran intercambiados. Incluso con práctica, la predicción sería un negocio azaroso en un mundo con el tiempo invertido. Imagínese dando un sorbo de una bebida fría sin saber si el líquido permanecería frío o va a empezar a hervir espontáneamente en su estómago. De hecho, como ha señalado el escritor y matemático Martin Gardner, la vida en un mundo con el tiempo invertido sería aún más engañosa que esto.⁴ Un individuo cuyas funciones corporales y sensoriales estuvieran completamente invertidas se vería esencialmente desamparado. Por ejemplo, sería incapaz de ver u oír algo, puesto que todas las ondas

luminosas y sonoras dejarían sus órganos y viajarían de vuelta a los objetos que las emitieron.

No obstante, es poco probable que ocurra este escenario de pesadilla. Nuestros procesos cerebrales dependen de la misma física que el resto del universo, de modo que también se invertirían en un mundo con el tiempo invertido, junto con la corriente de consciencia y los procesos de razonamiento y memoria asociados a ellos. En otras palabras, en un mundo semejante percibiríamos y pensaríamos al revés. Nuestra actividad mental, incluyendo el razonamiento lógico y los conceptos como causalidad y racionalidad, también estarían invertidos. De modo que un ser con el tiempo invertido no sentiría en absoluto el tiempo invertido. Para él, todo parecería normal.

Podría parecer que he definido la inversión del tiempo como una redefinición absurda de pasado y futuro, pero no es así. Aún tiene sentido desde el punto de vista físico hablar de una región del universo que tiene su dirección temporal invertida con respecto a otra, incluso si los respectivos habitantes de dichas regiones considerasen su porción del universo como «normal», y la otra como «invertida». Es entonces instructivo contemplar lo que estos respectivos grupos de seres tendrían que decir a los otros sobre sus experiencias relativas. Norbert Wiener, el creador de la ciencia de la cibernética, consideró el problema de comunicación que aparecería si se diera este estado de cosas. Imagine un intento de conversación entre nosotros y un alienígena —quizá en un sistema estelar vecino— cuyo sentido del tiempo corriera al revés que el nuestro. Wiener observó que la direccionalidad de la lógica del alienígena estaría cambiada, transformando su mensaje racional en una jergonza:

Cualquier señal que pudiera enviarnos nos llegaría con una corriente lógica de consecuentes desde su punto de vista, pero antecedentes desde el nuestro. Estos antecedentes ya estarían en nuestra experiencia, y nos habrían servido como explicación natural de su señal, sin presuponer que un ser inteligente la había enviado.⁵

En otras palabras, los conceptos normales de significado y explicación estarían vueltos del revés, impidiendo cualquier intercambio inteligible de información. Nociones como azar y orden no se podrían traducir. La información del alienígena se convertiría en nuestra entropía, y viceversa. Así: «Si él nos dibujara un cuadrado ... a nosotros nos parecería una catástrofe —ciertamente repentina, pero explicable por las leyes naturales —por la que el cuadrado dejaría de existir». Wiener concluye que, dentro de cualquier mundo en el que la comunicación es posible, la dirección del tiempo debe ser la misma en todas partes. Esta conclusión es muy frustrante. Después de todo, el alienígena con el tiempo invertido conocería nuestro futuro y nosotros conoceríamos el suyo. Él recordaría todos los desastres que hay en nuestro futuro, ¡pero sería incapaz de advertirnos!

Antimundos

Ellos pasaban la mayor parte de su tiempo previendo el pasado.

JOHN OSBORNE

¿Hasta qué punto podemos tomar seriamente la idea de regiones diferentes del espacio-tiempo que tienen flechas del tiempo opuestas? Sorprendentemente, este es un tema recurrente en física y cosmología. Un contexto donde surge continuamente es el relacionado con los agujeros negros. En el capítulo 4 mencioné cómo Finkelstein, Kruskal y Szekeres descubrieron a finales de los años cincuenta que la superficie de un agujero negro de Schwarzschild no es una barrera física, sino meramente una puerta de entrada a una extraña región espacio-temporal que hay más allá. Se puso de manifiesto hasta qué punto era extraña cuando se examinó el álgebra que describe esta región.

Uno puede utilizar las matemáticas para calcular lo que un desventurado astronauta —Betty, por ejemplo— vería en el *interior* del agujero negro si cayera dentro de uno. Sabemos que pronto llegaría a tener un accidente en la singularidad central, pero en el camino a su cita con el destino sería capaz de tomar nota de lo que le rodeaba. Esto incluiría parte de la región interior del agujero negro, y también el universo exterior de donde ella procedía. Como expliqué en el capítulo 4, aunque Betty no puede ser vista desde el exterior del agujero, el recíproco no es cierto: alguna luz procedente del exterior del agujero la seguiría y la adelantaría antes de que ella llegase a la singularidad, de modo que aún podría ver el mundo externo que había dejado tan recientemente. Pero hay más. Una vez en el interior, Betty sería capaz de vislumbrar otra región, completamente diferente de espacio-tiempo que, en cierto sentido, está «al otro lado» del agujero negro, una región que es totalmente inaccesible para nosotros.

Según la descripción matemática idealizada, el «otro universo» es una imagen especular del nuestro, que se extiende hasta el infinito. Hay, sin embargo, una diferencia crucial. La dirección del tiempo en el otro universo está invertida con respecto al nuestro. Esto supondría un extraño conjunto de experiencias a medida que Betty se sumerge hacia adentro, puesto que ella estaría presenciando dos universos diferentes con flechas del tiempo opuestas. De hecho, la región interior del agujero negro sería un crisol de influencias con direcciones opuestas, una región confusa donde el tiempo hacia adelante y el tiempo invertido se cruzan y chocan. Sin embargo, aunque Betty puede ver el otro universo, ella no puede viajar a él del mismo modo que no puede volver a nuestro universo. Ella está atrapada por la intensa gravedad y es arrastrada irresistiblemente hacia la singularidad. Evidentemente, el agujero negro de Schwarzschild no ofrece una forma de poner a prueba el escenario de Platón. De todas formas, la idea de que pudiera existir una especie de universo paralelo con el tiempo corriendo en sentido contrario —un antimundo, si usted quiere— tiene cierto atrac-

tivo. Hemos encontrado antes una especulación semejante en el contexto del kaón.

Cuando se les pregunta, la mayoría de los físicos y de los astrónomos desechan el antimundo de Schwarzschild como una ficción, y por buenas razones. Ningún antimundo existiría a menos que el universo se originase ya con agujeros negros incrustados en él. Esto se debe a que la solución de las ecuaciones de Einstein sobre las que está basado se aplica sólo a la región *vacía* exenta de materia. Si se forma un agujero negro a partir del colapso de una estrella —el escenario usual— entonces esta solución no puede ser continuada hasta llegar al antimundo, puesto que la materia bloquea el camino.

Existen problemas más generales al empalmar regiones del universo con flechas del tiempo con direcciones opuestas. Por ejemplo, ¿qué sucede en la unión? Para apreciar el tipo de caos que ocurre, imaginemos algo sencillo como un juego de billar americano. Supongamos que un científico loco crea un laboratorio en el que el tiempo corre marcha atrás, y lo equipa con una mesa de billar americano. En el juego normal, la bola impulsada por el taco golpea un triángulo ordenado de bolas y las dispersa en un estado desordenado. Al pasarlo al revés, las bolas que se mueven caóticamente se las arreglan de algún modo para llegar simultáneamente a un triángulo, e intercambian impactos de tal modo que llegan al reposo, concentrando su energía en la bola inicial, que entonces sale hacia el extremo de la mesa. Esta podría ser la escena que los científicos observarían al espiar por la ventana del laboratorio durante una fase del juego. La reunión de las bolas en esta extraña manera es extraordinariamente vulnerable a la más mínima perturbación. Una mínima perturbación en el movimiento de una simple bola comprometería la exquisita coreografía y destruiría cualquier esperanza de una reunión ordenada en un triángulo. (Si usted no está convencido, vaya y trate de hacer el experimento.)

La hipersensibilidad de un sistema con el tiempo invertido implica que las influencias aleatorias procedentes del universo exterior pronto harían naufragar el experimento. Si se pudiera aislar *completamente* el laboratorio, entonces la inversión del tiempo sería en principio posible. Pero en la práctica no puede hacerse esto. El calor y las perturbaciones gravitatorias siempre intervendrán en un grado limitado, dando empujones minúsculos pero fatídicos a los contenidos del laboratorio y destruyendo la delicada orquestación. Las moléculas son mucho más sensibles a las perturbaciones que las bolas de billar. Incluso un simple fotón que entrase en el laboratorio imaginario por la ventana de inspección bastaría para provocar un cambio espectacular. Cuando una simple influencia perturbadora entra, los efectos de choque se multiplican en cascada incontrolablemente, amplificando rápidamente la perturbación original, hasta que la influencia afecta a todo lo que hay en el laboratorio, bolas de billar incluidas.

El caos en la interfase echa por tierra la divertida teoría, planteada en el capítulo 9, de que puedan existir sistemas estelares donde el tiempo corra en sentido contrario al nuestro. Recordemos que no veríamos tales objetos, pues-

to que la luz estaría viajando *desde* nuestros ojos a dichas estrellas, planteando la posibilidad de que éstas estén acechando allí invisibles en el espacio. ¡Ay!, el confuso enmarañamiento de su luz estelar avanzada con nuestra luz retardada haría añicos la disposición inestable, y forzaría el dominio de una flecha del tiempo sobre la otra (cuál de ellas resultara victoriosa dependería de las circunstancias). A esta conclusión llegan también los teóricos de los agujeros blancos. Supongamos un agujero blanco formado en el big bang, rodeado por una región del universo donde el tiempo tuviera su dirección normal. Los fotones incidentes y otras perturbaciones producirían rápidamente una inestabilidad, y al momento convertirían el agujero blanco en un agujero negro.

Dar cuerda al reloj

Usted nunca puede planear el futuro a partir del pasado.

EDMUND BURKE

Ninguno de los problemas precedentes significa que sea estrictamente imposible que regiones vecinas del universo tengan flechas del tiempo mutuamente invertidas. El escenario del laboratorio loco descrito más arriba implica la yuxtaposición forzosa de dos regiones semejantes, que es abrumadoramente probable que sean incompatibles y lleven al caos. Sin embargo, como mencioné en el capítulo 1, Boltzmann especulaba ya sobre la inversión del tiempo hace más de un siglo, de un modo que evita las dificultades antes mencionadas.

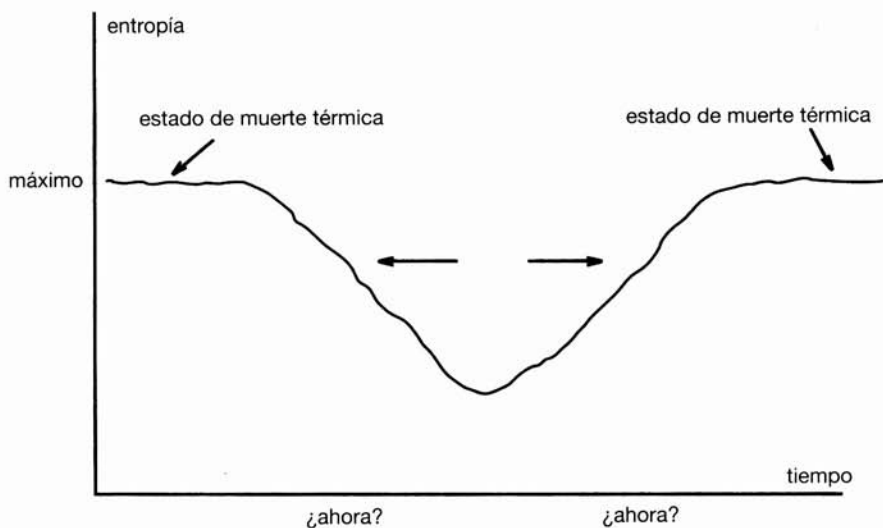
Boltzmann se dio cuenta del papel clave del azar en la actividad molecular. En un grupo de partículas que se mueven caóticamente siempre hay una pequeña probabilidad de que algunas de ellas se encuentren cooperando ciegamente, quizá agrupándose como las bolas de billar para formar una disposición ordenada. La estadística muestra que las probabilidades contra tales «conspiraciones» accidentales decrecen a medida que se incluyen más partículas. Por ejemplo, de vez en cuando un grupo de diez moléculas de oxígeno dentro de un matraz se encontrarán, por azar, localizadas en la mitad derecha del matraz, dejando la mitad izquierda vacía. Típicamente, esto ocurrirá aproximadamente una vez por segundo. Pero usted podría esperar muchos minutos para que lo mismo ocurra con veinte moléculas. Cuando usted tiene en cuenta que un matraz de 100 litros de aire contiene más de un billón de billón de moléculas, no sorprende que no veamos tales sucesos improbables en una escala cotidiana. De todas formas, dado el tiempo suficiente, podría suceder. El trabajo iniciado por Boltzmann, y desarrollado por Willard Gibbs, Einstein y otros, confirmó que inversiones a pequeña escala están siempre ocurriendo a nivel molecular, durante muy cortos intervalos de tiempo. En su artículo de 1905 sobre el movimiento browniano, escrito el mismo año que su artículo sobre la relatividad, Einstein investigó la forma en que una partícula minúscula suspendida

en un fluido puede resultar zarandeada como resultado del desigual bombardeo molecular de sus superficies. En efecto, las moléculas de un lado pueden «confabularse» y golpear la partícula con más fuerza que las del lado contrario, provocándole una sacudida. Estos movimientos minúsculos revelan fluctuaciones ocultas que ocurren continuamente en el fluido, lo que equivale al más mínimo indicio de una inversión de entropía al estilo de Boltzmann. Obviamente, las inversiones a escala humana son muy improbables. Pero si el universo fuera en verdad infinitamente viejo, y por lo demás sin cambios en general (el propio Boltzmann no sabía nada sobre la expansión del universo), eventualmente deberían ocurrir inversiones sustanciales en el tiempo.

En el capítulo 1 aludí a la sorprendente sugerencia de Boltzmann de que el universo alcanzó su orden actual como resultado de una fluctuación a escala cósmica increíblemente rara. La idea aquí es que durante casi una eternidad el universo languidece en un estado sombrío muy próximo al equilibrio termodinámico —la famosa condición de muerte térmica— en el que no hay flecha del tiempo y no sucede nada de mucho interés. Sin embargo, muy ocasionalmente y puramente por azar, se agitará y producirá orden espontáneo. Al cabo de una inmensidad de tiempo, durante el cual aparecen y desaparecen innumerables fluctuaciones aleatorias en escalas pequeñas e intermedias, debe ocurrir eventualmente una fluctuación de tamaño verdaderamente astronómico, una coincidencia de proporciones increíbles, que implica innumerables billones de partículas disponiéndose ciegamente en estrellas, planetas, personas, etc. Durante esta fase de «dar cuerda» habrá una flecha del tiempo que apunte hacia atrás. Cuando la fluctuación termina, el universo procede a desplegarse de nuevo, gradualmente, deslizándose a su estado de equilibrio más normal, generando cuando esto sucede una flecha que apunta hacia adelante. Este increíble modelo describe un tipo de pseudociclicidad, porque tales episodios de ordenación y desordenación espontánea ocurrirán infinitas veces en la infinita duración de un universo sempiterno.

Una característica clave de la inversión del tiempo de Boltzmann es su cualidad de espalda con espalda. Las flechas apuntan *alejándose* una de otra —es decir, la nuestra apunta al futuro, mientras que la época de sucesos invertidos ocurrió en nuestro pasado (véase la figura 10.2). Esto es lo contrario de la sugerencia de Gold, en la que la época dirigida hacia atrás está en nuestro *futuro*. Esto supone una gran diferencia, puesto que en el caso de Boltzmann las influencias causales se propagan siempre hacia afuera, más que hacia adentro, de la región con el tiempo invertido, evitando así los horrores enmarañados del tipo que discutí antes.

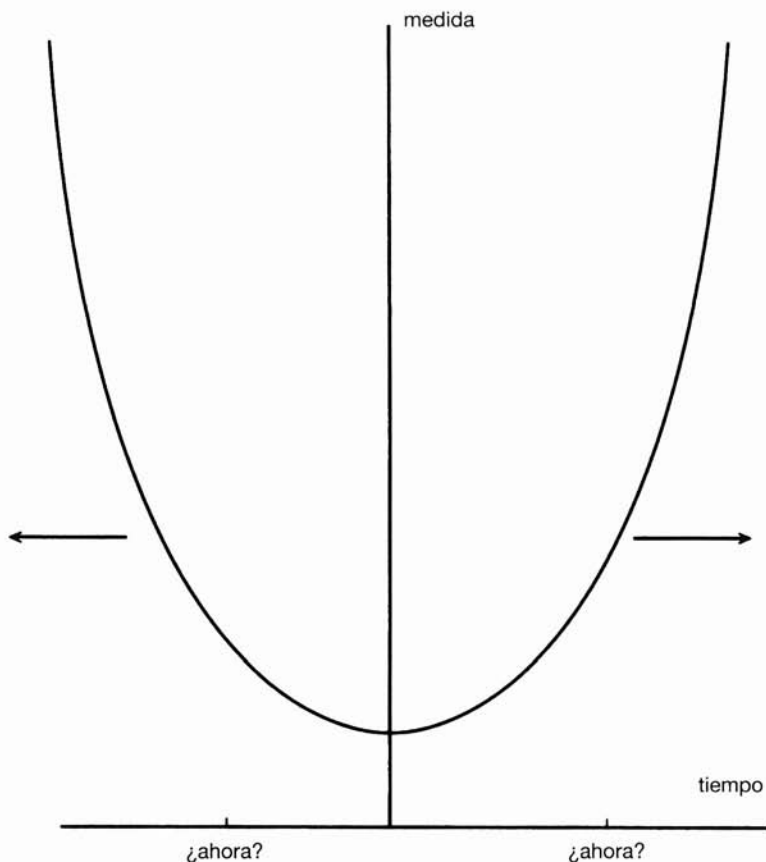
Por la misma razón, Fred Hoyle y Jayant Narlikar fueron capaces de obtener un tipo de cosmos con el tiempo invertido, pero uno que no tenía que esperar, *à la* Boltzmann, intervalos de tiempo absurdos para que el solo azar haga el truco.⁶ En el modelo de Hoyle-Narlikar el universo se contrae durante un tiempo infinito, alcanza un estado de máxima compresión, se invierte (rebota),



10.2. El universo que se da cuerda a sí mismo. La entropía del universo permanece cerca de su valor máximo durante eones. Muy de cuando en cuando, sufre una gran fluctuación aleatoria que da lugar a una descripción en el gráfico. La situación es simétrica respecto al tiempo, pero, a diferencia del modelo de Gold (representado en la figura 10.1), la flecha del tiempo apunta siempre alejándose del punto de simetría.

y se expande de nuevo para siempre (véase la figura 10.3). Estos científicos sugirieron imaginativamente que la flecha del tiempo siempre apunta alejándose del punto de rebote. Nosotros estamos situados en la fase de expansión y la flecha del tiempo apunta hacia el futuro, pero en la fase de contracción apuntaba hacia el pasado. Por supuesto, la situación es perfectamente simétrica, de modo que palabras como «expansión» y «futuro» pueden ser intercambiadas con «contracción» y «pasado». Cualquiera sensible percibiría que el universo se está expandiendo y el tiempo «va hacia adelante», cualquiera que fuese la época en que se encuentre. La causalidad impide cualquier comunicación entre seres en fases en direcciones opuestas. Puesto que cualquier alienígena de un antimundo está situado lejos en nuestro pasado, él no puede conocer nuestro futuro, de modo que se evitan los problemas que surgen con seres contemporáneos con el tiempo invertido. Análogamente, ninguna influencia destructiva puede entrar en nuestro mundo procedente del antimundo, porque todas estas influencias parten de nuestro remoto pasado y viajan *hacia atrás* en el tiempo con respecto a nosotros, alejándose de nuestra época.

Por desgracia, no puede decirse lo mismo de la teoría de Gold, donde las flechas chocan frontalmente (véase la figura 10.1). En este caso, la flecha dirigida hacia el pasado está en nuestro futuro, y las influencias de nuestra época



10.3. En este modelo de Hoyle y Narlikar, el universo se contrae a partir de un tamaño infinito, rebota en un mínimo, y se expande de nuevo para siempre. El tiempo corre hacia adelante en la fase de expansión y hacia atrás en la fase de contracción, tal como lo juzgamos nosotros (véanse las flechas). La situación es, por supuesto, perfectamente simétrica respecto al tiempo.

se propagan causalmente hacia adelante en el tiempo hacia el antimundo. Lo mismo es cierto a la inversa: influencias del antimundo nos llegan desde el futuro, hacia atrás en el tiempo. Cuando llegan estas influencias amenazadoras empiezan los problemas, pues se confunden procesos físicos con direcciones opuestas. Hay opiniones diferentes sobre si el desorden resultante invalidará por completo la teoría, o si un montaje suficientemente imaginativo podría aún hacer que todo encajase bien.

Para hacerse una idea de lo que necesita parchearse, consideremos el punto básico de la teoría de Gold —que el flujo de radiación de las estrellas se invier-

te cuando se invierte la expansión del universo. Aunque la termodinámica confiere a la conjetura de Gold cierta plausibilidad, ésta no resiste bien un examen. El problema está en el desajuste que existe entre la expansión del universo y el flujo de calor y luz en el espacio. Si el universo empezara a contraerse mañana, pasarían miles de millones de años antes de que empezáramos a ver que las galaxias más distantes se aproximan en lugar de alejarse, puesto que la luz necesita ese tiempo para atravesar el universo. Para que el flujo de calor del Sol empiece a correr hacia atrás, la radiación procedente de las profundidades del espacio tendría que empezar a converger hacia el Sol miles de millones de años antes de que la expansión se convirtiera en contracción. Esto requiere que el universo esté sujeto a una gigantesca conspiración incorporada que de algún modo pueda anticipar sucesos futuros con mínimos detalles, lo que es un poco difícil de aceptar, aunque quizá no sea imposible.

El mayor error de Hawking

Quien nunca comete un error nunca hace un descubrimiento.

SAMUEL SMILES

Los obstáculos antes mencionados no impidieron a Stephen Hawking jugar con una inversión del tiempo cósmico al estilo de Gold. No se vio llevado a ello a partir del estudio del comportamiento de la luz estelar, sino a partir de la cosmología cuántica. En el modelo cosmológico favorito de Hawking, el universo se origina en un big bang, se expande hasta un tamaño máximo y luego se contrae de una forma simétrica para destruirse en un «big crunch» final. Cuando Hawking aplicó la mecánica cuántica a este modelo, del modo que he descrito en el capítulo 7, parecía a primera vista como si las leyes de la mecánica cuántica forzasen automáticamente al universo a una evolución temporalmente simétrica, no sólo en su movimiento general, sino también en sus detalles microscópicos. Sin embargo, Hawking admitió más tarde que esta teoría había sido su «mayor error», y en una reunión que tuvo lugar en España en septiembre de 1991, dedicada enteramente a la cuestión de la flecha del tiempo, explicó con humor a una audiencia abarrotada cómo se había extraviado.⁷

A pesar de esta retractación pública, el genio había salido de la botella. James Hartle y el ganador del premio Nobel Murray Gell-Mann del Instituto Tecnológico de California advirtieron que, si las reglas de la mecánica cuántica se modificasen ligeramente, el error de Hawking podría corregirse y podría imponerse en realidad un universo completamente simétrico en el tiempo. Gell-Mann y Hartle no proponían que el universo *tuviera* que ser así, sino simplemente que podría serlo. Continuaron una animada pero más bien inconcluyente discusión sobre si, en el caso de que ellos tuvieran razón, nosotros notaríamos algo anormal. ¿Podríamos tener algún presentimiento en la época actual

de la existencia de un antimundo en nuestro futuro lejano? Gell-Mann y Hartle señalaban que podría ser posible detectar algunos procesos aparentemente irreversibles que se frenaban poco a poco en anticipación de una inversión por venir. Las vidas medias de algunos isótopos radiactivos de gran duración, por ejemplo, podrían sentir el «cambio de la marea» diez mil millones de años antes. El flujo de radiación hacia el espacio podría ahora estar inhibido muy ligeramente. Quizá había llegado el tiempo para que Partridge repitiera su experimento.

Un tiempo para todos

Hay tiempo de nacer y tiempo de morir; tiempo de plantar y tiempo de arrancar lo plantado.

ECLESIASTÉS, 3:2

Mientras, el filósofo de Sydney Huw Price ha criticado a la comunidad física por sus «dobles raseros», insistiendo en que un universo que se expande y contrae simétricamente *debe* tener una flecha del tiempo que cambia con él, sobre la base de que no tenemos derecho a distinguir un extremo temporal («el comienzo», o big bang) del otro («el fin», o big crunch).⁸ Cualesquiera que sean los argumentos físicos o filosóficos invocados para hacer que la flecha del tiempo apunte desde el big bang hacia el futuro, el mismo argumento puede invocarse para hacer que apunte desde el big crunch hacia el pasado. El argumento de Price es que, puesto que las leyes de la física no distinguen una dirección del tiempo de la otra (ignorando los kaones), y puesto que el universo como un todo se expande y contrae simétricamente, no hay nada físico que señale «comienzo» y «fin».

La cosmología cuántica de Hawking, Hartle y Gell-Mann, sin embargo, tiene una cláusula de escape que hace posible evitar la trampa de Price. Para explicar cuál es ésta, tengo que reconsiderar algunos hechos pertinentes sobre la mecánica cuántica. Recordemos del capítulo 7 que todos los sistemas cuánticos están sujetos a una incertidumbre intrínseca. A medida que un sistema típico evoluciona, existen muchos resultados posibles, muchas realidades contendientes en oferta. Por ejemplo, en los diversos experimentos de láser que describí un fotón tenía la elección de qué camino seguir a través de un aparato. En el caso de un experimento de laboratorio el observador siempre verá una realidad simple, específica y concreta seleccionada entre los posibles contendientes. Así pues, una medida del camino del fotón siempre dará un resultado de *o bien* un camino *o bien* el otro, pero nunca ambos. Cuando se llega al universo como un todo no hay observador externo, porque el universo es todo lo que existe, de modo que la cosmología cuántica se enfrenta a un problema de interpretación capital. La salida favorita consiste en suponer que todas las realidades cuánticas contendientes gozan del mismo estatus. No son meros «mundos fantasmas»,

o «realidades potenciales», sino «realmente reales» —todas ellas. Cada realidad corresponde a un universo entero, completo con su propio espacio y tiempo. Estos universos no están conectados *a través* del espacio y el tiempo, sino que son de algún modo «paralelos», existiendo uno al lado del otro. En general, habrá una infinidad de ellos.

La existencia de una serie infinita de universos y una infinidad de tiempos significa que cualquier cosa que esté permitida que suceda dentro del amplio alcance de la borrosidad cuántica *sucede* en al menos uno de los universos. Un mosaico tan rico de existencia hace posible que la teoría se lleve la palma. La evolución mecanocuántica global del conjunto entero de universos es simétrica respecto al tiempo: no distingue big bang de big crunch. Sin embargo, cada universo individual posee en general una flecha del tiempo bien definida. Así, existirán universos donde esta flecha apunta «hacia adelante», y otros donde apunta «hacia atrás». Ninguna dirección es más probable que otra. Habrá también una muy minúscula fracción que sufra inversiones parciales al estilo de Gold. Pero es abrumadoramente probable que un observador casual se encuentre en un universo con una flecha del tiempo estable, y determine que la singularidad pasada, relativa a esta flecha, es el big bang (origen) y la futura es el big crunch (fin) del universo. Bang y crunch serán físicamente distintos en la gran mayoría de los casos.

Usted podría estar preguntándose por qué, si existen tantos universos, sólo vemos uno de ellos. Esto se explica suponiendo que cuando un universo se desdobra en, digamos, dos mundos alternativos, los observadores también se desdoblan, y cada una de sus copias percibe su mundo respectivo. En la práctica, procesos cuánticos que suceden incesantemente en el nivel atómico están desdoblado continuamente al universo, y al lector, en un enorme número de copias. Cada versión de usted cree que es único. Por extraño que pueda parecer, es enteramente consistente con la experiencia, con tal de que los diversos universos permanezcan separados. Los problemas vienen, no obstante, si empiezan a superponerse o a interferir entre sí.

Esto lleva a una segunda pregunta: ¿es posible observar los otros universos? La respuesta usual es no, pero no hay acuerdo unánime sobre esto. David Deutsch, un físico de la Universidad de Oxford con una afición hacia lo inusual, cree que en principio podrían hacerse experimentos microscópicos en los que dos o más mundos se unen temporalmente, permitiendo que se deslicen influencias físicas.

¿Qué podría ocurrir si nuestro universo (¡uno de ellos!) se relacionase temporalmente con uno de los antimundos? ¿Seríamos capaces de echar una ojeada al futuro de alguna manera en sombras? ¿Podríamos encontrar objetos en nuestro universo que hagan aparentemente cosas milagrosas (bolas de billar reuniéndose) porque su dirección temporal se ha invertido temporalmente? ¿Esperaríamos coincidencias o sucesos sorprendentes con grandes probabilidades en contra, pero que, vistos en un tiempo invertido, son perfectamente normales

(como un mazo de cartas que se coloca en el orden correcto al barajarlo)? ¡Ay!, este es un tema para la ciencia ficción. Pero la ciencia ficción da a veces una indicación a la ciencia real, como revela el próximo capítulo. En circunstancias normales, una unión entre dos mundos cuánticos sólo produciría efectos a nivel atómico, antes que el tipo de fenómenos paranormales recién descritos. Sin embargo, algunos científicos sospechan que *puede* haber circunstancias en las que una mezcla de realidades cuánticas se manifieste espectacularmente a escala humana.

Viajes en el tiempo: ¿realidad o fantasía?

El problema aquí involucrado me perturbaba ya en la época en la que estaba construyendo la teoría de la relatividad general.

ALBERT EINSTEIN

No me tomo muy en serio el viaje en el tiempo.

ARTHUR C. CLARKE

Hacer señales al pasado

Como muchas personas, leí por primera vez la narración *La máquina del tiempo* de H. G. Wells cuando era un adolescente, y dejó en mí una impresión duradera. De hecho, probablemente influyó en mi determinación de hacerme científico. La característica de una gran obra de ficción es que pueda superar el test del tiempo. *La máquina del tiempo* entra ciertamente en esta categoría, e incluso hoy puede leerse con deleite, pese a que fue publicada en 1895. Aunque esto sucedió una década antes de la teoría de la relatividad especial, Wells anticipó algunos aspectos del tiempo de Einstein con asombrosa precisión.

Varias veces he señalado que, antes de Einstein, los científicos y los filósofos pensaban generalmente en el tiempo como si estuviera simplemente *ahí*. La física trataba del comportamiento de la materia y de la energía *en* el espacio y *en* el tiempo. La idea de *manipular* el tiempo no tenía mucho sentido. Wells, sin embargo, conjeturó que una máquina que empleara fuerzas físicas podría cambiar el tiempo: en particular, que la máquina, junto con cualquier ocupante, podría viajar a través del tiempo de la misma forma que algunas máquinas pueden viajar a través del espacio.

La teoría de la relatividad puso al tiempo firmemente dentro del ámbito de la física, uniendo el espacio y el tiempo con las fuerzas físicas y la materia

de una forma matemáticamente precisa. Desde el primer momento estaba claro que la relatividad permitía un tipo de viaje en el tiempo. El efecto de dilatación temporal, que he discutido ampliamente en capítulos anteriores, implica el viaje hacia el futuro. ¿Recuerdan las aventuras de las gemelas Ann y Betty? Cuando Betty parte a gran velocidad hacia una estrella, vuelve para encontrar a Ann mayor que ella. En efecto, Betty ha viajado hacia el futuro de Ann. En principio, viajando a una velocidad muy próxima a la de la luz con respecto a la Tierra, Betty podría regresar a casa en el futuro lejano, después de que hayan transcurrido millones de años en la Tierra y haya desaparecido toda huella de la humanidad. La gravedad también puede frenar el tiempo, haciendo posible que Betty viaje al futuro de Ann con tal de que pase tiempo en un campo gravitatorio más intenso. De hecho, todos somos inconscientemente viajeros del tiempo en una medida limitada, debido a la gravedad de la Tierra. En este sentido, entonces, el viaje en el tiempo es una realidad, y puede ser observado por los curiosos en cualquier laboratorio de física bien equipado. Sin embargo, la pregunta realmente interesante es, ¿puede un viajero en el tiempo que va hacia el futuro «regresar» de nuevo alguna vez? Está muy bien tener la posibilidad de usar el movimiento a gran velocidad o los campos gravitatorios intensos para alcanzar el futuro lejano pero, si ustedes se quedan ahí, el atractivo del viaje en el tiempo queda devaluado.

Volver desde el futuro equivale a viajar al pasado, y a este respecto la teoría de la relatividad es mucho más oscura en sus predicciones. Antes de entrar en ello, permítanme resaltar la necesidad de mantener una distinción clara entre la *inversión* en el tiempo, del tipo discutido en el capítulo anterior, y el viaje en el tiempo. En el primer caso, la propia flecha del tiempo está invertida, haciendo que el tiempo «corra hacia atrás». El viaje al pasado, por el contrario, deja la dirección del tiempo invariable, pero implica de algún modo visitar una época anterior.

En el capítulo 3 discutí el tema de los taquiones —partículas hipotéticas que viajarían siempre más rápidas que la luz— y mencioné que «más rápido que la luz» puede significar «hacia atrás en el tiempo». Permítanme explicar ahora por qué esto es así. Supongamos que tenemos una pistola que puede disparar partículas a un blanco. Consideremos primero el caso de balas ordinarias. La experiencia y el sentido común indican que la bala golpea el blanco *después* de ser disparada. Si llamamos suceso E_1 al acto de disparar la pistola, y suceso E_2 a la llegada de la bala al blanco, entonces podemos estar completamente seguros de que la secuencia temporal de estos dos sucesos es $E_1 E_2$. Ahora bien, la teoría de la relatividad predice que el intervalo de tiempo entre E_1 y E_2 puede variar según el estado de movimiento (o la situación gravitatoria) del observador. Sin embargo, la teoría también deja claro que, por mucho que se estire y contraiga el intervalo $E_1 E_2$, el *orden* temporal $E_1 E_2$ nunca se invierte. En otras palabras, la relación antes-después no es afectada por el movimiento o la gravedad, aunque la *duración* del intervalo pueda serlo.

Todo esto cambia cuando se admiten los taquiones. Si la bala fuera taquíón-

nica, y se dirigiera a su blanco más rápida que la luz, entonces es posible que un observador viera que la bala incide en el blanco *antes* de que la pistola fuera disparada! Por ejemplo, supongamos que la bala viaja al doble de la velocidad de la luz: entonces, alguien que se esté moviendo en la misma dirección de la bala al 90 por 100 de la velocidad de la luz vería que el blanco se hace añicos primero y la pistola dispara a continuación. La bala parecería viajar hacia atrás desde el blanco hacia el cañón de la pistola. Alguien que viajara a la mitad de la velocidad de la luz en la misma dirección vería que la bala viaja a velocidad infinita, saltando de la pistola al blanco instantáneamente. Para el movimiento más rápido que la luz, la secuencia temporal de sucesos E_1 , E_2 ya no está fija, sino que puede parecer invertida, como E_2 , E_1 , en ciertos sistemas de referencia. En dichos sistemas, los taquiones parecen viajar hacia atrás en el tiempo con respecto a los procesos físicos normales.

El movimiento taquiónico queda lejos del sueño de H. G. Wells, puesto que no permite que la materia normal, del tipo de la que están constituidas las personas, viaje al pasado. Sin embargo, si los taquiones existieran y pudieran ser manipulados libremente, esto nos capacitaría al menos para enviar señales al pasado, incluso si nosotros no pudiéramos viajar allí. Así es como Ann y Betty podrían hacerlo. Betty está en el espacio viajando hacia su estrella favorita al 80 por 100 de la velocidad de la luz. A mediodía en la Tierra, Ann envía una señal taquiónica a Betty a una velocidad cuatro veces superior a la de la luz, con respecto al transmisor de la Tierra. Por lo que respecta a Ann, la señal llega a Betty algún tiempo después. Pero Betty ve las cosas de forma diferente. Desde su punto de vista, la señal llega *antes* de que Ann la envíe. (Algunas personas podrían argumentar que, desde el sistema de referencia de Betty, es Betty quien envía la señal a Ann, pero no entraré en los aspectos semánticos de este escenario engañoso.) El paso siguiente es la respuesta de Betty, utilizando también un transmisor de taquiones. Supongamos que los taquiones de Betty viajan también a una velocidad cuatro veces superior a la de la luz con respecto al transmisor, pero esta vez el transmisor está en el cohete en marcha. Es ahora Betty quien calcula que los taquiones llegarán después de ser enviados, mientras que Ann, de nuevo en la Tierra, los recibe antes de que Betty los transmitiera. Por lo que respecta a Ann, la señal saliente viaja al futuro, y la respuesta viaja al pasado. Mediante una adecuada disposición de velocidades, la respuesta puede volver a la Tierra antes de que se envíe la señal original. Esta sorprendente posibilidad fue bien entendida por Einstein, quien claramente se formó una oscura opinión sobre ella. En su artículo de 1905, escribió que las velocidades mayores que la de la luz «no tienen posibilidades de existencia». Era un sentimiento ampliamente compartido por sus colegas. «El límite para la velocidad de las señales —escribió Eddington— es nuestro baluarte contra la mezcla desordenada de pasado y futuro ... Las consecuencias de ser capaces de transmitir mensajes concernientes a sucesos aquí-ahora [a mayor velocidad que la luz] son demasiado extrañas para contemplar».¹

Para aquellos lectores a los que les guste hacer números, he aquí un ejem-

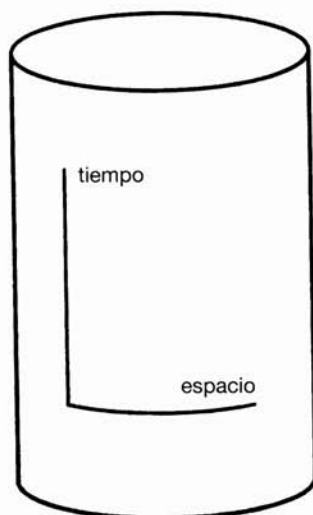
plo explícito. Supongamos que Betty parte a las 10:00 a.m. y al mediodía (tiempo terrestre) Ann envía la señal original hacia Betty a una velocidad cuatro veces superior a la de la luz respecto a la Tierra. Puesto que Betty viaja a un 80 por 100 de la velocidad de la luz, ella recibirá la señal a las 12:30 p.m., tiempo terrestre, momento en que ella estará a dos horas-luz en el espacio, tal como se observa en el sistema de referencia de Ann. Por supuesto, el reloj de Betty indicará algo completamente diferente. El viaje de 2 1/2 horas desde la Tierra le parecerá a ella de sólo 1 1/2 horas, debido al factor 0,6 de dilatación temporal. El reloj del cohete indicará, por lo tanto, las 11:30 a.m. La distancia a la Tierra medida en el sistema de referencia de Betty será también diferente. Por lo que respecta a Betty, es la Tierra la que se está alejando a 0,8 veces la velocidad de la luz, de modo que su viaje de 1 1/2 horas habrá puesto una distancia de $0,8 \times 1,5 = 1,2$ horas-luz entre ella y Ann. Si Betty responde sin demora, su señal, viajando a una velocidad cuatro veces superior a la de la luz durante este intervalo de tiempo en el sistema de referencia *de Betty*, completará el viaje de retorno en 3/8 de hora, o 22 1/2 minutos, del tiempo de Betty, llegando a la Tierra a las 11:52 1/2 a.m. visto desde el sistema de referencia de Betty —es decir, 1 7/8 horas después de su partida, momento en que ella está a 1 1/2 horas-luz de la Tierra en su sistema. Pero, en el sistema de Betty, es el reloj *de Ann* el que se ha dilatado, en un factor 0,6. El tiempo total del viaje de 1 7/8 horas como dice el reloj de Betty se traduce por consiguiente en $1 \frac{7}{8} \times 0,6 = 1 \frac{1}{8}$ horas en el reloj de Ann, que, por lo tanto, marca las 11:07 1/2 a.m. Esto significa que la señal de retorno llega a la Tierra 52 1/2 minutos *antes* de que Ann enviara la señal original.

Visitar el pasado

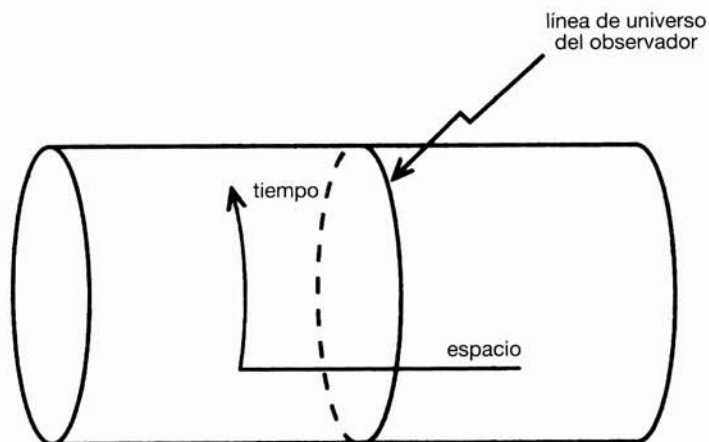
El tiempo es el modo que tiene la naturaleza de evitar que todo suceda a la vez.

JOHN WHEELER

Aunque la teoría de la relatividad especial de Einstein prohíbe inequívocamente que la materia ordinaria, y por implicación los seres humanos, viajen al pasado, la teoría de la relatividad general es menos categórica sobre esta cuestión. Inmediatamente después de que la teoría fuera publicada, Hermann Weyl advirtió que en un espacio-tiempo con una disposición gravitatoria concreta la línea de universo de una persona —su camino en el espacio-tiempo— podría curvarse hacia atrás y cortarse a sí misma. La hipótesis de Weyl es que, incluso si *localmente* una partícula nunca puede superar la velocidad de la luz, *globalmente* su futuro podría conectarse con su pasado. Esta posibilidad surge porque un campo gravitatorio implica que el espacio-tiempo está curvado, y la curvatura podría ser suficientemente grande y extenderse lo suficiente para unir un espacio-tiempo consigo mismo de nuevas formas. Para ver lo que tengo en mente, veamos la figura 11.1.



(a)



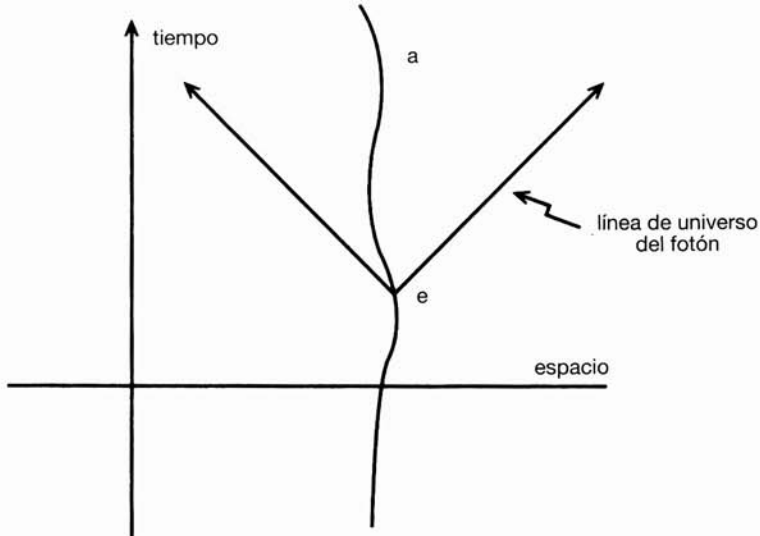
(b)

11.1. Curvando el espacio-tiempo en lazos. Se muestra una dimensión espacial además del tiempo. En (a) el espacio está curvado en un lazo, implicando que tiene una extensión finita, de modo que el universo podría ser circunnavegado. En (b) el tiempo está curvado en un lazo. La línea de universo de un observador estático podría eventualmente «circunnavegar el tiempo» y reunirse consigo misma.

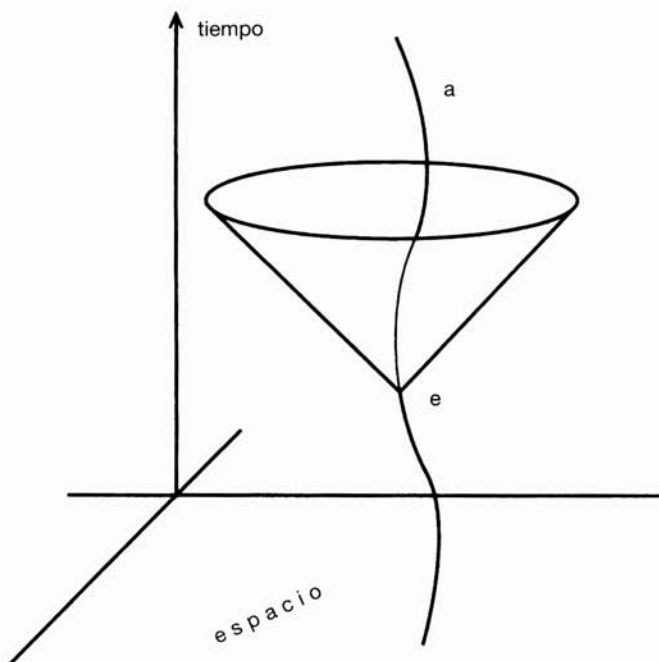
Aquí el espacio-tiempo se curva en un lazo de dos formas diferentes. En (a) el espacio se curva para conectarse consigo mismo. Si el universo tuviera esta geometría, un observador podría dar la vuelta al universo y volver a su punto de partida. En (b) el espacio-tiempo se curva en la dirección del tiempo y se conecta consigo mismo en el pasado. En esta disposición, un observador que simplemente permanezca en reposo en el espacio volvería eventualmente a un punto anterior en el tiempo.

La distinción entre ir atrás en el tiempo viajando más rápido que la luz e ir atrás distorsionando el propio espacio-tiempo es una distinción crucial, que se ilustra mejor introduciendo el concepto de «cono de luz». En el capítulo 2 expliqué el concepto de un diagrama de Minkowski (véase la figura 2.2), en el que el espacio y el tiempo se representan en la misma imagen. Ahora quiero elaborar esto algo más. La figura 11.2 (a) muestra un diagrama de Minkowski en el que faltan dos dimensiones espaciales. El tiempo se representa en vertical y el espacio en horizontal. También se muestra la línea de universo de un objeto típico, designada a . La modificación que he introducido en esta imagen consiste en incluir las trayectorias espacio-temporales de dos pulsos luminosos (es decir, las líneas de universo de dos fotones), emitidos desde a en un cierto instante e y viajando a través del espacio. Usted puede imaginar un destello de luz instantáneo en e . Un fotón viaja hacia la derecha, el otro hacia la izquierda, y ambos describen trayectorias en el espacio-tiempo que corresponden a líneas rectas inclinadas. Las trayectorias deben ser rectas, puesto que la luz viaja siempre a la misma velocidad. Si se escoge el año-luz como unidad de medida a lo largo del eje espacial, y el año como la unidad de tiempo, entonces las líneas de universo de los dos fotones estarán inclinadas cuarenta y cinco grados en el gráfico. Es fácil añadir otra dimensión espacial al gráfico; véase la figura 11.2 (b). El destello de luz en e envía ahora fotones en todas las direcciones en un plano horizontal en lugar de hacerlo sólo a la izquierda y a la derecha. Las líneas de universo de todos estos fotones yacen a lo largo de un cono invertido con su vértice en e . Éste se denomina «cono de luz». No hay necesidad de preocuparse por la tercera dimensión espacial.

Podemos dibujar conos de luz imaginarios que empiezan (es decir, tienen el vértice) en cualquier suceso en el espacio-tiempo; en particular, en cualquier punto a lo largo de la línea de universo de la partícula. Puesto que la velocidad de la luz constituye un límite para la relación causa y efecto, la disposición de los conos de luz determina las propiedades causales del espacio-tiempo. No hace falta suponer que se emiten destellos de luz reales para analizar la causalidad: bastará un conjunto de conos de luz hipotéticos. La regla de que los objetos materiales normales no pueden superar la velocidad de la luz puede representarse ahora convenientemente exigiendo que la línea de universo del objeto permanezca siempre *dentro* del cono de luz que tienen su origen en ella. La figura 11.3 (a) muestra la línea de universo de una partícula que se mueve, y una serie de conos de luz que la envuelven. La línea de universo evita debidamente el

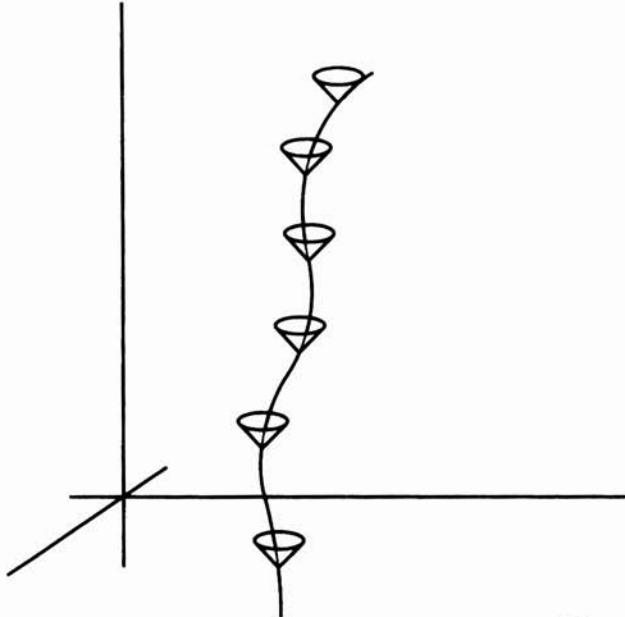


(a)

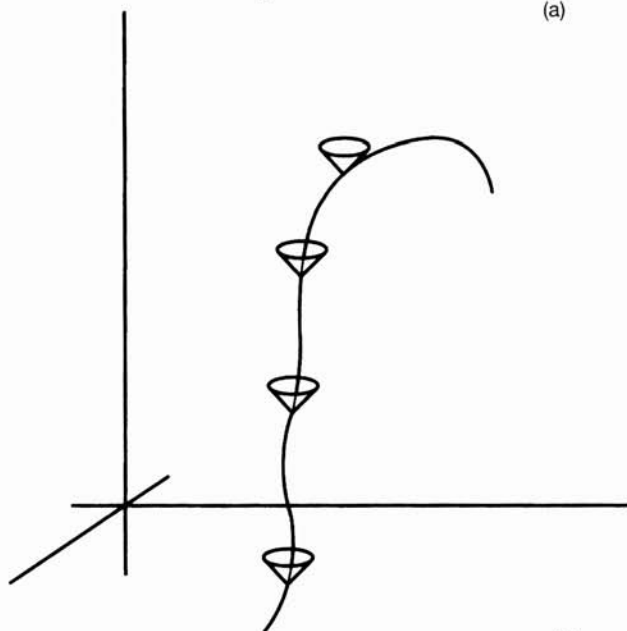


(b)

11.2. El cono de luz. En un instante e el cuerpo a emite un destello de luz. Los fotones se propagan en todas direcciones a una velocidad fija. En (a), donde sólo se ha dibujado una dimensión espacial, las líneas de universo de los fotones se reducen a dos líneas oblicuas, que representan fotones que se mueven hacia la izquierda y hacia la derecha respectivamente. En (b), se muestran dos dimensiones espaciales, y las líneas de universo de los fotones llenan la superficie de un cono invertido: el cono de luz.

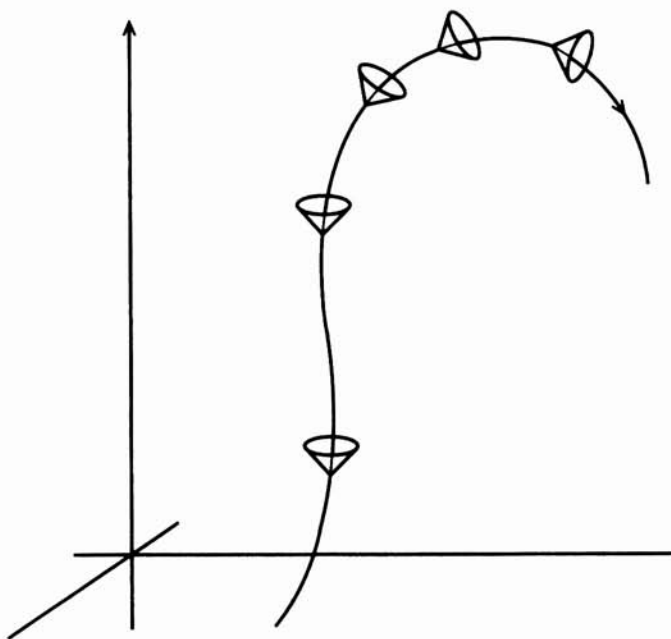


(a)



(b)

11.3. ¿Atravesando la barrera de la luz! (a) La línea de universo de la partícula permanece siempre dentro de sus conos de luz, de acuerdo con la teoría de la relatividad. (b) La línea de universo empieza con buen comportamiento, pero luego se dobla bruscamente, indicando una rápida aceleración hacia velocidades superlumínicas. Como resultado, la línea de universo traspasa un cono de luz y puede incluso volverse hacia el pasado. Según la teoría de la relatividad, semejante comportamiento es imposible.



11.4. Inclinandose al pasado. La gravedad afecta a la luz, y puede inclinar tanto los conos de luz que la línea de universo de una partícula «se curva hacia atrás», llevándola al pasado. Nótese que el tiempo indicado por la partícula también se inclina y «corre en la dirección equivocada» (flecha) con respecto a la coordenada temporal mostrada (que representa el sistema de referencia de un observador lejos del campo gravitatorio).

inclinarse demasiado para traspasar cualquiera de los conos. Por el contrario, la figura 11.3 (b) muestra el comportamiento ilegal de una partícula que se acelera atravesando la barrera de la luz, y cruza uno de sus conos de luz. Esto sucederá cuando la pendiente de la línea de universo de la partícula sea mayor de cuarenta y cinco grados, indicando que se está moviendo más rápida que la luz. De modo que hay una regla fundamental de la relatividad: no está permitido que las líneas de universo de objetos ordinarios traspasen cualquiera de sus conos de luz.

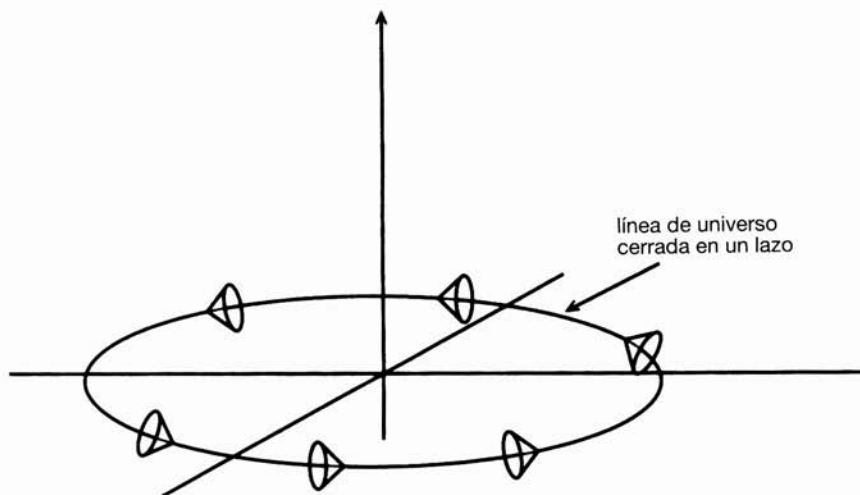
Estas imágenes dejan claro por qué el ir más rápido que la luz puede llevarle hacia atrás en el tiempo: si la línea de universo de una partícula se saliese del cono de luz y luego se curvase mucho hacia la derecha, podría volver atrás en el tiempo y conectarse con una región en su propio pasado. Puesto que estamos descartando esta posibilidad, pasemos al segundo y más plausible escenario. Me he esforzado en explicar en qué medida la gravitación es una distorsión de la geometría espacio-temporal. Si el espacio-tiempo está distorsionado, los conos de luz también lo estarán. Un campo gravitatorio puede entonces tener

el efecto de inclinar los conos hacia un lado (y quizá también estirarlos o comprimirlos, pero omitiré esto). Si los conos se inclinan, las líneas de universo de los objetos materiales deben inclinarse con ellos, puesto que no se les permite atravesar las conos de luz bajo ninguna circunstancia. Puede suceder que los conos se inclinen hacia sus lados: este es el caso en la superficie de un agujero negro, por ejemplo.

La figura 11.4 muestra una sucesión de conos de luz que se inclinan cada vez más, permitiendo que la línea de universo de una partícula dentro de ellos se curve también —tanto, de hecho, que se curva hacia abajo, en la dirección del pasado. Si el espacio-tiempo fuera realmente así, la línea de universo podría volverse y cortarse a sí misma, lo que equivale físicamente a que el objeto visite su pasado. La línea de universo podría incluso conectarse consigo misma para formar un lazo cerrado, en cuyo caso el objeto se convierte en parte de su propio pasado. Una situación análoga con conos de luz inclinados se muestra en la figura 11.5, donde una vez más una línea de universo forma un lazo cerrado en el plano horizontal.

El punto importante a notar sobre estas estructuras de conos de luz es que permiten que el viaje en el tiempo se logre sin que el cuerpo material interesado supere la velocidad de la luz en ningún lugar. Localmente, la línea de universo permanece siempre dentro de los conos de luz próximos y son válidas las reglas de la relatividad especial; globalmente, sin embargo, la estructura de conos de luz está tan distorsionada que permite que las líneas de universo se corten a sí mismas. En un escenario semejante, la ruta hacia el pasado consiste en seguir una especie de lazo espacio-temporal; no consiste en permanecer fijo e «ir marcha atrás» a través de sucesos previos, como H. G. Wells imaginó. Podemos imaginar a un hipotético viajero del tiempo que parte, como Betty, en un viaje de ida y vuelta en el espacio y que vuelve a la Tierra para encontrarla en una época anterior al momento de partida.

Por extravagante que pueda parecer la idea de líneas de universo que se cortan a sí mismas, una posibilidad tal está encerrada dentro de la teoría de la relatividad general de Einstein. El primer ejemplo explícito que contenía lazos temporales lo proporcionó el matemático austriaco Kurt Gödel, un lógico excéntrico y recluido que trabajaba junto a Einstein en el Instituto para Estudio Avanzado en Princeton. En 1949, Gödel publicó una nueva solución de las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein que describía una estructura de conos de luz muy similar a la de la figura 11.5. La solución de Gödel no es muy realista, porque supone que el universo entero está girando, algo que está completamente descartado por la observación. De todas formas, servía para demostrar que no hay nada intrínseco en la teoría de la relatividad que impida que una partícula de materia, o en principio un ser humano, llegue al pasado —y vuelva hacia el futuro. El propio Gödel escribió acerca de su solución: «Haciendo un viaje de recorrido suficientemente amplio en una nave espacial, es posible ... viajar a cualquier región del pasado, presente y futuro, y regresar de nuevo».²



11.5 La solución de Gödel. Kurt Gödel descubrió que, si el universo gira, los conos de luz pueden inclinarse hacia los lados de la forma mostrada, permitiendo que la línea de universo de una partícula forme un lazo cerrado.

Tras la publicación de la solución de Gödel, Einstein confesó que la perspectiva de una geometría espacio-temporal que permitiese lazos temporales le había molestado desde el primer momento, incluso durante su primera formulación de la teoría general.³ Él advirtió los problemas físicos y paradojas causales que surgían con esta posibilidad, pero dejó abierto si las soluciones como las de Gödel deberían siempre ser descartadas sobre bases físicas.

Máquinas del tiempo en los agujeros negros

En esta etapa de su carrera, Einstein había abandonado básicamente la física tradicional. Pasó los años de la guerra aislado y trabajando tranquilamente en sus propias teorías. Como judío extranjero, pacifista declarado e intelectual independiente que apoyaba una diversidad de causas políticas, fue considerado sospechoso por las fuerzas de seguridad. Ciertamente no era adecuado para trabajar en el proyecto de la bomba atómica. Al final de la guerra se retiró oficialmente, aunque mantenía un despacho en el Instituto de Princeton, y dividía su tiempo entre éste y su hogar. Aunque ocasionalmente asistía a seminarios, y seguía leyendo las revistas especializadas, contribuyó poco a los desarrollos excitantes en la física de partículas subnucleares y en la teoría cuántica de campos que estaban recorriendo la comunidad física en los años de posguerra. Mantuvo sólo uno o dos colaboradores y trabajó obsesivamente en la tentativa de

formular una teoría de campo unificado que uniría su grandiosa teoría de la relatividad con la física cuántica de un modo que no fuera filosóficamente objetable para él. Nunca tuvo éxito.

Puesto que Einstein murió antes del renacimiento completo de su teoría de la relatividad general, tuvo poco que decir sobre los desarrollos modernos que conducen a ideas extrañas como las de los agujeros negros y los viajes en el tiempo. A pesar de la potencia y belleza de su teoría general, ésta quedó relegada a las aguas estancadas de la física durante décadas, debido básicamente a que los efectos predichos eran normalmente pequeños y difíciles de verificar. La teoría de la gravitación era el coto reservado de unos pocos especialistas, principalmente aquellos con intereses astronómicos o cosmológicos. Pero los desarrollos de posguerra cambiaron todo esto. La radioastronomía abrió una ventana adicional al universo. La era de los satélites artificiales proporcionó una oportunidad para ver el universo a longitudes de onda inaccesibles desde la Tierra, mientras que las mejoras en los telescopios emplazados en el suelo y el uso creciente de los ordenadores electrónicos transformaron la capacidad de los astrónomos para hacer mapas detallados del universo.

Los avances observacionales estuvieron acompañados por un resurgimiento del interés en las cuestiones teóricas. La posibilidad de ondas gravitatorias empezó a ser tomada en serio. La necesidad de combinar la física gravitacional con la mecánica cuántica inspiró a Wheeler y sus colaboradores para inspeccionar los campos gravitatorios intensos, el colapso gravitatorio y la topología espacio-temporal. Se desarrollaron nuevas técnicas matemáticas, se escribieron libros de texto, y el tema de la relatividad general floreció finalmente para hacerse una disciplina completamente desarrollada aproximadamente una década después de la muerte de Einstein.

Fue un subproducto puramente accidental de estos desarrollos en la teoría de la gravitación el hecho de que se descubriera otra posibilidad para el viaje en el tiempo, por parte de un matemático neozelandés llamado Roy Kerr.⁴ Vino del estudio de los agujeros negros. La solución de Schwarzschild había servido durante muchas décadas, pero era claramente poco realista en un aspecto. Una estrella real estaría girando indudablemente cuando se colapsa, y nadie conocía la solución a las ecuaciones de Einstein correspondientes a un agujero negro en rotación, hasta que Kerr la encontró.

Fuera del horizonte de sucesos, las propiedades de la solución del agujero negro de Kerr son básicamente similares a las del caso de Schwarzschild, pero el interior está estructurado de una forma completamente diferente. Mientras que una partícula (no un taquión) que cae en un agujero de Schwarzschild necesariamente llega a la singularidad central al cabo de un corto tiempo, una partícula que cae en un agujero de Kerr evita la singularidad por completo. ¿Dónde va? Nadie lo sabe realmente, pero la solución de Kerr da una posible respuesta. De la misma forma que la solución de Schwarzschild puede extenderse a un antimundo —otro universo, donde el tiempo corre marcha atrás— tam-

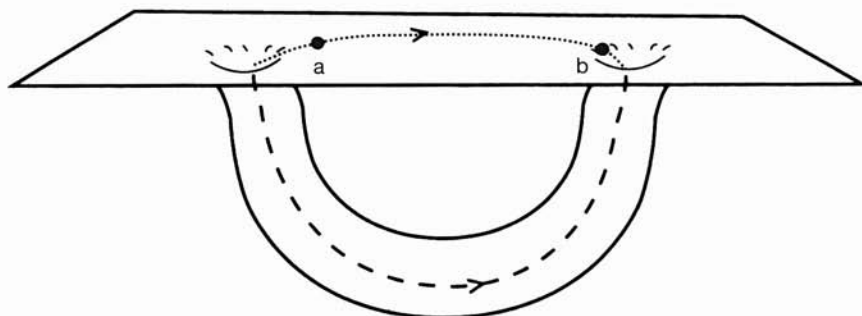
bién la solución de Kerr se extiende a una infinidad de otros universos, ¡tanto mundos como antimundos! Además, existe una extraña región *dentro* del agujero negro donde los conos de luz se curvan, al modo de Gödel, y permiten que las líneas de universo formen lazos cerrados.

Por desgracia para los aspirantes a temponautas, la mayoría de los expertos creen que la solución de Kerr no sería válida en el interior de un agujero negro real. Aparte de su forma matemática idealizada, que puede parecerse o no a un agujero negro giratorio real, la puerta de entrada a los otros universos y la región de viaje en el tiempo descrita por esta solución resultan ser intrínsecamente inestables. Además, la singularidad dentro del agujero de Kerr está «desnuda». Esto significa que puede ser vista por un observador en la región interior. Por el contrario, la singularidad dentro del agujero de Schwarzschild está en el futuro de todos los observadores: éstos no saben que está ahí hasta que llegan a ella. Una singularidad desnuda es mucho más temible. Recordemos que las singularidades son límites o fronteras donde el espacio y el tiempo dejan de existir. Puesto que las leyes de la física se vienen abajo allí, es imposible saber lo que podría resultar de una singularidad. Mientras la singularidad permanece oculta no tenemos que preocuparnos demasiado por ella, pero una singularidad desnuda podría influir en los sucesos de una forma desconocida, haciendo azarosos los intentos de extraer cualquier conclusión física. (Para una discusión en profundidad de las implicaciones de las singularidades desnudas, véase mi libro *La frontera del infinito*.)

En 1974, el físico Frank Tipler descubrió aún otra solución de viaje en el tiempo para las ecuaciones de Einstein que incluyen rotación, esta vez de un cilindro de materia.⁵ La región de viaje en el tiempo está próxima a la superficie del cilindro. Puesto que no hay singularidades en el modelo de Tipler, éste parece ligeramente más físico que el ejemplo de Kerr. Sin embargo, no está libre de problemas. Lo más notable es que la solución describe un cilindro infinitamente largo —una ficción obvia. Además, para que se den lazos temporales el cilindro tiene que girar sobre su eje a una velocidad fantástica, y corre el riesgo de ser despedazado por las fuerzas centrífugas a menos que esté compuesto de un material muchísimo más denso que la materia nuclear. En general, no está nada claro que los lazos temporales ocurriesen en el caso de un objeto giratorio más realista.

Agujeros de gusano y cuerdas

Ninguno de los obstáculos mencionados ha impedido que los escritores de ciencia ficción abracen entusiásticamente la causa del viaje en el tiempo. Siguiendo la novela pionera de Wells, muchos escritores han especulado sobre la posibilidad de crear máquinas del tiempo utilizando estados inusuales de materia o campos gravitatorios. Fue de hecho una obra de ficción la que desencadenó la úni-

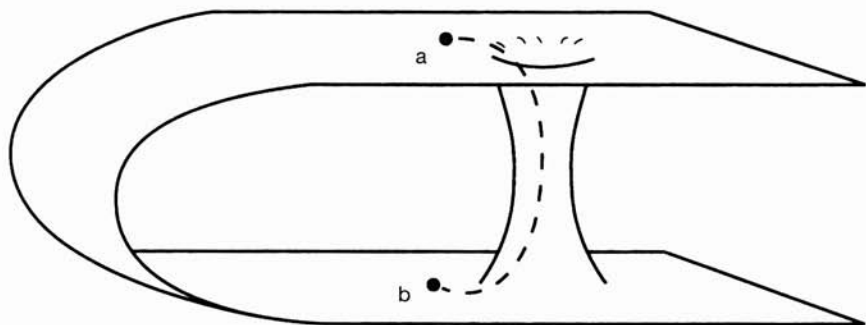


11.6. Agujero de gusano en el espacio. Dos puntos, *a* y *b*, pueden estar conectados por un camino a través del espacio «normal» (línea de puntos) o uno que atraviesa el agujero de gusano (línea de trazos). La longitud de estos dos caminos puede ser muy diferente. Como está dibujado, el camino del agujero de gusano parece mayor, pero bajo ciertas circunstancias puede ser mucho más corto.

ca investigación sistemática sobre el viaje en el tiempo en la historia de la ciencia. En una historia vertiginosa titulada *Contacto*, Carl Sagan relata una saga de seres alienígenas que envían un mensaje de radio a la Tierra que contiene detalles para la construcción de una máquina maravillosa.⁶ Los científicos que construyan la máquina serán capaces de viajar al centro de la galaxia muy rápidamente. No consiguen esto yendo a mayor velocidad que la luz sino viajando a través de un denominado agujero de gusano en el espacio.

El término «agujero de gusano» fue también acuñado por John Wheeler, el mismo que acuñó el de agujeros negros. En los años cincuenta, Wheeler imaginó la posibilidad de que dos puntos del espacio pudieran estar conectados por más de una ruta. La idea original se muestra en la figura 11.6, que representa el espacio en términos de una hoja bidimensional: *a* y *b* son dos puntos en el espacio. Para ir de *a* a *b* por medios normales, usted tendría que seguir la línea de puntos. Pero podría existir un túnel o tubo (el agujero de gusano) que proporciona una ruta alternativa (la línea de trazos). La posibilidad de *dos* rutas que conectan los mismos puntos del espacio es otro ejemplo de la forma en que, en la relatividad general, el espacio-tiempo puede curvarse lo suficiente para volver a conectarse consigo mismo, proporcionando así la posibilidad de lazos tanto en el espacio como en el tiempo.

Tal como se muestra, parece que la ruta del agujero de gusano es más larga, pero esto se debe a que mi dibujo es fundamentalmente simbólico. (Recuérdese que los diagramas espacio-temporales pueden distorsionar mucho las distancias.) Un estudio matemático cuidadoso muestra que los agujeros de gusano pueden realmente *acortar* la distancia entre *a* y *b*. Esto se hace más plausible si se dobla el diagrama, como se muestra en la figura 11.7, en la que el agujero de gusano aparece ahora como un corto tubo. Resulta notable que Einstein an-



11.7. Atajo a través del espacio. Si se pliega el espacio en la figura 11.6, el agujero de gusano se endereza y sugiere una ruta más corta entre *a* y *b*.

tipicó este tipo de geometría en un trabajo desarrollado con Nathan Rosen a mitad de los años treinta. Por esta razón, un agujero de gusano se conoce a veces como un «puente de Einstein-Rosen». Puede suceder que un astronauta pueda ir de *a* a *b* a través del agujero de gusano *más rápidamente* de lo que la luz puede llegar allí por la ruta «normal». Al adelantarse a la luz de esta forma, el astronauta también puede viajar hacia atrás en el tiempo.

Si queremos convertir el agujero de gusano en una máquina del tiempo, las bocas del agujero de gusano tienen que ser consideradas algo parecido a nuestras gemelas Ann y Betty. Un extremo (Betty) necesita ser acelerado (de algún modo) a velocidad próxima a la de la luz con respecto al otro extremo (Ann), luego detenido y acelerado hacia atrás de nuevo. La boca itinerante volvería entonces a cierto instante en el futuro de la boca estática, y una diferencia de tiempo permanente se establecería entre los dos extremos del agujero de gusano. Para viajar al pasado, un astronauta tiene que atravesar el agujero de gusano en la dirección correcta, y luego volver rápidamente a su punto de partida a través del espacio «ordinario» a alta velocidad, formando un lazo cerrado en el espacio. Si las circunstancias son las correctas, su línea de universo también formará un lazo cerrado en el tiempo.

Para saber si este fantástico estado de cosas es físicamente posible, o sólo una especulación alocada, Kip Thorne y sus colaboradores en el Caltech se embarcaron en un extenso programa de investigación.⁷ Fueron guiados en su tarea por el hecho de que ya se conocía una forma de agujero de gusano en relación con los agujeros negros. Como mencioné en el capítulo 10, una extensión idealizada del agujero negro de Schwarzschild conecta nuestro universo con otro universo en el que el tiempo corre hacia atrás. Espacialmente, el puente que une los dos universos tiene la forma de un túnel o agujero de gusano como el mostrado en la figura 11.7. Sin embargo, hay que recordar que no es posible que una partícula de materia ordinaria atravesase el agujero de gusano de Schwarz-

schild y emerja en el otro universo. Para hacerlo, tendría que viajar más rápido que la luz.

La razón para la restricción acerca de atravesar el agujero de gusano de Schwarzschild es que en este modelo el agujero de gusano no es estático, como en el dibujo, sino que de hecho se abre fugazmente sólo un instante y luego se cierra de nuevo. Hace esto tan rápidamente que simplemente no hay tiempo suficiente para que una partícula (o un astronauta) lo atravesase antes de que se estrangule y aplaste todo lo que hay en su interior. El equipo de Thorne imaginó astutamente una forma de mantener abierta la garganta el tiempo suficiente para que algo la atravesase. En su caso, sin embargo, ellos tenían en mente un agujero de gusano que conecta una región del espacio, no con otro universo, sino (siguiendo a Sagan) con una parte diferente de nuestro propio universo, como se muestra en la figura 11.7.

Para mantener al agujero de gusano contra su tendencia natural a colapsar, Thorne invocó otro de los trucos favoritos de H. G. Wells: la antigraavedad. En física, por antigraavedad se entiende algún tipo de sustancia o campo que repele gravitatoriamente en lugar de atraer. Todos los estados ordinarios de materia son atractivos, de modo que los investigadores tuvieron que apelar a algún tipo de estado exótico (uno podría estar tentado de decir «quijotesco»).* Se vieron llevados de forma natural a la física cuántica, ese aderezo de cosas exóticas. Enterrados oscuramente en la literatura física yacían varios estudios matemáticos que indicaban cómo ciertos estados cuánticos peculiares pueden producir antigraavedad de una forma muy limitada. A veces esto ocurre porque la energía del campo cuántico puede hacerse negativa en un lugar u otro. Energía implica masa, de modo que energía negativa quiere decir masa negativa, y antigraavedad —en teoría.

También se presenta otra posibilidad para la antigraavedad cuántica. En relatividad general, la *presión*, tanto como la masa, es una fuente de gravitación. La mayoría de las personas no son conscientes de que la presión crea gravedad, por la sencilla razón de que su efecto es normalmente despreciable. Para un cuerpo ordinario como la Tierra, su presión interna no contribuye más que en una milmillonésima de su gravedad de superficie (añadiendo menos de un miligramo a su peso). Pero los estados cuánticos exóticos pueden tener una presión tan grande que la atracción gravitatoria rivaliza con la de la masa. Bajo ciertas circunstancias esta presión no sólo puede ser extraordinariamente grande, sino también negativa —implicando antigraavedad. Consciente de estas posibilidades, Thorne y sus colaboradores analizaron algunas soluciones de agujero de gusano altamente idealizadas en las que el túnel se mantiene abierto mediante antigraavedad cuántica, y encontraron que eran consistentes con la física conocida. Su investigación inicial ha llevado a un aluvión de artículos sobre el tema, y sus ramificaciones continúan siendo exploradas.

* En el inglés original «quixotic» (por «exotic»). (N. del t.)

Mientras, un tipo de máquina del tiempo completamente diferente ha sido propuesto por Richard Gott de la Universidad de Princeton, haciendo uso de objetos conocidos como «cuerdas cósmicas».⁸ Los cosmólogos han jugado con la idea de que inmediatamente después del big bang, cuando el universo era extraordinariamente caliente y denso, los diversos campos cuánticos se presentaban atados en nudos y vueltas y de tal forma que producían tubos parecidos a hilos extraordinariamente estrechos de energía de campo concentrada. Estos tubos, o cuerdas cósmicas, no pueden «desenrollarse» fácilmente, y estarían congelados como reliquias, hasta el día de hoy. Las búsquedas astronómicas de cuerdas cósmicas se han mostrado hasta el momento poco concluyentes.

Las propiedades gravitatorias de las cuerdas cósmicas son muy singulares. Un lazo de cuerda gravita de forma similar a cualquier otro objeto, pero un segmento recto no ejerce fuerza gravitatoria directa, incluso si cada kilómetro puede contener una masa tan grande como la de la Tierra. Sin embargo, las cuerdas rectas afectan a la luz, de modo que tienen consecuencias para la estructura causal del espacio-tiempo. Gott encontró que si dos cuerdas cósmicas paralelas infinitamente largas se apartan a gran velocidad, los conos de luz se inclinarán lo suficiente para permitir que las líneas de universo se curven en lazos hacia el pasado. Por supuesto, el escenario de Gott es pura imaginación. Adolece del problema de que las cuerdas tienen que formarse obligatoriamente con la configuración y movimientos requeridos, así como de otras dificultades físicas asociadas con su extensión infinita.

El resultado de este reciente diluvio de trabajos sobre el viaje en el tiempo es que no hay nada muy obvio en las leyes de la física que lo impida *en principio*, aunque en todos los ejemplos estudiados los lazos temporales pueden conseguirse sólo manipulando materia y energía de la forma más extrema y fantástica. De todas formas, aceptemos por el momento que podría, «en principio», construirse una máquina del tiempo (o descubrirse en la naturaleza). ¿Cuáles serían las consecuencias?

Paradojas

El tiempo se viste con un modelo diferente para cada papel que juega en nuestro pensamiento.

JOHN WHEELER

Cualquiera que haya leído críticamente *La máquina del tiempo* o haya visto la película *Regreso al futuro* habrá detectado que el viaje al pasado, o incluso la posibilidad de enviar señales al pasado, abre una caja de Pandora de enigmas y paradojas. La más famosa de éstas se denomina la paradoja de la abuela (o el abuelo). Supongamos que un viajero del tiempo fuera a su pasado y matara a su abuela. Como resultado, el mencionado viajero nunca habría nacido. Pero

entonces no podría haber llevado a cabo el asesinato después de todo, en cuyo caso *habría* nacido.... Se mire como se mire, existe una contradicción desconcertante.

La paradoja surge porque el estado actual del mundo está *determinado* por el pasado. Por consiguiente, alterar el pasado conduce probablemente a dificultades, puesto que puede haber efectos crecientes que incontrolable e inextricablemente se entremezclan en el tejido del presente. Incluso una simple partícula subatómica enviada hacia atrás en el tiempo podría cambiar espectacularmente el estado actual del mundo. La partícula podría formar parte de una señal codificada, por ejemplo, que desencadenaría una respuesta importante en el receptor. O podría alterar el curso de la evolución. (Un simple encuentro entre una partícula de rayos cósmicos y una molécula de ADN puede causar una mutación crucial.) Pero ¿qué sentido puede atribuirse a un pasado *cambiado*, y aún menos a un presente cambiado? El estado actual del mundo es el que es; no puede transformarse en alguna otra cosa. Las cuestiones involucradas en estas elucubraciones van más allá de la mera ciencia ficción. Por definición, las leyes del universo deben describir una realidad consistente. Si el viaje en el tiempo conduce inevitablemente a paradojas irresolubles, entonces no puede admitirse dentro del marco de la ley física. En este caso, si descubriéramos que nuestras mejores teorías actuales permiten viajar al pasado, aunque sea en circunstancias extraordinariamente limitadas e irreales, entonces dichas teorías deben quedar bajo sospecha.

Las paradojas se evitan si los lazos causales son autoconsistentes. Entonces se daría el caso de que las acciones del viajero del tiempo están ya incorporadas en la madeja determinista que une pasado y presente. El viajero que aplasta un escarabajo y cambia la evolución lo hará de una forma que da lugar precisamente a las circunstancias biológicas del mundo del que ha venido. Pero matar a las abuelas es otra cosa. Esto parecería poner fuertes restricciones al libre albedrío, pero no parece haber nada lógicamente objetable para la perspectiva de lazos causales que unen pasado y futuro consistentemente.

La paradoja de la abuela es en realidad sólo una de un conjunto de problemas que se derivan de la posibilidad de viajar al pasado. Por ejemplo, el viajero del tiempo podría encontrar una copia anterior de sí mismo, ¡en cuyo caso habría dos de él! Este confuso estado de duplicación podría conseguirse meramente como resultado de volver atrás en el tiempo por un segundo. Por repetición, podría crearse un número ilimitado de copias del viajero en el tiempo en cualquier instante (recordemos el electrón zigzagueante de Feynman que se duplica a sí mismo por todo el universo). Aunque no hay aquí implicada una paradoja lógica, la perspectiva de la duplicación sin restricciones de objetos hace que nuestras mentes se tambaleen, y echa por tierra algunas apreciadas leyes de la física (como la ley de la conservación de la energía).

David Deutsch, el experto en la teoría de los muchos universos que mencioné en el capítulo anterior, ha hecho un cuidadoso estudio de los enigmas del

viaje en el tiempo y sus posibles soluciones.⁹ Ha señalado un dilema aún peor que la paradoja de la abuela, uno que golpea en el mismo corazón de la racionalidad científica. Consideremos el ejemplo de un viajero del tiempo de 1995 que visita el año 2000 y aprende una nueva solución maravillosa de las ecuaciones de Einstein, publicada en un número de la revista *Physical Review* de dicho año por una científica desconocida llamada Amanda Brainy. El viajero regresa a su propio año, provisto de una copia de la solución y busca a la joven Amanda, encontrando que ella es una estudiante de física de primer año en su universidad local. Entonces se propone enseñarle relatividad, y con el tiempo le muestra la nueva solución, que ella publica bajo su propio nombre en *Physical Review* en el año 2000. El problema sobre esta pequeña historia es: ¿De dónde procede el conocimiento de la nueva solución?, ¿quién hizo el descubrimiento? Amanda no lo hizo: a ella le contó la solución el viajero del tiempo. Pero él tampoco lo hizo; él la copió del artículo que ella publicó en la revista. Aunque la historia es completamente coherente, aún nos deja confusos e insatisfechos. La nueva información importante sobre el mundo no puede simplemente *crearse a sí misma* de esa manera, ¿o puede hacerlo?

Tan horribles son los problemas físicos y filosóficos del viaje en el tiempo que Stephen Hawking ha propuesto una «hipótesis de protección cronológica», según la cual la naturaleza encontrará siempre un modo de impedir que los agujeros de gusano y otras construcciones imaginarias permitan el viaje al pasado.¹⁰ De este modo, señala Hawking, el universo podría quedar a salvo de los historiadores. No hay acuerdo general sobre si la protección cronológica es válida, y si lo es, si está contenida en la física existente o requiere algo nuevo. Todos los ejemplos conocidos del viaje en el tiempo tienen características patológicas que los harían no físicos o inestables en la práctica. Pero sin un teorema general para descartar *todos* los espacio-tiempos con lazos, existe siempre una probabilidad de que algún investigador inteligente obtenga un ejemplo físico realista de cómo ganar al reloj —y sobrevivir.

Un argumento dudoso que se utiliza a menudo contra el viaje en el tiempo es que, si nuestros descendientes descubren alguna vez cómo hacerlo, ellos volverán y nos visitarán. Puesto que nosotros no vemos a estos temponautas, podemos concluir que nunca llegarán a existir. Stephen Hawking utilizaba este razonamiento para apoyar su hipótesis de protección cronológica, comentando que «no hemos sido invadidos por hordas de turistas procedentes del futuro». Sin embargo, la mayoría de las máquinas del tiempo que han sido imaginadas hasta ahora no permiten viajar a un tiempo anterior al de la construcción de la máquina, de modo que, si fuéramos a construir hoy una máquina, no podríamos volver y ser testigos de la batalla de Hastings, por ejemplo. Ni nuestros descendientes podrían utilizar una máquina semejante para visitarnos. Sólo si una antigua civilización alienígena nos hiciera el regalo de una vieja máquina del tiempo, o si la naturaleza hubiera creado espontáneamente el agujero de gusano necesario en el pasado remoto, podríamos visitar épocas anteriores

a la nuestra. La ausencia de viajeros procedentes del futuro no puede, por lo tanto, ser utilizada para descartar completamente el viaje en el tiempo.

El argumento más fuerte contra la visita al pasado es indudablemente la paradoja de la abuela, que se ha estudiado atentamente para encontrar la forma de evitarla. Una salida consiste en invocar la idea de los muchos universos que comenté en el capítulo 10. Si existen muchos mundos paralelos semejantes, puede ser que una visita al pasado le lleve a usted a una época anterior, no de su propio mundo, sino de una versión cuántica muy similar. El temponauta asesino encuentra entonces que ha matado a una copia al carbón de la abuela de uno de sus yos paralelos, dejando su propio mundo futuro inalterado. Esta hábil solución supone que podemos mezclar y enlazar mundos cuánticos en una escala macroscópica, permitiendo que el temponauta pase a una realidad paralela, y regrese de nuevo, habiéndola alterado de forma significativa. Me parece una extrapolación muy fantástica de la teoría de los muchos universos. En cualquier caso, la cuestión general del comportamiento de partículas cuánticas en un mundo donde son posibles los lazos de tiempo está siendo todavía activamente investigada.

El impacto de las paradojas del viaje en el tiempo deriva más de sus extraños efectos psicológicos que de cualquier extravagancia lógica. Los seres humanos están acostumbrados a considerar el tiempo como algo que fluye como un río. Entonces parece enigmático el que un viajero en el tiempo pueda partir hacia el pasado. ¿Cómo puede deslizarse siempre aguas abajo, sólo para encontrarse a sí mismo de nuevo aguas arriba, sin salir de la corriente y volver atrás por la orilla? La perspectiva de remontar la corriente del tiempo en un lazo cerrado produce la misma conmoción desorientadora que un grabado de Escher. Al final de la novela de Wells, el narrador especula sobre el destino del viajero del tiempo, que ominosamente no pudo regresar de su último viaje: «Quizá ahora —si podemos utilizar la frase— él está vagando por algún arrecife coralino del Oolítico lleno de plesiosaurios, o quizá por los solitarios mares salinos de la Era Triásica».¹¹ El «ahora» aquí revela el doble pensar esencial sobre el tiempo; es como si nuestro tiempo va de alguna forma con el viajero en la máquina, una especie de afluente del río del tiempo del siglo xx, regresando por los eones y mezclándose con el río del tiempo triásico. Pero esto es absurdo. La Era Triásica no es *ahora*, es *entonces*. ¿O sí lo es?

Pero ¿qué hora es «ahora»?

El tiempo, como una corriente que nunca se detiene, arrastra a todos sus hijos.

ISAAC WATTS

De hecho, el tiempo, la corriente que nunca se detiene, no tiene más que ver con la existencia de los relojes que con la de las salchichas.

HERBERT DINGLE

¿Puede fluir realmente el tiempo?

Ninguna posición es tan absurda que no pueda encontrarse un filósofo que la defienda.

MICHAEL LOCKWOOD

Hay un famoso sketch en la serie de la televisión inglesa *El circo ambulante de Monty Python* que se burla de los filósofos australianos. En general, los filósofos son un blanco fácil para los humoristas, quizá porque a menudo parecen estar defendiendo proposiciones que a la mayoría de la gente les suenan manifiestamente ridículas. Desde Platón en adelante ha habido probablemente más absurdos escritos por filósofos sobre el tema del tiempo que sobre cualquier otro tema. Sin embargo, por amplio consenso, uno de los pocos filósofos que ha llevado alguna sensatez a las especulaciones sobre la naturaleza del tiempo es Jack Smart,* que hace honor a su nombre y al mismo tiempo es un filósofo tan australiano como se pueda ser. Puesto que pasa gran parte de su vida activa en la Universidad de Adelaida, yo siento una acierta afinidad con él.

* «Smart» = inteligente. (N. del t.)

Conocí a Jack Smart cuando visitó Gran Bretaña a comienzos de los años ochenta y pronunció una provocativa conferencia sobre la física cuántica y el tiempo en la Universidad de Newcastle. Su conferencia estuvo continuamente interrumpida por un científico quisquilloso que tenía una fijación sobre la afirmación (basada en la mecánica cuántica) de que los objetos materiales no están «realmente ahí». Jack es un espíritu cortés y caballeroso, pero finalmente perdió la calma: «¿Desearía que *usted* no estuviese ahí!», amonestó, y las interrupciones cesaron.

Smart escribió una vez: «Hablar del flujo del tiempo o del progreso de la consciencia es una metáfora peligrosa que no debe tomarse literalmente». ¹ En otras palabras, el «río» del tiempo no está realmente ahí. Eso puede parecer tan absurdo como afirmar que los objetos materiales no están realmente ahí, pero Smart tiene una base más firme para ello. He explicado ya cómo la teoría de la relatividad conduce a la noción de tiempo en bloque y a la imagen del tiempo como la cuarta dimensión simplemente «extendida toda de vez». Desde Einstein, los físicos han rechazado generalmente la idea de que los sucesos «suceden», en contraposición a que simplemente *existen* en el continuo espacio-temporal tetradimensional.

No son sólo los físicos los que tienen problemas con el paso del tiempo. Durante décadas, los filósofos han tratado de sujetar este flujo evasivo, sólo para encontrar que se desliza de sus manos en una confusión lingüística. Se han derramado océanos (¿ríos?) de tinta sobre el tema, pero el flujo del tiempo sigue siendo tan misterioso como siempre. Tan misterioso, de hecho, que filósofos como Smart se han visto obligados a concluir que no hay río del tiempo. Está, por así decir, todo en la mente. «Ciertamente *sentimos* que el tiempo fluye —admite Smart, pero en su opinión—, este sentimiento surge de una confusión metafísica.» De hecho, él cree que es meramente «una ilusión».

¿Qué tipo de ilusión podría ser? Hay una analogía vulgar que resulta útil. Si usted da vueltas rápidamente y entonces se detiene, el mundo «sigue moviéndose». La sensación de vértigo crea la impresión de que el universo está en movimiento —en un estado de rotación, de hecho. Por supuesto, usted sabe que no lo está. Sólo tiene que fijar su mirada intensamente en la pared de la habitación para *ver* que no lo está. Intelectualmente, usted puede descartar el movimiento. Pero aún *siente* como si el mundo se estuviera moviendo. Quizá el flujo del tiempo es simplemente también un sentimiento que se desvanece simplemente cuando fijamos la férrea mirada de la racionalidad en los sucesos del mundo.

La irrealidad del paso del tiempo ha estado siempre en los primeros lugares de la agenda filosófica. Parménides pensaba que él había acabado con el concepto de flujo del tiempo hace más de dos milenios, cuando razonó que cualquier cambio era imposible. Su argumento era simplemente que, puesto que todo es lo que es, y no puede ser lo que no es, entonces nada puede cambiar de lo que es a lo que no es. Nada puede salir de la nada, y el «ser» es completo

en sí mismo. No hay medias tintas, decía Parménides, no hay un estado de parte-ser, parte-no-ser a través del que una entidad pueda deslizarse en el camino del *devenir*. Un razonamiento extravagante similar fue utilizado por Zenón de Elea, quien argumentó que todo *movimiento* era imposible, puesto que en cualquier instante dado de tiempo un objeto que aparentemente se mueve está de hecho estático. Zenón consideró el vuelo de una flecha y señaló que en cada momento de su trayectoria ocupa uno y sólo un «bloque» de espacio. Puesto que no podía ocupar más de un espacio en cada momento concreto, debía estar estacionario en dicho momento. Y puesto que este estado de cosas es verdadero en todos y cada uno de los momentos, no puede haber movimiento de ningún tipo. ¡El mundo está congelado!

Esta honorable tradición de reducir el tiempo o el cambio a la no existencia sobre bases filosóficas ha continuado en la era moderna. Aproximadamente a principios de siglo, John McTaggart, el metafísico de Cambridge famoso por sus gafas y por asistir asiduamente a la iglesia siendo ateo, argumentó que el concepto de tiempo está tan envuelto en contradicción que tiene más sentido suponer que el tiempo no existe en absoluto.² Las impresiones de temporalidad, argumentaba McTaggart, son simples invenciones humanas. Llegó a la impresionante conclusión de que el tiempo es irreal al considerar cómo la división *móvil* del tiempo en pasado, presente y futuro es totalmente incompatible con las fechas *fijas* con que pueden datarse los sucesos. La incompatibilidad entre un ahora *móvil* y una coordenada temporal estática quedó brillantemente resumida en la decisiva pregunta de Smart: «¿A qué velocidad fluye el tiempo?». Todos sabemos la respuesta: a un segundo por segundo. La confusión en la metáfora se manifiesta inmediatamente. La velocidad se define como la distancia recorrida por unidad de tiempo. ¿Cómo puede moverse el tiempo «en el tiempo»?

Un escritor de entretenimiento llamado J. W. Dunne publicó en 1927 un libro popular titulado *An Experiment with Time* en el que afirmaba haber resuelto el problema de hacer que el tiempo fluya.³ Él invocó astutamente una segunda dimensión temporal que actuaría como una vara de medir frente a la que calibrar la velocidad de la primera. Por desgracia, no hay evidencia científica de más de un tiempo, y el argumento de Dunne parece decididamente *ad hoc*. También se plantea el problema de cómo cronometrar la segunda dimensión, para lo que Dunne estaba rápidamente dispuesto a introducir una tercera, y luego una cuarta, y así sucesivamente, en las fauces abiertas de una regresión infinita.

Pero sin un tiempo para cronometrar el tiempo, ¿cómo se puede mover el tiempo? Smart nos recuerda la metáfora del río, «arrastrándonos inexorablemente al futuro hacia la gran catarata que es nuestra muerte». Alternativamente, en lugar de vernos llevados irremediabilmente en esta corriente temporal, nos vemos como espectadores sentados en la orilla del río y presenciando cómo los sucesos del futuro vienen hacia nosotros y los del presente retroceden hacia el pasado. Pero Smart desecha esta cháchara como ininteligible. «¿Qué es “no-

sotros” o “yo”? No es la persona entera desde el nacimiento a la muerte, la entidad total espacio-tiempo. Ni es ninguna etapa temporal concreta de la persona», porque en cada etapa temporal tenemos esta misma sensación, incluso si sucesos considerados «en el futuro» en una etapa temporal de nuestras vidas son considerados «en el pasado» en una etapa posterior. Puesto que un suceso simplemente es lo que es, no puede estar *tanto* «en» el pasado *como* «en» el futuro. De modo que estas categorías temporales parecen carecer de significado.

Habiendo argumentado que el flujo del tiempo es una ilusión, Smart admite que es «una ilusión extraña e intelectualmente preocupante». ¿Qué la provoca? ¿Es una forma de vértigo temporal relacionado con la memoria o con el flujo de información en el cerebro? El problema al explicar esta ilusión particular es que parece ser la ilusión de un absurdo. No se trata simplemente de que nuestros sentidos nos confundan, como en el caso de una barra que parece doblarse en el agua. Parece que tenemos una poderosa impresión de algo, ¡pero un algo que no tiene ningún sentido cuando se le examina!

El mito del paso del tiempo

Se dice que hay más personas derrumbadas por la *ansiedad del tiempo* que por el tiempo mismo. Pero sólo el *tiempo* es fatal.

MARTIN AMIS

David Park es un físico y filósofo en el Williams College en Massachusetts con un viejo interés por un tiempo que él también cree que no pasa. Para Park, el paso del tiempo no es tanto una ilusión como un mito, «porque no implica un engaño de los sentidos ... Uno no puede realizar ningún experimento para decir sin ambigüedad si el tiempo pasa o no».⁴ Este es ciertamente un argumento revelador. Después de todo, ¿qué realidad puede atribuirse a un fenómeno que nunca puede demostrarse experimentalmente? De hecho, no está siquiera claro cómo se puede *pensar en* demostrar experimentalmente el flujo del tiempo. Puesto que el aparato, el laboratorio, el experimentador, los técnicos, la humanidad en general y el universo como un todo están aparentemente atrapados en el mismo flujo inevitable, ¿cómo puede estar «detenido en el tiempo» cualquier fragmento del universo para registrar el flujo que pasa en el resto del mismo? Esto es análogo a afirmar que el universo entero se está moviendo en el espacio a la misma velocidad —o, para hacer la analogía más apropiada, que el *espacio* se está moviendo a través del espacio. ¿Cómo podrá verificarse alguna vez una afirmación semejante?

Suponga que usted encuentra a un alienígena que afirmara que no tenía idea de lo que usted entiende por el flujo del tiempo. ¿Cómo lo describiría usted? ¿Qué podría decir para convencerle de su realidad? ¡Ah!, puede usted contraatacar, ¡una experiencia del paso del tiempo es una componente esencial de la

sensibilidad! Un ser que no tuviera ninguna noción del paso del tiempo no sería un ser verdadero y consciente como nosotros en absoluto. El/ella/ello no podría siquiera conversar de forma razonable con nosotros.

Es cierto que gran parte del interés humano se centra en el paso del tiempo: nuestras esperanzas y temores, nuestra nostalgia, nuestra idea del destino. Desde las grandes obras de la religión y la literatura hasta la organización cotidiana de nuestras vidas, todo objetivo humano es una lucha en el río del tiempo. Pese a todo, estos son aspectos subjetivos y emocionales de la vida. Cuando se trata de las propiedades verdaderamente objetivas del mundo, la referencia al flujo del tiempo parece superflua. De hecho, *podemos* razonar con el alienígena. Ciertamente, encontramos *conveniente* utilizar el lenguaje del flujo del tiempo al discutir sucesos en el mundo objetivo, pero no tenemos necesidad de hacerlo.

Permítame exponer un ejemplo de cómo podemos depurar nuestro lenguaje para no tener necesidad de hablar del flujo. Los meteorólogos figuran entre los usuarios más habituales de la terminología de un tiempo fluyente. Ejemplos típicos son: «El verano traerá un clima más caliente», o «La lluvia habrá cesado cuando llegue el jueves». Quizá esta práctica deriva del hecho de que las estructuras climáticas fluyen a través del globo y también pueden desarrollarse en el tiempo en posiciones fijas, de modo que hay una tendencia a deslizarse inconscientemente entre referencias al movimiento en el espacio y al movimiento en el tiempo, o incluso a dejar las cosas deliberadamente ambiguas. «Hay cierto clima de tormenta que se acerca» puede significar algo como «El clima de tormenta está avanzando desde el sur» o «Es probable que un clima de tormenta se desarrolle mañana sobre la ciudad».

Consideremos un enunciado contaminado de flujo como: «Sólo el pasado jueves la oficina meteorológica predijo que el sábado haría buen tiempo, pero cuando llegó ese día, la lluvia se intensificó, y hasta el domingo por la mañana que fue un día soleado y brillante no supe que lo peor había pasado». Aunque esta descripción informal de una secuencia de sucesos lleva la información necesaria, exactamente el mismo contenido esencial se muestra, aunque de forma más concisa, en el siguiente elenco de sucesos: Jueves: la oficina meteorológica hace una predicción de buen tiempo para el sábado. Viernes: llueve. Sábado: la lluvia es más intensa. Domingo: hace sol. Nótese que he utilizado el presente en todo momento como una forma conveniente de correlacionar fechas con estados del clima. De hecho, ningún verbo se usa estrictamente para establecer esta correlación; podemos imaginar simplemente que examinamos las entradas en un diario. La esencia del mensaje que obtenemos de este informe conciso es la misma que en la versión original, pero en este caso nada «sucede» o cambia, ningún día «se acerca» o «trae» buen tiempo.

¿Vuela la flecha del tiempo?

Recoge los capullos mientras puedas
el Viejo Tiempo aún vuela

ROBERT HERRICK

Muchas personas confunden el flujo del tiempo con la flecha del tiempo. Esto es comprensible, teniendo en cuenta la metáfora. Después de todo, las flechas vuelan —como se supone que hace el tiempo. Pero las flechas también se emplean como punteros estáticos, como una brújula para indicar el norte o una veleta para mostrar la dirección del viento. En este último sentido es en el que se utilizan las flechas en relación con el tiempo. En el capítulo 9 discutí los torpes intentos por parte de los físicos para fijar la flecha del tiempo. La magnitud que describe esta flecha no es el *flujo* del tiempo, sino la asimetría o sesgo del mundo físico *en* el tiempo, la diferencia entre las direcciones pasada y futura del tiempo.

El tiempo no tiene que *fluir* del pasado al futuro para que se manifieste una asimetría temporal. Para ver por qué, imaginemos una película de un proceso típico irreversible: un huevo que cae al suelo y se rompe. Supongamos que la película es cortada en fotogramas y los fotogramas son barajados. Enfrentados a la tediosa tarea de reordenarlos, la mayoría de las personas tendrían pocas dificultades en restaurar, más o menos, la secuencia original. Sospechamos que los fotogramas de huevos intactos están cerca del principio, y los fotogramas de cáscaras rotas cerca del final. La asimetría de la secuencia es obvia mediante inspección; no es realmente necesario *pasar* la película y ver cómo se «despliegan» los sucesos ordenados para distinguir la flecha del tiempo. Esta flecha no tiene nada que ver con la *película*; es una propiedad estructural del conjunto de fotogramas. La flecha, o la asimetría, está allí tanto si los fotogramas están simplemente apilados en serie uno encima de otro como si son pegados de nuevo y proyectados.

Yo soy tan culpable como cualquier otro por perpetuar la confusión del flujo del tiempo y la flecha del tiempo. En los capítulos anteriores he hablado descaradamente del tiempo que corre más rápido en el espacio, o el tiempo que fluye hacia atrás en otra parte del universo. Esto era por conveniencia estilística. «El tiempo corre más rápido en el espacio» significa realmente que la duración entre dos sucesos medida por un reloj en el espacio es un poco mayor que medida por un reloj en la Tierra. El punto importante es el intervalo de tiempo entre los sucesos, y no algún movimiento temporal mítico por el que el mundo va de un suceso a otro. Análogamente, «el tiempo que fluye hacia atrás» significa simplemente la inversión de la flecha del tiempo.

Por supuesto, la existencia de una flecha del tiempo no descarta un flujo del tiempo. Lógicamente, sin embargo, si el tiempo fluyera no tendría que ser necesariamente en la dirección indicada por la flecha. El tiempo podría fluir

desde el futuro hacia el pasado, y un observador vería entonces los sucesos «yendo hacia atrás» con respecto a nuestra propia experiencia del mundo. Por el contrario, si el flujo del tiempo está por completo en la mente, entonces es probable que su dirección coincida con la flecha del tiempo, puesto que la flecha determina la direccionalidad de los procesos termodinámicos en el cerebro. Si es así, decir entonces que el tiempo fluye hacia atrás cuando se invierte la flecha del tiempo es de hecho correcto si por este enunciado uno entiende que el tiempo *parece* fluir hacia atrás.

La confusión lingüística se exacerba por el uso de las palabras «pasado» y «futuro», que también tienen un significado dual, como mencioné en el capítulo 9. Einstein demolió las categorías absolutas de *el pasado*, *el presente* y *el futuro*, pero pasado y futuro aún retienen algún significado físico en la teoría de la relatividad. Por ejemplo, aún es posible decir que un suceso ocurrió después que otro, de modo que el suceso A podría estar en el futuro del suceso B. Este enunciado no tiene nada que ver con que el suceso A o el B realmente «ocurran»: la relación temporal entre A y B es una propiedad intemporal y no está relacionada con la existencia de un ahora, o con el momento de tiempo en que un ser humano particular pudiera decidir que es «ahora» en relación con A y B. Como recalqué en el capítulo 9, podemos decir que la flecha del tiempo apunta (por convenio) «hacia el futuro», sin que esto implique que existe una *región* de tiempo —«el futuro»— del mismo modo que no entendemos que existe un lugar concreto —*el Norte*— cuando decimos que la aguja de una brújula apunta «hacia el norte». En lugar de ello, la flecha del tiempo y la flecha de la brújula indican una *dirección* —en el tiempo y en el espacio, respectivamente.

¿Por qué ahora?

¿Por qué no vivimos en el reino de Jorge III?

J. E. McTAGGART

No es simplemente el flujo temporal lo que nos desconcierta. El paso del tiempo se ve a menudo como el avance de «el ahora» *a través* del tiempo. Podemos imaginar la dimensión temporal extendida como una línea del destino, y un instante particular —«ahora»— singularizado como un pequeño punto brillante. A medida que «el tiempo pasa», la luz recorre continuamente la línea temporal hacia el futuro. No hace falta decir que los físicos no pueden encontrar nada de esto en el mundo objetivo: ninguna luz pequeña, ningún presente privilegiado, ninguna migración en la línea del tiempo.

Así que ¿dónde ha ido el ahora? Cuando era niño quedé profundamente conmovido cuando mi madre me dijo que si no hubiera conocido a mi padre, yo no habría nacido. Nunca se me había ocurrido. Por supuesto, ella aún

podría haber dado a luz a un niño en 1946, pero ese niño no hubiera sido yo —¡hubiera sido algún otro! ¿Qué pasa entonces? Mi sentido infantil de «ella tendrá razón» me llevó a suponer que yo hubiera nacido en algún otro instante, con algunos otros padres. Pero ¿cuándo? Estuve despierto toda la noche pensando en esto. ¿Por qué estaba viviendo *ahora* en lugar de hacerlo en alguna otra época de la historia? Podría igualmente haberme encontrado viviendo en la época romana, o en el siglo xxv. Dado que yo *debía* existir, ¿qué es lo que determina, me preguntaba confusamente, *cuándo* existo? Para mí, «ahora» es cuando yo estoy vivo para tener experiencia del mundo. De modo que ¿por qué es *ahora* el siglo xx? En otras palabras, ¿por qué es «ahora» *ahora*? ¿Hay algo especial sobre *este* ahora —*mi* ahora— en contraste con otros ahoras, como los del siglo xxv? ¿Estarán también en el siglo xxv intrigados sobre qué hay especial en *su* ahora?

A menos, por supuesto, de que no quede nadie para entonces.

¡Ah! ¿Podría esto explicar por qué yo estoy vivo *ahora*... puesto que no podría estar vivo *entonces*? O, volviendo el argumento del revés, ¿podría el hecho de que yo *estoy* vivo ahora implicar algo desagradable sobre la especie humana en el siglo xxv?

Brandon Carter, un astrofísico británico que vive en Francia, tenía algo que decir sobre la cuestión. Entre sus colegas astrofísicos Carter es famoso por su trabajo sobre los agujeros negros. Otros conocen su nombre en relación con algo denominado el «principio antrópico». Éste establece, en forma bastante inocua, que el mundo que vemos a nuestro alrededor no puede ser tal que prohíba los seres conscientes. Viendo como *estamos* aquí y conscientes, no sorprende que observemos un mundo consistente con nuestra existencia. Difícilmente podría ser de otra manera. En esta forma, el principio antrópico es trivial. Pero cobra más interés cuando tenemos en cuenta que algunos aspectos de lo que observamos quizá no sean típicos en general. Por ejemplo, nuestra situación en el espacio no es nada típica. La mayor parte del universo es o bien un vacío o un gas tenue, pero nosotros vivimos en la superficie de un planeta sólido. La mayoría de los planetas están muy calientes o muy fríos, pero el nuestro es intermedio. No hay nada misterioso sobre esto: la existencia de organismos biológicos conscientes requiere circunstancias especiales, como un planeta sólido a una temperatura adecuada. No podríamos haber evolucionado de forma muy diferente en cualquier parte. Puede ser también que nuestro Sol, o la Vía Láctea, sea de alguna forma especial (no hay evidencia observacional de que lo sean). Si es así, esto proporcionaría una razón de por qué nos encontramos viviendo en *esta* parte del universo y no en alguna otra.

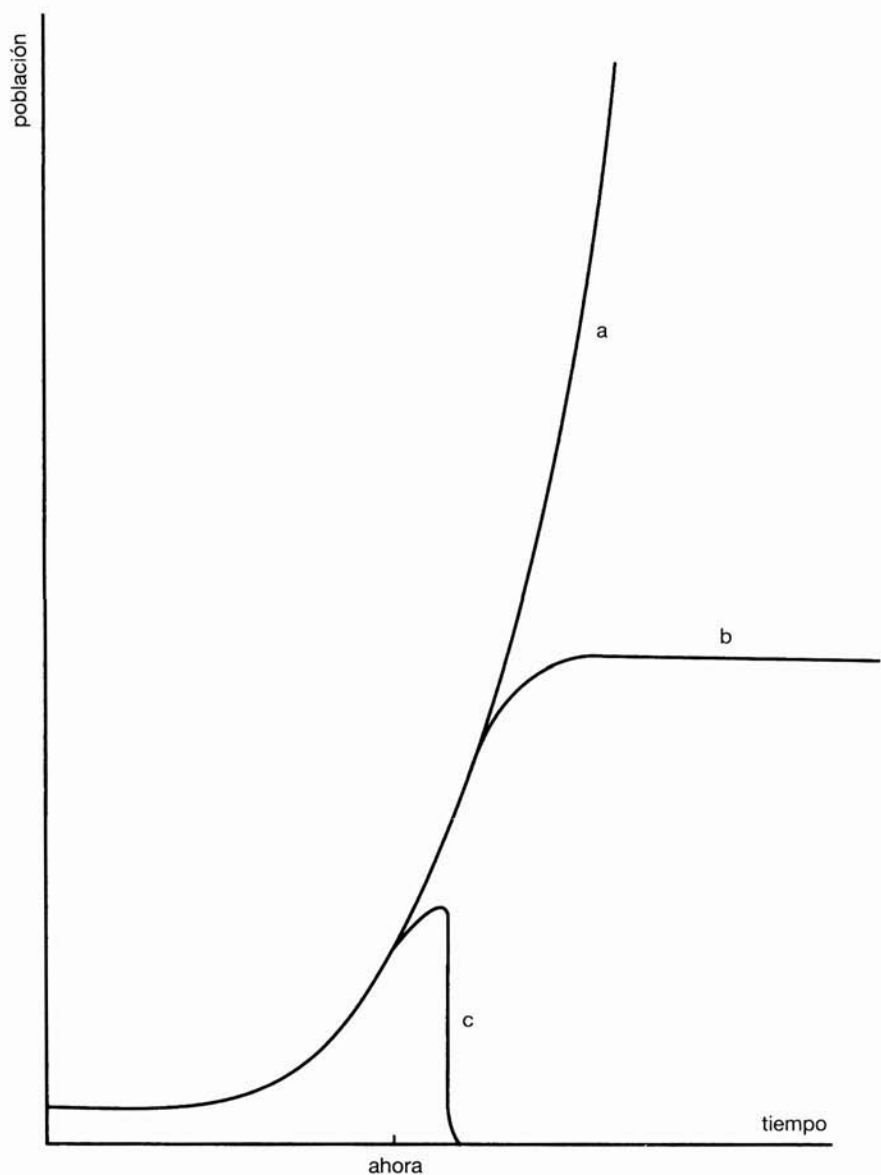
Sólo hay un pequeño paso desde el reconocimiento de que nuestra situación en el espacio es atípica a alcanzar la misma conclusión sobre nuestra situación en el tiempo. ¿Quizá estamos viviendo en esta época más que en algu-

na otra porque la vida sería imposible en otras épocas? El astrofísico norteamericano Robert Dicke señaló hace muchos años que la vida (al menos del tipo que conocemos) requiere ciertos elementos clave, tales como el carbono, y es poco probable que éstos existieran inmediatamente después del big bang.⁵ El carbono no estaba en el comienzo, sino que se fabricó dentro de las estrellas. Las estrellas pueden liberar su carbono al espacio de diversas maneras, principalmente por explosiones de supernova, de modo que el carbono es continuamente reciclado en nuevas generaciones de estrellas y planetas. Dicke razonaba que se necesitaría al menos el tiempo necesario para que una generación de estrellas viva y muera antes de que pudiera empezar la vida biológica. Por el contrario, después de que hubieran transcurrido unas pocas generaciones estelares las estrellas empezarían a escasear, y los sistemas planetarios templados, como el sistema solar serían algo del pasado. Se sigue de ello que nuestra existencia en esta época (aproximadamente dos o tres generaciones estelares en el gran drama cósmico) es razonablemente típica —y no es una sorpresa.

En una memorable reunión en la Royal Society de Londres en 1983, Brandon Carter llevó este tema de «¿por qué ahora?» un paso dramático (y en opinión de muchos, absurdo) más allá. Imaginemos todos los seres humanos que vayan a vivir alguna vez, dijo él. Si la humanidad sobrevive a sus actuales problemas y se mantiene durante miles o incluso millones de años, la mayor parte de los hombres vivirá en nuestro futuro. Por lo tanto, *nosotros* seríamos seres humanos muy atípicos, viviendo como lo hacemos a finales del siglo xx. Pero ¿qué razón tenemos para suponer que nosotros los pobladores de finales del siglo xx —meros seres humanos casuales en la vastedad de la historia humana— somos *especiales*? Ninguna. Luego: la hipótesis de que la humanidad continuará durante muchísimo tiempo es sospechosa. Si nosotros *somos* típicos, entonces la humanidad está condenada y destinada a una inminente aniquilación.

Quizá debido al hecho de que esta predicción apocalíptica fue enunciada en un tono muy grave y, tal como yo recuerdo, oscurecida con diapositivas casi ilegibles, cayó básicamente en oídos sordos en esa época. El propio Carter no llevó más lejos el argumento, pero pensaba que los comandantes de submarinos nucleares harían bien en reflexionar sobre ello.

La confrontación capital de Carter del provocador por-qué-estoy-viviendo-ahora reavivó mi perplejidad infantil. Miremos los tres gráficos mostrados en la figura 12.1. Muestran tres posibles escenarios para el futuro de la humanidad, basados en proyecciones del crecimiento de la población. En *a* el número de seres humanos sigue creciendo hasta el futuro lejano. Resulta difícil ver cómo puede suceder esto sin una rápida colonización de otros planetas. En *b* la población de la Tierra aumenta impetuosamente, luego se estabiliza, quizá en veinte mil millones. En *c* el número tiene un máximo en un valor no mucho más alto que el valor actual, y luego cae abruptamente. Cada gráfico muestra nuestra situación aproximada («ahora»), que coincide con el brusco aumento de po-



12.1. ¿Está próximo el Día del Juicio? El gráfico muestra tres perspectivas alternativas para el crecimiento de la población humana. La característica común es el rápido crecimiento de la población en el siglo xx. Nuestra existencia en esta época es atípica y accidental excepto en el caso de la curva c, en donde el rápido crecimiento de la población va a verse pronto interrumpido, quizá por una catástrofe repentina.

blación característico del siglo xx. Es interesante notar que, debido a este crecimiento acelerado de la población, aproximadamente el 10 por 100 de las personas que han vivido hasta el momento están viviendo ahora.

Resulta obvio con una sola ojeada que estar viviendo cerca de este precipicio es muy atípico en los escenarios *a* y *b*, pero perfectamente típico en el caso de *c*. Esto sugiere que *c* puede estar cerca de la verdadera distribución de seres humanos, y predice que probablemente el pico no está demasiado lejos en el futuro. La subsiguiente caída drástica de población podría llegar de muchas formas: guerra nuclear, enfermedades, desastre ecológico, impacto de asteroides, etc., etc.

La mayoría de las personas rechazan el argumento de Carter con desprecio. ¿Cómo podemos predecir el futuro de los seres humanos libres a partir de gráficas imaginarias y argumentos sobre probabilidades? Esos seres futuros ni siquiera existen todavía. ¿Cómo podemos colocar sus observaciones (por ejemplo, los ahora del siglo xxv) —o quizá sus no observaciones— en pie de igualdad con *nuestras* observaciones *ahora* (es decir, en *este* ahora)? Después de todo, nosotros *existimos realmente* ahora; ellos no existen todavía, ¿o sí lo hacen?

Cualquiera que haya leído el capítulo 2 cuidadosamente sabrá que esta es una débil objeción. Einstein desbarató la idea de un ahora universal, y apuntó el camino hacia el «tiempo en bloque», en el que todos los sucesos —pasado, presente y futuro— son igualmente reales. Para el físico, los seres humanos del siglo xxv *están* «ahí» (o no, si la curva *c* de la figura 12.1 es una predicción correcta). Están ahí —*en el futuro!*

Aunque Carter fue cauto en su argumento del Día del Juicio Final (lo omitió en la versión publicada de su conferencia),⁶ el filósofo canadiense John Leslie ha escrito extensamente sobre ello.⁷ Leslie hace una analogía entre el conjunto de todos los seres humanos que van a vivir alguna vez y unas papeletas que permanecen en una gran urna imaginaria. Hay una papeleta por cada uno de nosotros, con nuestro nombre inscrito en ella. La gran mano del destino se introduce en la urna y extrae las papeletas una a una, conjurando así a la existencia a la persona correspondiente. Sabemos que aproximadamente 40.000 millones de papeletas han sido extraídas hasta el momento (hay aproximadamente 4.000 millones de personas vivas en la actualidad). Sobre la base de la evidencia disponible, ¿podemos concluir algo sobre el número de papeletas que quedan en la urna? Carter y Leslie dicen que sí, y argumentan que es poco probable que haya un número mucho mayor que el total extraído hasta el momento.

Para ver por qué es así, reduzcamos los números al tamaño de una urna cotidiana y consideremos un sencillo experimento práctico. Supongamos que a usted se le muestra una urna y se le dice que hay dos posibilidades: *i*) la urna contiene diez papeletas (la visión fatídica de Carter), y *ii*) la urna contiene mil papeletas. Usted no tiene ninguna idea de si *i*) o *ii*) es el estado de cosas real, pero se le dice que, en cualquier caso, su nombre está inscrito en una y sólo una papeleta. Se le pide que apueste por *i*) frente a *ii*). En ausencia de cualquier

evidencia, cualquier conjetura vale. Digamos que usted es escéptico acerca de *i*) y decide apostar cincuenta a uno en contra. Ahora se extraen papeletas una a una y, cuando se llevan tres extraídas, su nombre ha aparecido. Se le pregunta si quiere revisar su estimación de las probabilidades. ¡Por supuesto, usted lo haría! Usted está apostando fuertemente a que la urna contiene mil papeletas, y la suya ha sido extraída a la tercera extracción. Esto es mucho más probable que suceda si existen sólo diez papeletas en total que si existen mil. A la luz de esta nueva evidencia, hay una fórmula matemática bien conocida llamada «regla de Bayes» para calcular la mejor apuesta. Con los números anteriores resulta que la probabilidad de que *i*) sea correcta es ahora $2/3$, es decir, el doble que la de *ii*).

La regla de Bayes es una técnica estándar para asignar probabilidades a hipótesis en competición cuando se nos da sólo una información limitada. Leslie cree que puede aplicarse al caso de la gran urna de seres humanos y, utilizando la evidencia de que «nuestras papeletas» han sido extraídas muy pronto, podemos concluir razonablemente que Carter tiene razón y pronto llegará el Juicio Final.

El argumento del Día del Juicio Final recibe apoyo de una dirección inusual. ¿No es extraño, preguntaba Carter, que «ahora» resulte ser aproximadamente el momento en que el Sol está en su edad mediana? Si la evolución hubiera ido sólo un poco más lenta, nosotros nunca habiéramos llegado a tiempo. El Sol se habría quemado regularmente durante algunos miles de millones de años; la vida habría aparecido en la Tierra y progresado un poco, y luego habría sido destruida por los estertores de muerte de nuestra estrella antes de que surgiera cualquier ser sensible para preocuparse por ello. Puesto que los procesos de la evolución biológica son básicamente accidentales y no tienen conexión obvia con los procesos que determinan la velocidad a la que envejece el Sol, podría parecer que no hay relación física entre la vida media del Sol y la escala de tiempo de la evolución. Parece altamente sospechoso el hecho de que, en cualquier caso, estas largas duraciones resulten diferir sólo en un factor de aproximadamente dos.

Carter explica la «coincidencia» de que estas dos escalas de tiempo aparentemente independientes concuerden aproximadamente, utilizando un curioso argumento. Debe ser, razona él, que los seres inteligentes como nosotros son extraordinariamente improbables —tan improbables, de hecho, que usted esperaría tener que aguardar una longitud de tiempo realmente enorme para que ellos evolucionen. Esto no significa que *no puedan* aparecer antes (obviamente, porque sí lo han hecho): un proceso aleatorio muy raro puede siempre ocurrir más rápidamente por azar, contra toda probabilidad; pero es más probable que estas posibilidades se den más tarde que más pronto, pues, cuanto más tarde se den, más tiempo hay para que ocurra cualquier secuencia rara de accidentes que se necesite.

Para clarificar este punto, permítanme considerar otra analogía con juegos

de azar. Suponga usted que se le pide que arroje tres dados y obtenga tres unos, seguidos en alguna etapa por tres doses, y seguidos en alguna etapa posterior por tres treses. Estos tríos improbables son los correspondientes a algún paso muy poco probable en la evolución de la humanidad (por ejemplo, la emergencia de la consciencia). Se le permiten cincuenta tiradas en total. Existen muchas probabilidades de que usted no saque la secuencia requerida en absoluto; pero si usted lo *hace*, es más probable que el paso de obtener tres treses ocurra cerca del final del ensayo que cerca del principio, para permitir el máximo número de tiradas para que se completen primero los dos pasos anteriores, contra toda probabilidad. Para ver por qué, nótese que las probabilidades de obtener tres unos, tres doses y tres treses en las *primeras* tres tiradas son mucho menores que si se utilizan las cincuenta tiradas completas en el ensayo.

Reelaborando estas ideas sobre dados en el contexto de la evolución humana, si existen n pasos poco probables en nuestro desarrollo, cuanto mayor sea el número n más próximos estaremos probablemente de el «final del ensayo» —es decir, el Día del Juicio Final. Ahora bien, algunos biólogos podrían argumentar que n es sólo uno o dos. Si esto es correcto, entonces el hecho curioso de que la época de la existencia humana resulte ser (dentro de un factor de dos) la misma que la vida total esperada del Sol se explica fácilmente. Por el contrario, usted podría olvidarse del Sol y de la coincidencia de escalas de tiempo y volver el argumento del revés, razonando que n es muy grande. De hecho, la mayoría de los biólogos piensan que n es un número alto —que se dieron un gran número de accidentes improbables que llegaron a dar el *Homo sapiens*. Si ellos tienen razón, entonces estamos probablemente muy cerca del Día del Juicio Final. Carter fue capaz de proporcionar una fórmula manejable, basada en simple teoría de probabilidades, para calcular cuánto tiempo podemos esperar sobrevivir. Para calcular el tiempo que queda, usted divide la vida media total esperada para el Sol (digamos 8.000 millones de años) por $n + 1$. Si n es un millón, no podemos esperar más de aproximadamente 8.000 años antes de ser aniquilados de una forma u otra. (Para una lista de alternativas horribles, véase mi libro *The Last Three Minutes*.)

Si usted cree el argumento de Carter, entonces no tiene por qué preocuparse de ser un ser humano viviendo ahora en lugar de ser un hombrecillo verde en la galaxia de Andrómeda dentro de 100.000 millones de años. Hay muchas probabilidades de que no existirán tales personas, verdes o de cualquier otra forma. Aunque queda abierta la posibilidad de alguna forma de vida inferior en alguna otra parte, el argumento sugiere que la vida inteligente está casi completamente confinada a la Tierra en esta época —que proporciona una única e improbable ventana de oportunidades en el espacio y el tiempo que sencillamente ocupamos de chiripa.

Y *ahora* vayamos a algo completamente diferente...

Experimentar con el tiempo

El Tiempo marca distintos pasos con distintas personas. Puedo decirlos con quién va a paso de andadura, con quién al trote, con quién al galope y con quién para en firme.

WILLIAM SHAKESPEARE

¿Cuánto dura el presente?

No tenemos ninguna razón para pensar que ni siquiera ahora el tiempo es perfectamente continuo y uniforme en su flujo.

C. S. PEIRCE (1890)

Hasta ahora, he estado escribiendo sobre «ahora» como si este fuera literalmente un instante de tiempo, pero por supuesto las facultades humanas no son infinitamente precisas. Resulta simplista suponer que los sucesos físicos y los sucesos mentales marchan exactamente al paso, con la corriente de «momentos reales» en el mundo exterior y la corriente de percepción consciente de los mismos perfectamente sincronizadas. La industria del cine se basa en el fenómeno de que lo que nos parece una película es en realidad una sucesión de fotografías estáticas que pasan a veinticinco fotogramas por segundo. Nosotros no advertimos las uniones. Evidentemente, el «ahora» de nuestra percepción consciente se dilata durante al menos 1/25 de segundo.

De hecho, los psicólogos están convencidos de que puede durar bastante más que eso. Tomemos el familiar «tic-tac» del reloj. Bien, el reloj no hace «tic-tac» en absoluto; hace «tic-tic», donde cada tic produce el mismo sonido. Sucede simplemente que nuestra consciencia reúne dos tics sucesivos en una experiencia «tic-tac» —pero sólo si la duración entre tics es menor que aproximadamente tres segundos. Un reloj de péndulo realmente grande hace simplemente «tac...tac...tac», mientras que un reloj de mesilla de noche hace: «tictactictac...».

Dos o tres segundos parece ser la duración sobre la que nuestra mente integra los datos sensoriales percibidos en una experiencia unitaria, un hecho reflejado en la estructura de la música y la poesía. En su ensayo «La dimensión del momento presente», el poeta húngaro Miroslav Holub informa que, en el 73 por 100 de todos los poemas en alemán leídos en voz alta, los versos duran entre dos y tres segundos: los «bytes sonoros» básicos se adaptan deliberadamente a la velocidad de nuestras funciones mentales. Los poemas con versos más largos se leen con una ligera pausa inconsciente en medio de cada verso. No tengo duda de que lo mismo se encontraría en la poesía inglesa. «En este sentido —escribe Holub—, nuestro yo dura tres segundos. Cualquier otra cosa es o bien esperanza o bien un incidente embarazoso.»¹

Por el contrario, los seres humanos pueden ciertamente realizar algunas tareas conscientes, como accionar los frenos de un automóvil, en una escala de tiempo mucho más corta que esto. En una actividad como la de tocar el piano, los movimientos de la mano se realizan a una velocidad vertiginosa en respuesta a un concepto global de «la melodía»: el pianista no es consciente de dar instrucciones para cada movimiento individual. Quizá existan muchos «ahoras» de duración variable, dependiendo simplemente de lo que estemos haciendo. Debemos enfrentarnos al hecho de que, al menos en el caso de los seres humanos, el sujeto que experimenta el tiempo subjetivo no es un observador perfecto y sin estructura, sino una psique compleja, multifacética y con muchas capas. Diferentes niveles de nuestra consciencia pueden experimentar el tiempo de maneras completamente diferentes. Este es evidentemente el caso en términos de tiempo de respuesta. Usted probablemente haya tenido la experiencia ligeramente desconcertante de saltar ante el sonido de un teléfono un instante o dos antes de oír realmente el timbre. El ruido estridente induce una respuesta refleja en el sistema nervioso mucho más rápida que el tiempo necesario para crear la experiencia consciente del sonido.

Es común atribuir ciertas cualidades, tal como la capacidad del habla, al lado izquierdo del cerebro, mientras que otras, tal como la apreciación musical, pertenecen a procesos que ocurren en el lado derecho. Pero ¿por qué deberían ambos hemisferios experimentar un tiempo común? Y ¿por qué debería el subconsciente utilizar el mismo reloj mental que el yo consciente? A veces se afirma que los sueños «transcurren» a velocidad muy alta con respecto a las correspondientes experiencias de vigilia, aunque yo no conozco ninguna evidencia experimental convincente de esto. Sin embargo, ciertos estados mentales están claramente asociados con ritmos alterados. El neurólogo Oliver Sacks me describió una vez una experiencia en la que, estando con ánimo preocupado, nadó durante muchas horas creyendo que sólo había transcurrido una hora más o menos, y salió del agua exhausto. La privación sensorial también puede alterar drásticamente la impresión de los intervalos de tiempo. Quienes practican la meditación afirman que pueden suspender por completo su percepción del flujo del tiempo desconectándose de los sucesos mundanos.

Los psicólogos han imaginado algunas formas ingeniosas de ayudar a desempaquetar el «ahora» humano. Consideremos cómo unimos estos espasmódicos fotogramas de película en una corriente consciente suave y continua. Esto se conoce como el «fenómeno phi». La esencia de phi se manifiesta en experimentos realizados en una habitación oscura donde dos pequeños puntos luminosos, en posiciones ligeramente separadas, brillan brevemente en rápida sucesión.² Lo que los sujetos informan que están viendo no es una sucesión de puntos, sino un *solo* punto moviéndose continuamente de un lado a otro. Típicamente, los puntos se iluminan durante periodos de 150 milisegundos separados por un intervalo de 50 milisegundos. Evidentemente el cerebro «rellena» de algún modo el intervalo de 50 milisegundos. Presumiblemente esta «alucinación» o ajuste ocurre *a posteriori*, puesto que hasta que no se produce el segundo destello el sujeto no puede saber que la luz «supuestamente» se mueve. Esto indica que el ahora humano no es simultáneo con el estímulo visual, sino que está algo retrasado, dando tiempo para que el cerebro reconstruya una ficción plausible de lo que ha sucedido algunos milisegundos antes.

En una fascinante variación del experimento, el primer punto tiene color rojo y el segundo verde. Esto presenta claramente un problema al cerebro. ¿Cómo unir las dos experiencias discontinuas —punto rojo, punto verde? ¿Mezclando los colores sin solución de continuidad? ¿Esperando hasta que llegue el estímulo visual de verde antes de saltar? ¿O de alguna otra forma? De hecho, los sujetos informan que ven que el punto cambia de color abruptamente a la mitad de la trayectoria imaginada, y son incluso capaces de indicar dónde lo hacen exactamente utilizando un puntero. No podemos dejar de preguntarnos cómo puede el sujeto experimentar aparentemente la sensación de color «correcta» *antes* de que se ilumine el punto verde. ¿Es un tipo de precognición? Comentando este fenómeno mágico, el filósofo Nelson Goodman escribió sugerentemente: «El movimiento intermedio se produce retrospectivamente; es construido sólo después de que ocurra el segundo destello y es proyectado hacia atrás en el tiempo».³ En su libro *La conciencia explicada* el filósofo Daniel Dennett señala que la ilusión de cambio de color no puede realmente ser creada por el cerebro hasta después de que aparezca el punto verde. «Pero si el segundo punto está ya “en la experiencia consciente”, ¿no sería demasiado tarde para interponer el contenido ilusorio entre la experiencia consciente del punto rojo y la experiencia consciente del punto verde?»⁴

Ahora lo ves, ahora no lo ves

La palabra Tiempo no vino del cielo sino de la boca del hombre.

JOHN WHEELER

El sentido común sugiere que, en el experimento de los dos puntos, el cerebro espera hasta que ve el punto verde, luego «retrocede» y rellena la transición,

entregando finalmente el producto uniforme y correcto al «sujeto consciente» como un todo consistente en un corto tiempo después de que todo «suciera realmente». Dennett denomina a esta explicación el «modelo estalinista», comparándola a un censor en una habitación de control de radio que instala un bucle en la cinta registradora que provoca un retraso de algunos segundos en la transmisión para suprimir las obscenidades. El problema es que se necesitan doscientos milisegundos desde el comienzo del experimento hasta la aparición de la luz verde, y este es un tiempo suficientemente largo para advertir un «salto en la película» (corresponde a aproximadamente cinco fotogramas de una película real). Evidentemente los sujetos pueden responder mucho más rápidamente que esto a estímulos visuales si son urgidos a hacerlo. Por ejemplo, es posible que el sujeto presione un botón que señala que se ha hecho consciente de la presencia del punto rojo mucho antes de que aparezca el punto verde. Por ello es difícil ver cómo puede hacerse que la consciencia «suspenda el tiempo» durante un intervalo tan largo.

Dennett considera una explicación alternativa: la orwelliana. Aquí el sujeto tiene inicialmente la experiencia consciente del punto rojo, y luego la del punto verde, pero una especie de censor intrínseco, que pone una junto a otra y no consigue obtener dos, procede a hacer un montaje de la serie original de sucesos y reemplazarla por una que contiene una trayectoria uniforme. Esto implica suplantar el molesto recuerdo original con su ruptura de iluminación y reemplazarlo por la versión «editada» de una trayectoria continua.

Si la explicación orwelliana parece demasiado fantástica, consideremos otra serie de experimentos discutidos por Dennett. En este caso, se proyecta fugazmente una imagen (un disco) ante un sujeto —brevemente, pero durante el tiempo suficiente para ser percibida e identificada correctamente. Si, inmediatamente después, se proyecta fugazmente una segunda imagen (un anillo, colocado de forma que rodee el punto que ocupaba anteriormente el disco), esto tiene el efecto de borrar la percepción (o al menos el recuerdo de la percepción) de la primera imagen, casi como si el cerebro, al recibir la segunda imagen, decidiera censurar la primera.

Tanto la explicación estalinista como la orwelliana se basan en la idea común de que existe una «sede de la consciencia» —un sujeto que merodea en alguna parte de nuestros cerebros como un espectador en una sala de cine— al que se le proporciona una corriente «editada» de impresiones sensoriales, completa con pequeños ajustes temporales. En esta visión, que se remonta a la teoría dualista de mente-cerebro de René Descartes, usted ve que algo «sucede» cuando el cerebro (después del debido procesamiento de los datos) «presenta el producto acabado» a «usted» —el espectador. En esta visión puede trazarse una línea definida en el tiempo: el momento en que los datos sensoriales «entran en su consciencia». Por desgracia, semejante imagen de la consciencia está ahora casi totalmente desacreditada. Dennett, por ejemplo, prefiere considerar la consciencia en términos de lo que denomina un modelo de

esbozos múltiples, que implica una serie de funciones de procesamiento y edición que continuamente refinan y actualizan los datos entrantes en paralelo, difuminando las relaciones temporales como resultado. En esta teoría no hay sala de cine, ni espectáculo, ni espectador, y no hay sede de la consciencia en donde «usted» se hace consciente, en algún instante de tiempo, de algún suceso real que «recién sucedió» en el mundo externo. En lugar de ello, tanto «usted» como su consciencia de una corriente de sucesos en una cierta secuencia temporal son *creados* por la confluencia de estas muchas corrientes paralelas de procesamiento de datos.

Dennett denuncia la idea estalinista de que ciertos datos fragmentarios merodean en torno al cerebro fuera de nuestro alcance, posiblemente procesándose en el camino, y luego entran finalmente dentro de algún tipo de círculo mágico donde nos hacemos conscientes de ellos. Dennett es igualmente mordaz sobre el punto de vista orwelliano, donde los datos a veces entran en nuestra consciencia sólo para ser sumariamente expulsados de nuevo, haciendo que la información desaparezca no mucho después de que haya llegado. La percepción consciente, afirma Dennett, no es la presentación de datos (posiblemente editados) a un sujeto mítico (la mente), sino que es la suma total de las corrientes de datos tomados en conjunto. «El cerebro no tiene realmente que tomarse la molestia de “llenar” algo con “constructos” —escribe—, pues nadie está mirando.»⁵

Si el cerebro no es, después de todo, un tipo de proyector «presentando un espectáculo» a un espectador (usted, el sujeto consciente), entonces el problema de proyectar «hacia atrás en el tiempo» como lo expresaba Goodman, simplemente se evapora. En la teoría de los esbozos múltiples no hay nada tan nítido como un empalme biunívoco de sucesos físicos y sucesos mentales. El sujeto construye una narrativa acerca del mundo a partir de un conjunto de corrientes de información (esbozos) que están sometidos continuamente a edición e incluso retractación. Cada corriente puede proporcionar su propia línea de tiempo para ser colocada junto a la línea de tiempo de los sucesos objetivos. A menudo puede suceder que una línea de tiempo informacional «retroceda» durante algunos milisegundos con respecto a otras líneas de tiempo informacionales, o a «un tiempo objetivo», refinando adicionalmente de este modo el proceso de edición. El resultado es la ilusión convincente de una metanarrativa coherente y homogénea que se está presentando a un espectador independiente.

Llenar el tiempo

Por consiguiente, existe para el individuo un yo-tiempo, o tiempo subjetivo. Éste en sí mismo no es medible.

ALBERT EINSTEIN

Dennett expone también un experimento en el que el cerebro parece crear ilusiones temporales con la información táctil. El sujeto lleva un dispositivo que le produce toques ligeros en el brazo en cierta secuencia: unos pocos en la muñeca, seguidos de un par en el codo, y luego en el hombro, en rápida sucesión. Cuando se hace esto, el sujeto informa de la sensación de toques equiespaciados que viajan brazo arriba, como un bichito saltando. En otras palabras, se siente que algunos toques tienen lugar *entre* los puntos de contacto, tales como en el antebrazo. Una vez más nos encontramos con el misterio de cómo sabe el cerebro que va a recibir un toque en el codo después del toque en la muñeca, para que pueda crear la falsa impresión de un toque en el antebrazo entre los dos. ¿Es un caso de causación retroactiva? No tal, dice Dennett, sino simplemente otro ejemplo de procesamiento paralelo, donde diferentes narrativas de la secuencia de sucesos fluyen a través del cerebro, siendo editadas, comparadas y rechazadas, y finalmente llegando a crear la ilusión.

Es obvio que debe haber *alguna* integración de las corrientes de datos en paralelo que van al cerebro continuamente, ya que los impulsos nerviosos procedentes de diferentes partes del cuerpo llegan al cerebro en diferentes momentos. Estos impulsos viajan de forma relativamente lenta, pero la supervivencia puede depender de nuestra capacidad para responder rápidamente. En tareas tales como una coordinación mano-ojo, el cerebro no puede permitirse el lujo de aparcarse ciertos impulsos en una especie de estacionamiento mientras espera la llegada de los otros para asegurar la sincronía. Bajo esta presión del tiempo, el cerebro debe estar continuamente «por delante de los acontecimientos», construyendo una imagen de un mundo a veces sorprendente basada en información fragmentaria que está sujeta a revisión continua. Puede que exista una fuerte *necesidad* biológica de una inversión del orden en que llegan los datos sensoriales y el orden temporal que infiere el sujeto.

En relación con esto se citan frecuentemente los experimentos de neurocirugía llevados a cabo por Benjamin Libet de la Universidad de California.⁶ Durante las operaciones cerebrales, el paciente se mantiene normalmente consciente. Libet aprovechó la oportunidad para conectar electrodos a cerebros al descubierto. Estimulando eléctricamente la corteza, fue capaz de producir la sensación de un hormigueo en la mano del paciente. En el experimento, Libet conectó también electrodos a la piel de las manos, de modo que era capaz de comparar las experiencias de hormigueos informados por el paciente cuando las manos y la corteza cerebral eran estimuladas a la vez.

En la primera parte del experimento, Libet descubrió que la sensación real

de hormigueo ocurría medio segundo después de que se produjera el estímulo, ya fuera en la mano o en la corteza, incluso si el tiempo de viaje de la señal hasta el cerebro era de sólo unos diez milisegundos. Los resultados de la segunda parte del experimento fueron aún más sorprendentes. Libet probó a estimular la mano izquierda en el mismo instante que la corteza izquierda. Lo último producía un hormigueo en la mano *derecha*, de modo que los pacientes sentían hormigueos en ambas manos y eran capaces de informar cuál de ellos parecía ocurrir primero. Ahora bien, usted podría suponer que la corteza estaría más próxima a la «sede de la consciencia» que la mano, de modo que el hormigueo inducido a través del cerebro en la mano derecha sería experimentado antes que el hormigueo inducido en la piel en la mano izquierda. ¡Pero el orden temporal estaba completamente invertido! Los pacientes sentían inequívocamente el hormigueo de la mano izquierda en primer lugar. Incluso cuando la mano era estimulada un corto tiempo *después* que el cerebro, el orden estaba invertido.

Libet explicaba sus resultados inesperados afirmando que, cuando se estimula la piel, la sensación experimentada aproximadamente medio segundo más tarde es «retrotraída en el tiempo» a cuando realmente ocurrió, mientras que no hay tal remisión hacia atrás para la estimulación cortical. Esto hace que *parezca* que la piel fue estimulada primero, mientras que de hecho es lo contrario. Una interpretación ingenua del experimento es que nos hacemos conscientes de al menos algunos sucesos en el mundo aproximadamente medio segundo después de que sucedan realmente, es decir, el «ahora» personal es medio segundo «después», y el mundo percibido es una especie de repetición de la acción.

El trabajo de Libet sugiere que hay un retardo sustancial cuando el sujeto se comporta como un observador pasivo. Un retardo similar parece estar implicado cuando la actividad cerebral ocurre en dirección contraria —es decir, cuando una persona desea libremente una acción voluntaria. Electrodo unido al cuero cabelludo pueden registrar las «ondas» cerebrales y detectar estallidos de actividad que están asociados con movimientos voluntarios, tales como la flexión de un dedo. Un equipo investigador alemán dirigido por H. H. Kornhuber descubrió que en algunos casos las células cerebrales comienzan a dispararse un segundo o más antes de que el movimiento físico comience realmente.⁷ ¡Es casi como si su cerebro supiese lo que «usted» va a hacer algunos momentos antes de que usted decida hacerlo! O, al menos, el cerebro «se pone» a la tarea antes de que usted *piense* que ha decidido hacerlo. Este estallido eléctrico precursor ha sido bautizado como «potencial de disposición» por el filósofo Karl Popper y el neurofisiólogo sir John Eccles, quienes argumentan, en una vuelta al dualismo de Descartes, que es debido a una mente no material que de algún modo apremia al cerebro a ejecutar su orden.⁸

Considerando los experimentos de Libet y Kornhuber, Roger Penrose señala que, tomados juntos y al pie de la letra, implican algo muy sorprendente.⁹ Dado que la consciencia se demora medio segundo y que las acciones requieren que el cerebro «esté listo» un segundo o más antes, parecería como si el

ser humano no pueda responder conscientemente a un suceso en menos de aproximadamente un par de segundos. Esto contradice evidentemente a la experiencia. Las personas pueden responder a estímulos en fracciones de segundo si se les pide que lo hagan. Pero esto podría significar que usted está actuando como un simple autómatas cuando produce respuestas tan rápidas, y solamente *imagina* que está utilizando la voluntad consciente. O quizá nuestros conceptos de tiempo y voluntad humana, al estar tan obviamente entretreídos, son mucho más sutiles de lo que sugiere la anterior imagen simplista.

La consciencia del tiempo difiere en un aspecto importante de la consciencia de otras cualidades físicas, tales como el tamaño o la forma espaciales. Cuando vemos una forma como un cuadrado, la actividad eléctrica en nuestros cerebros no tiene forma de cuadrado. No existe ningún «pequeño cuadrado» dentro de nuestras cabezas, proyectado en una pantalla para que el sujeto lo observe. En lugar de ello, una pauta complicada de actividad eléctrica produce (¿de algún modo!) la sensación «cuadrado». Es decir, el cuadrado está *representado* por una pauta eléctrica. No debemos confundir la pauta de la representación con la forma a ser percibida; la representación *no* es la misma estructura que el objeto. Cuando pasamos al tiempo, sin embargo, la situación es más complicada. Nuestro primer pensamiento es que una secuencia temporal de sucesos en el mundo externo está representada en nuestros cerebros por una secuencia temporal concordante de pulsos eléctricos. Esto sería el equivalente temporal del «pequeño cuadrado», donde la pauta de actividad eléctrica señala la sucesión de sucesos «ahí fuera». Pero el hecho de que el cerebro recibe una mezcla desincronizada de señales a partir de la cual tiene que construir una impresión consistente del tiempo, sugiere otras cosas. Puede ser que las pautas eléctricas en el cerebro que *representan* secuencias temporales sean completamente diferentes de la secuencia temporal *real* de los sucesos que representan.¹⁰

Sin embargo, hay *algo* especial sobre el tiempo a este respecto. En primer lugar, existen casos en donde la secuencia eléctrica en el cerebro parecería ensombrecer la secuencia temporal de sucesos en el mundo externo. Por ejemplo, el movimiento de un objeto de izquierda a derecha en el campo visual puede distinguirse del movimiento inverso, incluso para una duración muy breve. En segundo lugar, el sujeto consciente no es solamente un observador pasivo, sino un agente. Las señales entrantes sirven no meramente para informarnos, sino para incitarnos a la acción: tienen efectos causales. Las señales nerviosas son cosas físicas, y como tales están sujetas a las leyes de la física, como cualquier otra cosa. El orden temporal de los sucesos *físicos* tiene importancia: no podemos actuar basados en información sensorial hasta que la tengamos. Por ello, sería mejor que el «barajado» de secuencias temporales no llevase demasiado tiempo, o podríamos ser golpeados por una rama que cae mientras estamos reflexionando sobre la situación. Se sigue que el «momento presente» humano, mostrado ahora en toda su complejidad fisiológica y psicológica, no puede durar más de una fracción de segundo.

Tiempo subjetivo

Las abejas no están tan atareadas como nosotros pensamos. Simplemente no pueden zumbar más espacio.

KIN HUBBARD

Cualquiera que sea la explicación de los fascinantes experimentos que he mencionado (y no tengo duda de que no es una explicación sencilla), la mayoría de los psicólogos están de acuerdo en que formar una idea clara del tiempo es una función mental superior. Es posible que los seres humanos seamos los únicos que hayamos desarrollado una noción tan rica de temporalidad. Por supuesto, algunos de los aspectos más básicos de la experiencia temporal deben ser comunes a muchos animales, y deben derivarse de los diversos relojes biológicos internos que regulan las actividades orgánicas. El biólogo Stephen Jay Gould ha llamado la atención sobre el hecho interesante de que estos relojes, y por consiguiente el *ritmo* de la vida, dependen sensiblemente del tamaño corporal:

Desde que podemos recordar, estamos entrenados para considerar el tiempo newtoniano absoluto como la única vara de medir válida en un mundo racional y objetivo. Imponemos nuestro reloj de cocina, que marcha uniformemente, sobre todas las cosas. Nos maravillamos por la rapidez del ratón, expresamos aburrimiento por la torpeza de un hipopótamo. Pero cada uno de ellos está viviendo al ritmo apropiado de su propio reloj biológico.

Los mamíferos pequeños se desarrollan rápidamente, se consumen rápidamente y viven durante un corto tiempo: los mamíferos grandes viven mucho tiempo a un ritmo pausado. Medido en sus propios relojes internos, los mamíferos de tamaños diferentes tienden a vivir la misma cantidad de tiempo.¹¹

El ritmo de actividad mencionado aquí incluye los ritmos de respiración, el latido cardíaco y el metabolismo de los alimentos. Estas funciones muestran leyes que se escalan de forma matemáticamente precisa con el peso corporal, como lo hace la esperanza de vida. Así pues, el corazón de su conejillo de Indias late varias veces más rápido que el de usted, pero es probable que aquél muera en un par de años. La pregunta interesante es: ¿los dos años asignados al conejillo de Indias le *parecen* a él lo mismo que a nosotros nos parecen setenta años? En otras palabras, ¿«corre» el tiempo psicológico a velocidades diferentes para los ratones y para los hombres?

Argumenté en el capítulo 8 que la respuesta debe depender más de la velocidad de pensamiento que de reflejos físicos o funciones musculares. Por lo que sé, todos los mamíferos tienen aproximadamente la misma «velocidad de pensamiento» (medida por el ritmo de actividad neurológica), de modo que parece que el pobre viejo ratón realmente tiene una vida corta, aunque ajetreada. Esto mismo puede no ser cierto para un ordenador inteligente como el su-

percebreo de Tipler, que podría operar mucho más rápidamente que un ser humano, o para un extraterrestre cuyos procesos metabólicos y neurológicos pueden ser completamente diferentes. Si la experiencia subjetiva del paso del tiempo para el extraterrestre depende del ritmo al que se procesa la información, como Tipler y Dyson suponían (véase el capítulo 8), entonces, cuanto más rápido sea el procesamiento, más ideas y percepciones experimentará el extraterrestre por unidad de tiempo —y más rápidamente parecerá que pasa el tiempo. Esta hipótesis se utiliza de una manera divertida en la novela de ciencia ficción *Dragon's Egg* (El huevo del dragón) de Robert Forward, que cuenta la historia de una comunidad de seres conscientes que viven en la superficie de una estrella de neutrones.¹² Estos extraterrestres compactos se valen de procesos nucleares en lugar de químicos para mantener su existencia. Puesto que las reacciones nucleares tienen lugar mucho más rápidamente que las reacciones químicas, los seres neutrónicos procesan la información de una manera muy rápida. Un minuto en la escala de tiempo humana representa el equivalente de muchos años para los extraterrestres. En la narración, la comunidad de la estrella de neutrones es completamente primitiva cuando entra en contacto por primera vez con los seres humanos, pero se desarrolla ante sus propios ojos y rápidamente supera a la humanidad.

Por atractiva que pueda resultar esta sencilla visión del tiempo psicológico, es indudablemente una simplificación vulgar. Las impresiones subjetivas de tiempo son claramente más que sólo una medida del ritmo de actividad cerebral, como prueban los experimentos del psicólogo de Filadelfia Stuart Albert. Éste encerró a voluntarios en una habitación en la que el reloj de la pared había sido alterado manualmente para que funcionase o bien a doble velocidad o bien a media velocidad, sin informar a los sujetos.¹³ Sorprendentemente, éstos fueron completamente inconscientes del engaño; sus funciones mentales se adaptaban automáticamente al paso acelerado o retardado. Por ejemplo, se probó la memoria y se encontró que se desvanecía más rápidamente para sujetos en el grupo acelerado que en el grupo retardado. De forma análoga se corregían las estimaciones de los intervalos temporales, siendo reajustados hacia abajo por las personas «rápidas» y hacia arriba por las «lentas». Aunque nuestras funciones básicas mentales y fisiológicas están reguladas por nuestros relojes neurológicos y químicos razonablemente precisos, podría parecer que estos relojes no están muy estrechamente relacionados con la *consciencia* temporal como tal.

Creo que es más probable que nuestra experiencia consciente del tiempo esté asociada con un sentido de identidad personal —un concepto que evolucionó mucho más tarde que los ciclos biológicos y cognitivos más primitivos, junto con el lenguaje, el arte y la cultura. Es, entonces, muy sorprendente que esta noción compleja y sofisticada —el tiempo— se encontrara desempeñando un papel tan profundo en la descripción objetiva del universo físico. Las matemáticas y el tiempo son las dos grandes abstracciones que pusieron en marcha la ciencia tal como la conocemos. Ambas son productos del intelecto humano su-

perior. Resulta sorprendente que estos conceptos tan elaborados encontraran una aplicación tan fructífera para los procesos fundamentales de la naturaleza. Galileo, Newton y Einstein, todos escogieron el tiempo como el pilar conceptual central alrededor del cual construir una imagen científica de la realidad física, y pese a todo, cuando miramos en nuestras propias mentes para encontrar el fundamento de la experiencia temporal, aquél parece desvanecerse, dejando sólo misterio y paradoja.

El enigma de la sorprendente utilidad científica del tiempo ha sido elocuentemente expresado por el filósofo japonés Masanao Toda:

Nadie, aparentemente, puede afirmar que sabe lo que es el tiempo. De todas formas, existe ese valiente grupo de personas llamados físicos que utilizaron esta evasiva idea como uno de los ladrillos de su teoría y, milagrosamente, la teoría funcionó. Cuando una de las figuras dirigentes del clan, llamada Albert Einstein, pronunció quedamente su fórmula secreta que sonaba algo así como «Combinar el tiempo con el espacio de tal modo que nada pueda viajar más rápido que la velocidad de la luz, luego masa es igual a energía», visto y no visto, los átomos explotaron ruidosamente.

El tiempo de Einstein es claramente parte de la verdad. Pero ¿es toda la verdad? Toda, por ejemplo, piensa que no:

No hay duda de que los físicos tuvieron éxito en atrapar algún ingrediente importante del tiempo dentro de su cápsula etiquetada *t*, pero es igualmente cierto que no todo el tiempo ha sido capturado dentro de su cápsula. Nuestra intuición está gritando para decirnos que el tiempo es algo que fluye, a diferencia del tiempo físico que está congelado.¹⁴

La puerta trasera de nuestras mentes

El tiempo del reloj es nuestro banquero, nuestro recaudador de impuestos, nuestro inspector de policía; este tiempo interno es nuestra vida.

J. B. PRIESTLEY

El tiempo es el mediador entre lo posible y lo real.

G. J. WHITROW

Al apropiarse del tiempo, y al abstraerlo en un escueto parámetro matemático, los físicos le han privado de gran parte de su contenido original y humano. Los físicos dicen normalmente: «El nuestro es el tiempo *real*— y todo lo que realmente existe. La riqueza del tiempo psicológico humano deriva por completo de factores subjetivos y no está relacionada con las cualidades intrínsecas del

tiempo físico real», y luego van a su trabajo y a su vida diaria inmersos en las complejidades del tiempo humano como cualquier otro.

¿Deberíamos simplemente dejar de lado la experiencia humana del tiempo como un tema sólo para psicólogos? ¿No tiene ninguna relevancia el tiempo de un estado alterado de consciencia para el tiempo de Newton o Einstein? Nuestra impresión del flujo del tiempo, o la división del tiempo en pasado, presente y futuro, ¿no nos dice nada sobre cómo es el tiempo en oposición a cómo nos aparece simplemente a nosotros seres humanos confusos?

En tanto que físico, soy perfectamente consciente de cómo puede extraviarnos la intuición. Como señalé antes, la intuición sugiere que el Sol se mueve alrededor de la Tierra. Pero, como ser humano, encuentro imposible renunciar a la sensación de un tiempo que fluye y un momento presente que se mueve. Es algo tan básico en mi experiencia del mundo que siento rechazo frente a la afirmación de que es sólo una ilusión o una falsa percepción. Me parece que hay un aspecto del tiempo de gran importancia que hemos pasado por alto hasta ahora en nuestra descripción del universo físico.

En este malestar claramente no estoy solo. Muchos científicos han sugerido que debería haber algún proceso físico sutil que «hace que el tiempo fluya», o al menos aparente fluir. Los científicos se dividen en cuanto a si el proceso en cuestión es un proceso general que confiere un flujo del tiempo al universo como un todo, o es meramente algo singular restringido al cerebro humano que nos da una sensación del paso del tiempo. Prigogine, por ejemplo, pertenece al primer bando, y ha sugerido que las leyes tradicionales del movimiento de las partículas materiales, que son reversibles respecto al tiempo, son falsas y deberían ser reemplazadas con ligeras modificaciones que dan una direccionalidad temporal en el nivel más básico.¹⁵ En el segundo bando están físicos como Penrose que mantienen que la respuesta reside en la física cuántica y los aún misteriosos procesos del cerebro que acompañan los actos de observación del mundo.¹⁶

Esta búsqueda ansiosa de un «eslabón perdido» entre el tiempo subjetivo fluyente y el tiempo en bloque congelado de los físicos tiene una larga historia. Hemos visto cómo los filósofos griegos resaltaron la distinción entre *ser* —la cualidad de permanecer en existencia— y *devenir* —la cualidad de cambio o flujo en los sistemas físicos. En los años veinte, Eddington declaraba que nuestra impresión de devenir, de un tiempo fluyente, es tan poderosa y capital para nuestra experiencia que debe corresponder a *algo* en el mundo objetivo: «Si yo atrapo la noción de existencia porque yo mismo existo, yo atrapo la noción de devenir porque yo mismo devengo. Es el Yo más interno de todos el que es y *deviene*».¹⁷ Eddington sugería que experimentamos el tiempo de dos formas diferentes. La primera es por medio de nuestros sentidos, de la misma forma que percibimos relaciones espaciales. Pero hay además una segunda manera, una especie de «puerta trasera» secreta en nuestras mentes que nos capacita para sentir el tiempo directamente, profundamente dentro de nuestras almas:

Cuando cierro los ojos y me retiro a mi pensamiento interior, me siento *durar*. Yo no me siento *extenso*. Es este sentimiento del tiempo como algo que nos afecta, y no simplemente como existiendo en las relaciones de los sucesos externos, lo que es tan peculiarmente característico de él; el espacio, por el contrario, siempre es apreciado como algo externo.¹⁸

Más recientemente, Roger Penrose ha escrito también «sobre el tiempo interno» esencialmente de la misma forma que Eddington:

Creo que existen graves discrepancias entre lo que sentimos conscientemente, respecto al flujo del tiempo, y lo que nuestras (maravillosamente precisas) teorías afirman sobre la realidad del mundo físico. Seguramente estas discrepancias nos están diciendo algo profundo sobre la física que presumiblemente debe estar realmente subyacente en nuestras percepciones conscientes ...¹⁹

Así pues, el flujo del tiempo, tan básico para nuestra experiencia, pende como un misterio sorprendente. Algunos, como Jack Smart, lo barrerían bajo la alfombra, definiéndolo como un mal uso del habla, o simplemente eliminándolo como una ilusión. Aunque yo creo que Smart ha clarificado mucho el tema, a la postre me veo obligado a coincidir con Eddington y Penrose en que nos falta algo importante de la física del tiempo y nuestra percepción del mismo. No hay un «órgano del tiempo» obvio en nuestros cuerpos en el mismo sentido en que poseemos «órganos de la visión» y «órganos del sonido». Pese a todo *existe* un sentido interno del tiempo —una puerta trasera— profundamente enterrado dentro de la consciencia humana, íntimamente asociado con nuestro sentido de identidad personal y nuestra inamovible convicción de que el futuro está aún «abierto», capaz de ser moldeado por nuestras acciones voluntarias.

Resulta irónico que el tiempo de Einstein, que ha colocado al observador en un papel central, no haga previsión de la experiencia personal del flujo, o del sentido de pasado, presente y futuro. En este aspecto difiere poco del tiempo de Newton y Laplace. Como Laplace, Einstein era un determinista de corazón. Encontraba la física cuántica, con su incertidumbre e indeterminismo inherentes, completamente repugnante. No obstante, como señalé en el capítulo 1, un mundo determinista es un mundo en el que el futuro ya está contenido en el presente y nunca ocurrirá nada genuinamente nuevo. En un mundo semejante la división del tiempo en pasado, presente y futuro es un ejercicio absurdo, puesto que el estado del universo en un momento dado contiene toda la información sobre sus estados en momentos posteriores. El «despliegue» del futuro no es otra cosa que el desarrollo de la pura lógica a través de las leyes matemáticas de la dinámica. Como el propio Laplace comentaba en 1819, una superinteligencia con un conocimiento completo de un universo determinista no tendría ningún sentido del flujo del tiempo: «el futuro y el pasado estarían igualmente presentes ante sus ojos».²⁰ El tiempo de Einstein, pese a su limita-

da dependencia del observador, aún se adhiere al determinismo de Laplace, a una rígida cadena de causa y efecto, en la que el destino del mundo ha sido grabado a fuego en el tejido de la naturaleza desde el alba de la existencia.

Si identificamos la teoría de la relatividad de Einstein con la era moderna de la física, entonces afirmo que la física moderna no resolverá el enigma del tiempo. Pero la física *posmoderna* sí podría hacerlo. Hay dos áreas de investigación que parecen prometedoras. Una es la teoría del caos, la otra la mecánica cuántica. Ambas introducen un tipo de indeterminismo en la naturaleza. Un sistema caótico es un sistema que, aunque determinista en sentido matemático estricto, tiene de todas formas tanta sensibilidad frente a perturbaciones mínimas que impide las predicciones significativas a largo plazo. Las más mínimas perturbaciones se amplifican más y más hasta que destruyen la predecibilidad del sistema; su comportamiento es esencialmente aleatorio. La teoría del caos sugiere que muchos sistemas físicos son caóticos, pero algunos, como el cerebro humano, operan en «la frontera del caos», un régimen fascinante y mal entendido que combina la novedad y la apertura con la actuación ordenada, permitiendo al sistema explorar un rico repertorio de estados alternativos sin caer en la anarquía. Esto parece captar algunos elementos del libre albedrío humano.

La física cuántica, como la relatividad, también coloca al observador en un papel central, pero de un modo mucho más importante. El acto de observación en física cuántica sirve para concretar un estado físico que de otro modo sería borroso e incierto. Tal como he explicado, los estados cuánticos incluyen en general múltiples realidades fantasmas superpuestas. Más exactamente, estos mundos alternativos son *contendientes* para la realidad —valores esperados estadísticos más que universos físicos realmente existentes— mezclados en una amalgama sutil. En ausencia de observación, este cóctel de mundos superpuestos evoluciona como un todo, pero cuando *inspeccionamos* los sucesos en el dominio cuántico, vemos una sola realidad, concreta y específica, y no una superposición fantasmal de mundos. Este «colapso» de posibilidades múltiples, de expectativas estadísticas, en una única realidad sigue siendo uno de los grandes enigmas no resueltos de la física.

Muchos científicos se muestran inflexibles sobre el hecho de que la «concreción» de la realidad cuántica no tiene nada que ver con la mente, pero otros mantienen que el misterio del «colapso» y el misterio de la consciencia están íntimamente ligados. Eddington y Bondi, por ejemplo, y filósofos como Hans Reichenbach y Gerald Whitrow, han argumentado que el flujo del tiempo, o el fenómeno del «devenir», tiene sus raíces en este proceso de «colapso» cuántico. Así, según Hermann Bondi:

El flujo del tiempo no tiene importancia en la estructura lógicamente fija exigida por la teoría determinista, al ser el tiempo una mera coordenada. En una teoría con indeterminación, sin embargo, el paso del tiempo transforma las expectativas estadísticas en sucesos reales.²¹

Roger Penrose, John Eccles y otros han buscado una explicación para el flujo del tiempo en la actividad del propio cerebro humano, con la afirmación capital de que algunos procesos cerebrales son de una naturaleza irreduciblemente mecanocuántica. Aunque existe poca evidencia experimental firme en esta etapa para apoyar una teoría semejante, constituye de todas formas un camino de investigación fascinante.

Los intentos por explicar el flujo del tiempo utilizando la física, más que tratando de definirlo utilizando la filosofía, son probablemente los desarrollos contemporáneos más estimulantes en el estudio del tiempo. Elucidar el flujo misterioso ayudaría, más que cualquier cosa, a desvelar el más profundo de todos los enigmas científicos: la naturaleza del yo humano. Hasta que no tengamos una firme comprensión del flujo del tiempo, o una evidencia incontrovertible de que realmente es una ilusión, no sabremos quiénes somos, o qué parte estamos representando en el gran drama cósmico.

La revolución inacabada

¿Qué otra cosa ves tú
en la oscuridad y el abismo del tiempo?

WILLIAM SHAKESPEARE

Todavía no han visto ustedes nada.

RONALD REAGAN

David Deutsch comentó en cierta ocasión que la historia de la ciencia es la historia de la física secuestrando temas de la filosofía. La naturaleza del movimiento, la estructura del cosmos y la existencia de los átomos, por ejemplo, comenzaron como proposiciones puramente intelectuales discutidas por los filósofos griegos. Hoy forman parte de la corriente principal de la física. Incluso la geometría, que entonces se pensaba que pertenecía a un mundo puramente platónico de formas matemáticas idealizadas, llegó a ser una ciencia experimental con la teoría de la relatividad general. El tema de la consciencia puede ser el siguiente de la lista.

La naturaleza del tiempo fue uno de los temas centrales del pensamiento filosófico desde su origen y dominó el debate erudito durante siglos. Sin embargo, los misterios del tiempo se extienden mucho más allá de la filosofía, hacia la religión y la política, y eventualmente la ciencia, donde durante trescientos años el tiempo fue tratado simplemente como algo conceptualmente «dado», privado de sus aderezos subjetivos. En 1905, Einstein sacó el tiempo de la filosofía y lo colocó en el corazón de la física. De repente se convirtió en algo físico, sujeto a leyes y ecuaciones, susceptible de investigación experimental. Casi un siglo después, nuestra comprensión del tiempo ha avanzado enormemente, pese a que la revolución de Einstein era evidentemente sólo el principio. Aún nos queda un largo camino para resolver el enigma del tiempo.

De modo que ¿cuáles son las cuestiones principales sin respuesta en la historia de nunca acabar del tiempo? La siguiente es mi lista personal de los enigmas no resueltos que deben ser abordados (no en orden de importancia).

1. *Taquiones: ¿podemos descartarlos?*

La teoría de la relatividad especial ha sido verificada con una precisión sin precedentes, y parece inatacable. Pero los taquiones son un problema. Aunque están permitidos por la teoría, llevan con ellos todo tipo de propiedades indigeribles. A los físicos les gustaría descartarlos de una vez por todas, pero falta una prueba convincente de su no existencia. Mientras no construyamos una no podremos estar seguros de que no vaya a descubrirse un taquión repentinamente.

2. *Agujeros negros: ¿existen realmente?*

Indudablemente, la predicción más espectacular de la teoría de la relatividad general es el agujero negro, pero todavía esperamos una confirmación definitiva de que existen distorsiones del tiempo infinitas en el universo real. Los astrónomos están buscando con denuedo, y la evidencia a favor de los agujeros negros continúa acumulándose. Personalmente me sorprendería mucho que no existieran. Si existen, se plantean un montón de preguntas. ¿Hay realmente un final del tiempo —una singularidad— en el centro de todos los agujeros negros? ¿Pueden los agujeros negros formar túneles o puentes a otros universos, o incluso convertirse en agujeros de gusano que perforan nuestro universo? ¿Qué le sucede a la materia que cae en ellos? ¿Existen cosas como los agujeros blancos?

3. *Viaje en el tiempo: ¿sólo una fantasía?*

El estudio de espacio-tiempos exóticos que parecen permitir el viaje al pasado seguirá siendo un activo campo de investigación. Hasta ahora, la laguna en las leyes conocidas de la física que permite el viaje en el tiempo es realmente muy pequeña. No se conocen escenarios realistas de viaje en el tiempo en el momento de escribir este libro. Pero, como sucede con los taquiones, en ausencia de una prueba de no existencia, la posibilidad tiene que seguir en la agenda. Mientras lo haga, las paradojas nos atormentarán.

4. Cuestiones cuánticas

El mundo cuántico es un país de las maravillas de extrañas y perplejas bromas temporales. El tiempo juega un papel muy básico en física cuántica, pero entra en la teoría de un modo único que lo discrimina para un tratamiento especial —y un enigma especial. La relatividad del tiempo no encaja fácilmente en la imagen cuántica de un mundo en donde las transiciones, y la «concreción» o «colapso» asociado con las medidas, ocurren aparentemente de forma abrupta, en instantes específicos. Los problemas llegan cuando los estados cuánticos se enmarañan en regiones espaciales extensas y se hacen observaciones simultáneas. La medida del propio tiempo está llena de problemas, puesto que los relojes son objetos físicos sujetos a la borrosidad cuántica.

5. ¿Es el tiempo sólo una reliquia?

Las dificultades son especialmente agudas cuando hay que aplicar la mecánica cuántica a la gravitación, pues entonces el propio continuo espacio-temporal está sujeto a la borrosidad cuántica. Los expertos están divididos acerca de la necesidad de fijar una especie de tiempo «maestro», una medida natural de cambio en un mundo físicamente incierto, o dejar el tiempo totalmente al margen de la existencia. El misterio del tiempo que desaparece sugiere a algunos que el tiempo está destinado a ser abandonado como una entidad física fundamental, una propuesta que a otros les parece escandalosa y absurda. ¿Podría ser que, después de milenios de deliberación sobre el tiempo, descubramos finalmente que realmente no existe como un ingrediente básico de la realidad, sino que es simplemente alguna propiedad aproximada de un estado cuántico particular que ha quedado a partir del big bang?

6. El origen del tiempo

La teoría de moda de que el tiempo se originó con el big bang es probablemente el punto más sobresaliente, y plantea todo tipo de preguntas (quizá sin respuesta) respecto a la causalidad, Dios y la eternidad. Si el tiempo existía antes del big bang, tenemos que explicar qué procesos físicos antecedieron a este suceso espectacular y violento, y cómo fue causado. Si el universo ha existido siempre, también entramos en problemas mayores sobre la flecha del tiempo. Si, por el contrario, el tiempo realmente «se puso en marcha» en el big bang, quizá como resultado de procesos cuánticos, entonces nos enfrentamos a problemas igualmente importantes. Si el proceso fue único, ¿puede considerarse natural en algún sentido (en oposición a sobrenatural)? Si no fue único, y los espacio-tiempos pueden originarse por la fuerza, ¿estamos obligados a creer en una infinidad de universos y una infinidad de tiempos?

7. *La edad del universo*

El espinoso problema de la edad del universo está siempre a la orden del día. Tomadas al pie de la letra, las medidas del ritmo de expansión del universo y los resultados de COBE, combinados con hipótesis realistas sobre la materia oscura, conducen a la absurda conclusión de que existen objetos en el espacio más viejos que el universo. Si es así, toda la teoría del big bang es sospechosa. Con un poco de amaño y ajuste, el problema ha sido barrido bajo la alfombra, puesto que las observaciones son todavía muy imprecisas. Sin embargo, todo eso va a cambiar. Con el telescopio Hubble ahora completamente operativo no debería pasar demasiado tiempo antes de que tengamos una cifra mucho mejor para la constante de Hubble (el ritmo de expansión actual). Si el valor resulta estar por encima de 70, entonces tenemos un problema real. ¡Mantengámonos a la espera de nuevos informes!

8. *El término cosmológico: ¿patinazo o triunfo?*

Por desagradable que muchos científicos encuentren el término cosmológico en las ecuaciones de Einstein, no hay ninguna razón conocida para descartarlo. Si las observaciones por venir confirman la dificultad de la escala del tiempo, entonces el mayor error de Einstein proporcionaría una forma espectacular y a la medida para retener la teoría del big bang. Si no es necesario para este propósito, esto no prueba su no existencia. El «problema de la constante cosmológica» (¿es cero y, si lo es, por qué?) aún tendrá que ser resuelto.

9. *¿Más allá de la teoría estándar?*

Pocos físicos creen que la teoría de la relatividad general de Einstein sea la última palabra sobre el tiempo. Aparte de los problemas de combinarla con la mecánica cuántica, existen dudas de que siga aplicándose hasta las singularidades espacio-temporales, o en circunstancias exóticas donde amenazan los lazos temporales. La verificación superaproximada de la teoría utilizando tecnología de relojes en continua mejora es probablemente la mejor manera de probar sus límites. En particular, debe ser puesta a prueba la posibilidad de que exista más de una escala de tiempo. Si hay una multiplicidad de tiempos, entonces las implicaciones para la cosmología y el problema de la edad del universo son profundas.

10. *La flecha del tiempo*

El misterio de la flecha del tiempo es el problema más viejo de la ciencia concerniente a la naturaleza del tiempo, antecediendo incluso a la teoría de la relatividad. Está íntimamente relacionado con la cuestión del origen y posible final del universo. La mayoría de los científicos están de acuerdo en que la fuente de la asimetría —es decir, la direccionalidad del tiempo— puede remontarse en última instancia a la cosmología y el comportamiento del universo a gran escala, pero la naturaleza exacta de la relación permanece oscura y controvertida. La teoría de que puedan existir regiones espacio-temporales donde el tiempo «corre hacia atrás», o que el universo entero pueda ser temporalmente simétrico o incluso cíclico en el tiempo, aún es popular en algunos círculos. Hay mucho lugar para investigación adicional —y desacuerdo.

11. *Violación de la simetría temporal*

El descubrimiento de que los kaones rompen la simetría de inversión temporal ha originado muchas investigaciones sobre la violación de T en otras áreas de la física de partículas, sin éxito hasta ahora. La búsqueda de momentos dipolares eléctricos en el neutrón y en diversas moléculas promete clarificar el enigma de cómo se viola la simetría pasado-futuro, y qué relación puede tener con la flecha del tiempo en cosmología.

12. *El flujo del tiempo: ¿mente o materia?*

En mi opinión, el enigma más extraordinario se refiere al clamoroso desajuste entre el tiempo físico y el tiempo subjetivo o psicológico. Los experimentos sobre la percepción del tiempo humano están en su infancia: tenemos mucho que aprender sobre la forma en que el cerebro se representa el tiempo, y de cómo eso se relaciona con nuestro sentido del libre albedrío. La impresión abrumadora de un tiempo móvil y fluyente, quizá adquirida a través de una «puerta trasera» mental, es un misterio muy profundo. ¿Está relacionado con procesos cuánticos en el cerebro? ¿Refleja una cantidad de tiempo objetivamente real «ahí fuera» en el mundo de los objetos materiales que hemos pasado por alto? ¿O se demostrará que el flujo del tiempo es por completo un constructo mental —una ilusión o una confusión— después de todo?

Mi opinión personal es que nos estamos acercando a un momento crucial en la historia, en el que nuestro conocimiento del tiempo va a dar otro gran salto hacia adelante. Einstein nos dejó un legado importante. Nos demostró que el tiempo es parte del mundo físico, y nos dio una soberbia teoría que en-

treteje el tiempo con el espacio y la materia. A lo largo del siglo xx los científicos han explorado diligentemente las consecuencias del tiempo de Einstein, tanto teórica como experimentalmente. Al hacerlo han desenterrado algunas posibilidades perturbadoras y extrañas, muchas de las cuales han resultado ser ciertas. Aunque también han encontrado graves obstáculos para una completa comprensión del tiempo, indicando que la revolución de Einstein sigue estando inacabada. Creo que su compleción será un reto fundamental para la ciencia del siglo xxi.

●

Epílogo

... el mayor científico de los tiempos modernos.

The Times de Londres, 21 de abril de 1955

Albert Einstein murió el 18 de abril de 1955. Hacía diez años que su salud se estaba deteriorando, y una operación exploratoria en 1948 había revelado un gran aneurisma en la aorta, que le producía periodos de dolores abdominales agudos. Pasó los años de posguerra en el Instituto para Estudio Avanzado en Princeton, viviendo y trabajando en una relativa reclusión. Las fotografías le muestran con un aspecto ligeramente triste y cansado. Aunque era una figura familiar en Princeton, poco a poco se fue distanciando de sus colegas científicos. Mostraba poco interés por los excitantes descubrimientos en física de partículas que caracterizaron los primeros años cincuenta, y permaneció implacablemente opuesto a la mecánica cuántica. Su gran preocupación era la formulación de una teoría de campo unificada que combinara las diversas fuerzas fundamentales en un solo esquema matemático, y eliminara la apariencia de indeterminación de la naturaleza.

Einstein mantuvo su interés por el sionismo y la política mundial hasta el final. En 1952 se le ofreció formalmente la presidencia del estado de Israel por parte de Ben-Gurion, pero la rechazó basándose en una falta de capacidades adecuadas. Su pacifismo durante toda la vida y su aversión por la construcción de la bomba atómica le hicieron un luchador incansable por la abolición de las armas nucleares y por el acercamiento a la Unión Soviética.

Einstein nunca tuvo mucho éxito en sus relaciones personales. Permaneció alejado de su primera mujer y raramente vio a sus hijos. Aunque estaba más próximo a su segunda mujer, Elsa, y a sus dos hijas, cuando Elsa murió en 1936 Einstein no pareció demasiado afectado. De hecho, dijo con cierta dureza que se sentía «más en casa» una vez que ella había desaparecido. Le dio la oportunidad de concentrarse en su trabajo, y redobló sus esfuerzos para encon-

trar una teoría de campo unificado. Su primera mujer, Mileva, murió en 1948.

Después de la muerte de Elsa, la familia de Einstein en Princeton consistía en su hermana, que murió en 1951, su hijastra y su secretaria de confianza, Helen Dukas. Cuando el anciano científico se derrumbó en su casa el 12 de abril de 1955, fue Helen quien le atendió en la crisis. El aneurisma de aorta se había roto y varios días de hospitalización no pudieron contener una grave hemorragia. La muerte fue inevitable. Durante medio siglo, el científico más influyente de la humanidad había encandilado al mundo con su deslumbrante intelecto. Ahora ese capítulo de la historia estaba a punto de cerrarse. El hombre que había mostrado al mundo cómo puede dilatarse el tiempo, había salido finalmente de él.

●

Notas

Prólogo (pp. 13-19)

1. *Confessions* de san Agustín, trad. R. S. Pine-Coffin, Penguin, Baltimore, 1961, 11:14, p. 294 (hay varias ediciones en castellano. En este libro hemos seguido fundamentalmente: *Confesiones*, Alianza Editorial, Madrid, 1990).

1. *Una historia muy breve del tiempo* (pp. 21-43)

1. *The Roman Poet of Science Lucretius: De Rerum Natura*, versificado en inglés por A. D. Winspear, Harbor Press, Nueva York, 1956, p. 22 (hay varias ediciones en castellano de la obra de Lucrecio. En este libro hemos seguido la clásica versión del abate Marchena: *De la naturaleza de las cosas*, Cátedra, Madrid, 1983).

2. *The Book of Angelus Silesius*, F. Franck, trad., Vintage Books, Nueva York, 1976, p. 45.

3. *Ibid.*, p. 42.

4. *The Works of Plato*, B. Jowett, Oxford University Press, Oxford, 3ª ed. 1892, vol. 3, p. 456.

5. San Agustín, *Confessions*, 11:13, p. 263.

6. E. W. Barnes, *Scientific Theory and Religion*, Cambridge University Press, Cambridge, 1933, p. 260.

7. Lama Anagarika Govinda, *Foundations of Tibetan Mysticism*, Samuel Weiser, Nueva York, 1969, p. 116.

8. «Metaphysics of Time in Indian Philosophy and Its Relevance to Particle Science» de R. Reyna, en J. Zeaman, ed., *Time in Science and Philosophy*, Academia, Prague, 1971, p. 238.

9. *Ibid.*, pp. 233-234.

10. «The Dreaming» de W. E. H. Stanner, en W. H. Edwards, ed., *Traditional Aboriginal Society*, Macmillan, Melbourne, 1987, p. 225.

11. J. B. Priestley, *Man and Time*, Aldus Books, Londres, 1964, p. 225 (hay traducción castellana: *El hombre y el tiempo*, Aguilar, Madrid, 1969).

12. M. Eliade, *The Myth of the Eternal Return*, W. R. Trask, trad., Pantheon Books, Nueva York, 1954, p. ix (hay traducción castellana: *El mito del eterno retorno*, Alianza Editorial, Madrid, 1989).

13. *Ibid.*, p. 34.

14. «Evolution, Myth and Poetic Vision» de W. J. Ong, en P. T. Landsberg, ed., *The Enigma of Time*, Adam Hilger, Bristol, 1982, p. 220.

15. H. Quill, *John Harrison: The Man Who Found Longitude*, John Baker Publishers, Londres, 1966, p. 6.

16. I. Newton, *The Mathematical Principles of Natural Philosophy*, A. Motte, trad., University of California Press, Berkeley, 1962, vol. 1, p. 7 (hay edición castellana: *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Alianza Editorial, Madrid, 1988).

17. «The Rediscovery of Time» de I. Prigogine, en S. Nash, ed., *Science and Complexity*, Science Reviews, Northwood, Middlesex, 1985, p. 11.

18. C. Darwin, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*, John Murray, Londres, 2ª ed. 1860, p. 486 (hay edición castellana: *El origen de las especies*, Espasa-Calpe, Madrid, 1988).

19. *Eternal Recurrence* de F. Nietzsche, en O. Levy, ed., *The Complete Works of Friedrich Nietzsche*, G. T. Foulis, Edimburgo, 1910.

20. Filón en *Quod Deus Immutabilis Sit* 6:32, L. Cohn y P. Wendland, eds., Macmillan, Londres, 1896, vol. 2, p. 63.

21. *October the First Is Too Late*, F. Hoyle, Heinemann, Londres, 1966, pp. 75-82.

2. *Tiempo de cambio* (pp. 44-79)

1. «On the Electrodynamics of Moving Bodies» de A. Einstein, reimpresso en inglés en A. P. French, ed., *Einstein: A Centenary Volume*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1979, p. 281.

2. Citado por I. Rosenthal-Schneider, *Reality and Scientific Truth*, Wayne State University Press, Detroit, 1980, p. 74.

3. Citado por A. Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 1982, p. 139 (hay traducción castellana: *El Señor es sutil*, Ariel, Barcelona, 1984).

4. H. Dingle, *Science at the Crossroads*, Martin Brian & O'Keefe, Londres, 1972), p. 143.

5. *Ibid.*, p. 17.

6. *Ibid.*

7. *Ibid.*

8. Citado por A. A. Mendilow, *Time and the Novel*, Peter Nevill, Nueva York, 1952, p. 72.

9. A. Schopenhauer, *Parerga and Paralipomena: Short Philosophical Essays*, E. F. J. Payne, trad., Clarendon Press, Oxford, 1974, p. 283.

10. San Agustín, *Confessions*, R. S. Pine-Coffin, trad., Penguin, Baltimore, 1961, p. 253.

11. Citado por R. Skinner, *Relativity for Scientists and Engineers*, Dover, Nueva York, 1982, p. 27.

12. W. Blake, *Jerusalem*, 15:6.

13. T. S. Eliot, «Burnt Norton», en *Collected Poems 1909-1962*, Faber Faber, Londres, 4ª ed. 1963, p. 194 (hay traducción castellana: *Poesías reunidas 1909-1962*, Alianza Editorial, Madrid, 1985).

14. Citado por Pais, *Subtle Is the Lord*, p. 152.
15. C. H. Hinton, «What Is the Fourth Dimension?» en *Scientific Romances*, Swan Sonnenschein, Londres, 1884, p. 34.
16. *Ibid.*
17. H. Weyl, *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton University Press, Princeton, 1949, p. 122.
18. Eliot, «Burnt Norton», p. 189.
19. Weyl, *Philosophy of Mathematics*, p. 166.
20. Citado en *The Philosophy of Rudolf Carnap*, P. A. Schilpp, ed., Open Court, La Salle, Ill., 1963, p. 37.

3. *Distorsiones del tiempo* (pp. 80-106)

1. «On the Electrodynamics of Moving Bodies» de A. Einstein, reimpresso en inglés en A. P. French, ed., *Einstein: A Centenary Volume*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1979, p. 292.
2. R. A. Ford, *The Perpetual Motion Mystery: A Continuing Quest*, Lindsay Publications, Bradley, Ill, 1987, p. 41.
3. Citado por J. R. Brown, *The Laboratory of the Mind*, Routledge, Londres, 1991, cap. 5.
4. Citado por A. Pais, *Subtle Is the Lord; The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 1982, p. 448.

4. *Agujeros negros: puertas al fin del tiempo* (pp. 107-129)

1. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Londres*, vol. 74 (1784), p. 35.
2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 80 (1920), p. 96.
3. Citado por J. Winokur, *The Portable Curmudgeon*, NAL Books, Nueva York, 1987, p. 157.
4. «Dark Stars: The Evolution of an Idea» de W. Israel, en S. W. Hawking y W. Israel, eds., *300 Years of Gravitation*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987, p. 206.
5. A. Einstein, «On a Stationary System with Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses», *Annals of Mathematics*, vol. 40 (1939), p. 922.
6. A. S. Eddington, *Space, Time and Gravitation*, Cambridge University Press, Cambridge, 1920, p. 98.
7. *Physical Review*, vol. 56 (1939), p. 455.
8. Israel, «Dark Stars», p. 231.
9. L. Landau y E. M. Lifshitz, *Statistical Physics*, E. y Ra. F. Peierls, trads., Pergamon, Londres, 1958, p. 343 (hay traducción castellana de la segunda edición rusa: *Física Estadística*, Reverté, Barcelona, 1969).
10. *Philosophical Magazine*, vol. 39 (1920), p. 626.
11. K. S. Thorne, *Black Holes and Time Warps*, Norton, Nueva York, 1994, p. 255 (hay traducción castellana: *Agujeros negros y tiempo curvo*, Crítica, Barcelona, 1995).
12. *Ibid.*, p. 239.

5. *El comienzo del tiempo: ¿cuándo fue exactamente?* (pp. 130-150)

1. San Agustín, «On the Beginning of Time», en *The City of God*, H. Bettenson, trad., Penguin, Harmondsworth, 1972 (hay varias ediciones en castellano. La más reciente es la edición bilingüe: *La ciudad de Dios*, CSIC, Madrid, 1992).
2. H. Bondi, *Cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1952, p. 165.
3. Citado por Michael White y John Gribbin, *Einstein: A Life in Science*, Simon & Schuster, Londres, 1993, p. 203.
4. «Personal Recollections: Some Lessons for the Future» de W. McCrea, en R. Bertotti, R. Balbinot, S. Bergia y A. Messina, eds., *Modern Cosmology in Retrospect*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990, p. 207.

6. *¿El mayor triunfo de Einstein?* (pp. 151-168)

1. Véase «Dark Matter» de J. Trefil en *Smithsonian* (junio de 1993), p. 27.
2. «The Extragalactic Universe: an Alternate View», de H. C. Arp, G. Burbidge, F. Hoyle y N. C. Wickramasinghe, en *Nature*, vol. 346 (1990), p. 810.
3. «The Cosmological Constant» de S. W. Hawking, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Londres, A, vol. 310 (1983), p. 303.
4. S. Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, Random House, Nueva York, 1992, p. 224 (hay traducción castellana: *El sueño de una teoría final*, Crítica, Barcelona, 1993).

7. *El tiempo cuántico* (pp. 169-188)

1. «Quantum Optical Tests of Complementarity» de M. O. Scully, B. G. Englert y H. Walter, en *Nature*, vol. 351 (1991), p. 111.
2. «Observation of a “Quantum Eraser”: a Revival of Coherence in a Two-Photon Interference Experiment» de P. G. Kwiat, A. M. Steinberg y R. Y. Chiao, en *Physical Review A*, vol. 45 (1992), p. 7729.
3. «Induced Coherence and Indistinguishability in Optical Interference» de X. Y. Zhou, L. J. Wang y L. Mandel, en *Physical Review Letters*, vol. 67 (1991), p. 318.
4. «Faster Than Light?» de R. Y. Chiao, P. G. Kwiat y A. M. Steinberg, *Scientific American* (agosto de 1993), p. 38 (hay traducción castellana en *Investigación y Ciencia*, octubre de 1993).
5. «God, Time and the Creation of the Universe» de C. Isham, en E. Winder, ed., *Explorations in Science and Theology*, RSA, Londres, 1993, p. 58.

8. *El tiempo imaginario* (pp. 189-201)

1. *Correspondence* de Leibniz-Clarke, Leibniz's 4th paper, sect. 15 (hay una edición castellana de la *Correspondencia Leibniz-Clarke*, a cargo de Eloy Rada, Taurus, Madrid, 1980).
2. Para una discusión sobre las antinomias de Kant, véase J. D. North, *The Measure of the Universe*, Clarendon Press, Oxford, 1965, pp. 390-391.

3. F. Tipler, Doubleday, *The Physics of Immortality*, Nueva York, 1994 (hay traducción castellana: *La física de la inmortalidad*, Alianza Editorial, Madrid, 1996).

4. «Time Without End: Physics and Biology in an Open Universe» de F. Dyson, *Reviews of Modern Physics*, vol. 51 (1979), p. 447.

9. *La flecha del tiempo* (pp. 202-225)

1. W. Ritz y A. Einstein, en *Physikalische Zeitschrift*, vol. 10 (1909), p. 323.

2. «Interaction with the Absorber as the Mechanism of Radiation» de J. A. Wheeler y R. P. Feynman, *Reviews of Modern Physics*, vol. 17 (1945), p. 157.

3. «Absorber Theory of Radiation and the Future of the Universe» de R. B. Partridge, *Nature* vol. 244 (1973), p. 263.

4. «Causality and Faster Than Light Particles» de P. L. Csonka, *Nuclear Physics B*, vol. 21 (1970), p. 436.

5. P. J. Nahin, *Time Machines*, American Institute of Physics, Nueva York, 1993, p. 225.

6. «Can Time Go Backward?» de M. Gardner, *Scientific American*, vol. 216, n.º 1 (1967), p. 6.

7. H. Berlioz, *Almanach des Lettres Françaises et Étrangères*, reimpresso en *Larousse des Citations Françaises et Étrangères*, Larousse, París, 1976, p. 68.

8. «CP and CPT Symmetry Violation, Entropy and the Expanding Universe» de Y. Ne'eman, en *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 3 (1970), p. 1.

10. *Hacia atrás en el tiempo* (pp. 226-240)

1. Platón, *The Sophist and The Statesman*, A. E. Taylor, ed., Nelson, Londres, 1961, p. 277.

2. «The Arrow of Time» de T. Gold en S. T. Butler y H. Messel, eds., *Time*, Shakespeare Head Press Proprietary, Sydney, 1965, p. 159.

3. *Ibid.*, p. 161.

4. «Can Time Go Backward?» de M. Gardner, *Scientific American*, vol. 216, n.º 1 (1967), p. 2.

5. N. Wiener, *Cybernetics*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1948, p. 45 (hay traducción castellana: *Cibernética*, Tusquets, Barcelona, 1985).

6. «Time Symmetric Electrodynamics and the Arrow of Time» de F. Hoyle y J. V. Narlikar, *Proceedings of the Royal Society*, Londres, A, vol. 277 (1964), p. 1.

7. «The No-Boundary Condition and the Arrow of Time» de S. Hawking, en J. J. Halliwell, J. Pérez-Mercader y W. H. Zurek, eds., *The Physical Origins of Time Asymmetry*, Cambridge University Press, Cambridge, 1994, p. 346.

8. «Cosmology, Time's Arrow, and That Old Double Standard» de H. Price, en S. Savitt, ed., *Time's Arrows Today*, Cambridge University Press, Cambridge, 1994.

11. *Viajes en el tiempo: ¿realidad o fantasía?* (pp. 241-260)

1. A. S. Eddington, *The Nature of the Physical World*, Cambridge University Press, Cambridge, 1929, pp. 57-58 (hay traducción castellana: *La naturaleza del mundo físico*, Editorial Sudamericana, Buenos Aires, 1945).
2. «An Example of a New Type of cosmological Solution of Einstein's Field Equations of Gravitation» de K. Gödel, en *Reviews of Modern Physics*, vol. 21 (1949), p. 447.
3. Citado en *ibid.*
4. «Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics» de R. Kerr, en *Physical Review Letters*, vol. 11 (1963), p. 237.
5. «Rotating Cylinders and the Possibility of Global Causality Violation» de F. J. Tipler, en *Physical Review D*, vol. 9 (1974), p. 2.203.
6. C. Sagan, *Contact*, Simon & Schuster, Nueva York, 1985 (hay traducción castellana: *Contacto*, Plaza y Janés, Barcelona, 1987).
7. K. S. Thorne, *Black Holes and Time Warps*, Norton, Nueva York, 1994 (hay traducción castellana: *Agujeros negros y tiempo curvo*, Crítica, Barcelona, 1995).
8. «Closed Timelike Curves Produced by Pairs of Moving Cosmic Strings: Exact Solutions» de J. R. Gott III, en *Physical Review Letters*, vol. 66 (1991), p. 1.126.
9. «Quantum Mechanics and Closed Timelike Lines» de D. Deutsch, en *Physical Review D*, vol. 44 (1991), p. 3.197.
10. «Chronology Protection Conjecture» de S. W. Hawking, en *ibid.*, vol. 46 (1992), p. 603.
11. H. G. Wells, *The Time Machine*, Heinemann, Londres, 1895, p. 151 (hay traducción castellana: *La máquina del tiempo*, Anaya, Madrid, 1989).

12. *¿Pero qué hora es «ahora»?* (pp. 261-273)

1. «Time and Becoming» de J. J. C. Smart, en P. van Inwagen, ed., *Time and Cause*, Reidel, Dordrecht, 1980, pp. 3-15.
2. «The Unreality of Time» de J. E. McTaggart en *Mind*, vol. 17 (1908), p. 457.
3. J. W. Dunne, *An Experiment with Time*, Faber & Faber, Londres, 1927.
4. «The Myth of the Passage of Time» de D. Park, *Studium Generale*, vol. 24 (1971), p. 20.
5. «Dirac's Cosmology and Mach's Principle» de R. H. Dicke, en *Nature*, vol. 192 (1961), p. 440.
6. «The Anthropic Principle and Its Implications for Biological Evolution» de B. Carter, *Philosophical Transactions of the Royal Society of Londres A*, vol. 310 (1983), p. 347.
7. «Time and the Anthropic Principle» de J. Leslie, *Mind*, vol. 101 (1992), p. 403.

13. *Experimentar con el tiempo* (pp. 274-288)

1. M. Holub, *The Dimension of the Present Moment and Other Essays*, David Young, ed., Faber & Faber, Londres, 1990, p. 6.
2. Para una descripción completa, véase, por ejemplo, *Consciousness Explained* de

- D. C. Dennett, Little, Brown, Londres, 1991, caps. 5 y 6 (hay traducción castellana: *La conciencia explicada: una teoría interdisciplinar*, Paidós, Barcelona, 1995).
3. N. Goodman, *Ways of Worldmaking*, Harvester, Sussex, 1983, pp. 73-74 (hay traducción castellana: *Maneras de hacer mundos*, Visor, Madrid, 1990).
4. Dennett, *Consciousness Explained*, p. 115.
5. *Ibid.*, p. 127.
6. «Subjective Referral of the Timing for a Conscious Sensory Experience» de B. Libet, E. W. Wright, Jr., B. Feinstein y D. K. Pearl, *Brain*, vol. 102 (1979), p. 193.
7. «Voluntary Finger Movements in Man: Cerebral Potentials and Theory» de L. Deeke, B. Grotzinger y H. H. Kornhuber, *Biological Cybernetics*, vol. 23 (1976), p. 99.
8. K. Popper y J. Eccles, *The Self and Its Brain*, Springer International, Nueva York, 1977 (hay traducción castellana: *El yo y su cerebro*, Labor, Barcelona, 1993).
9. R. Penrose, *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, Oxford, 1989 (hay traducción castellana: *La nueva mente del emperador*, Mondadori, Madrid, 1991).
10. Dennett, *Consciousness Explained*, caps. 5 y 6.
11. S. J. Gould, *The Panda's Thumb*, Norton, Nueva York, 1992, p. 251 (hay traducción castellana: *El pulgar del panda*, Crítica, Barcelona, 1994).
12. R. Foreword, *Dragon's Egg*, Ballantine, Nueva York, 1980.
13. «Subjective Time» de S. Albert en J. T. Fraser, N. Lawrence y D. Park, eds., *The Study of Time III*, Springer-Verlag, Nueva York, 1978, p. 269.
14. «Time and the Structure of Human Cognition» de M. Toda, en J. T. Fraser y N. Lawrence, eds., *The Study of Time II*, Springer-Verlag, Berlín, 1975, p. 314.
15. I. Prigogine, *From Being to Becoming*, Freeman, San Francisco, 1980.
16. Penrose, *The Emperor's New Mind*.
17. A. S. Eddington, *The Nature of the Physical World*, Cambridge University Press, Cambridge, 1929, p. 97.
18. *Ibid.*, p. 51.
19. Penrose, *The Emperor's New Mind*, p. 304.
20. P. S. Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities*, Dover, Nueva York, 1951, p. 4 (publicación original, 1819) (hay traducción castellana: *Ensayo filosófico sobre las probabilidades*, Alianza Editorial, Madrid, 1985).
21. «Relativity and Indeterminacy» de H. Bondi, *Nature*, vol. 169 (1952), p. 660.

Bibliografía

- Aveni, A., *Empires of Time*, Basic Books, Nueva York, 1989.
- Barrow, J., y F. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford, 1986.
- Capek, M., ed., *The Concepts of Space and Time*, Reidel, Dordrecht, 1976.
- Clark, R., *Einstein: The Life and Times*, Hodder & Stoughton, Londres, 1973.
- Coveney, P., y R. Highfield, *The Arrow of Time*, W. H. Allen, Londres, 1990.
- Davies, P. C. W., *The Physics of Time Asymmetry*, University of California Press, Berkeley y Los Ángeles, 1974.
- , *The Mind of God*, Simon & Schuster, Nueva York, 1991 (hay traducción castellana: *La mente de Dios*, McGraw-Hill, Madrid, 1994).
- , *The Edge of Infinity*, ed. rev., Penguin, Londres, 1994 (hay traducción castellana: *La frontera del infinito*, Salvat, Barcelona, 1994⁴).
- , *The Last Three Minutes*, Basic Books, Nueva York, 1994.
- Eliade, M., *The Myth of the Eternal Return*, Routledge & Kegan Paul, Londres, 1955 (hay traducción castellana: *El mito del eterno retorno*, Alianza Editorial, Madrid, 1989).
- Flood, R., y M. Lockwood, *The Nature of Time*, Basil Blackwell, Oxford, 1986.
- Fraser, J. T., *The Genesis and Evolution of Time*, University of Massachusetts Press, Amherst, 1982 (hay traducción castellana: *Génesis y evolución del tiempo*, Pamiela, Pamplona, 1993).
- , *Time: The Familiar Stranger*, Tempus, Washington, D.C., 1987.
- , ed., *The Voices of Time*, Brazillier, Nueva York, 1966.
- French, A. P., *Einstein: A Centenary Volume*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1979.
- Gale, R. M., ed., *The Philosophy of Time*, Londres, 1968.
- Gold, T., ed., *The Nature of Time*, Cornell University Press, Ithaca, N.Y., 1967.
- Gould, S. J., *Time's Arrow, Time's Cycle*, Penguin, Harmondsworth, 1988 (hay traducción castellana: *La flecha del tiempo: mitos y metáforas en el descubrimiento del tiempo geológico*, Alianza, Madrid, 1992).
- Gribbin, J., *Timewarps*, Delacorte, Nueva York, 1979.
- Grunbaum, A., *Philosophical Problems in Space and Time*, Knopf, Nueva York, 1963.
- Halliwel, J. J., J. Pérez-Mercader y W. H. Zurek, eds., *The Physical Origins of Time Asymmetry*, Cambridge University Press, Cambridge, 1994.

- Hawking, S. W., *A Brief History of Time*, Bantam, Nueva York, 1988 (hay traducción castellana: *Historia del tiempo*, Crítica, Barcelona, 1989).
- Highfield, R., y P. Carter, *The Private Lives of Albert Einstein*, Faber & Faber, Londres, 1993.
- Landsberg, P., ed., *The Enigma of Time*, Adam Hilger, Bristol, 1982.
- Leslie, J., «Testing the Domsday Argument», *Journal of Applied Philosophy*, vol. 11 (1994), p. 31.
- Luminet, J. P., *Black Holes*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992 (hay traducción castellana: *Agujeros negros*, Alianza Editorial, Madrid, 1991).
- Morris, R., *Time's Arrows*, Simon & Schuster, Nueva York, 1984 (hay traducción castellana: *Las flechas del tiempo*, Salvat Editores, Barcelona, 1986).
- Mowaljarlai, D., y J. Malnic, *Yorro Yorro: Spirit of the Kimberley*, Magabala Books, Broome, Australia, 1993.
- Nahin, P. J., *Time Machines*, American Institute of Physics, Nueva York, 1993.
- North, J. D., *The Measure of the Universe*, Clarendon Press, Oxford, 1965.
- Pais, A., *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 1982 (hay traducción castellana: *El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein*, Ariel, Barcelona, 1983).
- Penrose, R., *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, Oxford, 1989 (hay traducción castellana: *La nueva mente del emperador*, Mondadori, Madrid, 1991).
- Pike, N., *God and Timelessness*, Routledge & Kegan Paul, Londres, 1970.
- Priestley, J. B., *Man and Time*, Aldus Books, Londres, 1964 (hay traducción castellana: *El hombre y el tiempo*, Aguilar, Madrid, 1969).
- Prigogine, I., *From Being to Becoming*, Freeman, San Francisco, 1980.
- Pyenson, L., *The Young Einstein*, Adam Hilger, Bristol, 1985 (hay traducción castellana: *El joven Einstein*, Alianza Editorial, Madrid, 1990).
- Reichenbach, H., *The Direction of Time*, University of California Press, Berkeley, 1956.
- Sachs, R., *The Physics of Time Reversal*, University of Chicago Press, Chicago, 1987.
- Shallis, M., *On Time*, Schocken, Nueva York, 1983.
- Smart, J. J. C., ed., *Problems of Space and Time*, Macmillan, Nueva York, 1964.
- Thorne, K. S., *Black Holes and Time Warps*, Norton, Nueva York, 1994 (hay traducción castellana: *Agujeros negros y tiempo curvo*, Crítica, Barcelona, 1995).
- Tolman, R. C., *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*, Clarendon Press, Oxford, 1934.
- Wald, R. M., *Space, Time and Gravity*, University of Chicago Press, Chicago, 1977 (hay traducción castellana: *Espacio, tiempo y gravitación*, FCE, México, 1982).
- Wheeler, J. A., *Frontiers of Time*, North Holland, Amsterdam, 1979.
- White, M., y J. Gribbin, *Einstein: A Life in Science*, Simon & Schuster, Londres, Nueva York, 1993.
- Whitrow, G. J., *What Is Time?*, Thames and Hudson, Londres, 1972.
- , *The Natural Philosophy of Time*, Oxford University Press, Oxford, 2.^a ed., 1980.
- , *Time in History*, Oxford University Press, Oxford, 1989 (hay traducción castellana: *El tiempo en la historia*, Crítica, Barcelona, 1990).
- Will, C., *Was Einstein Right?*, Basic Books, Nueva York, 1986 (hay traducción castellana: *¿Tenía razón Einstein?*, Gedisa, Barcelona, 1987).
- Winfrey, A., *The Timing of Biological Clocks*, Freeman, San Francisco, 1987.
- Yates, J. C., *The Timelessness of God*, University Press of America, Lanham, Md., 1990.
- Zeh, H. D., *The Physical Basis of the Direction of Time*, Springer-Verlag, Berlín, 1989.

Índice alfabético*

- Abano, Petro d', 130
aborígenes australianos, 23, 26-27
abuela, paradoja de la, 257-258, 260
Academia Prusiana de Ciencias, 106, 108, 144
acción a distancia, 182
aceleración: en la teoría de la relatividad general, 105; y el movimiento uniforme, 48, 52, 60; y gravedad, 90, 93, 96
aceleradores de partículas, 59, 61, 127
Adams, Walter, 112
Addison, Joseph, 23
Adelaida, Universidad de, 169, 261
ADN, 258
Advaita Vedanta, 25-26
Agatón, 175
agujeros blancos, 224-225, 233, 290
agujeros de gusano, 253-257, 254, 255, 259-260, 290
agujeros negros, 107-129; antimundos y, 230-233; atractivo místico de, 107, 126; choque con estrellas de neutrones, 100; como el más allá del fin del tiempo, 123-126; como fuerza gravitatoria irresistible, 120; como materia oscura fría, 153; como verificación de la teoría de la relatividad general, 107; condiciones en el interior de, 119-120, 123-125, 136; cuestiones no respondidas sobre, 290; distorsión del tiempo infinita en, 107-108, 109, 110, 114, 115, 117, 124-125; en los sistemas de estrellas binarias, 47-48, 128; escepticismo científico sobre, 111, 112, 114, 115, 116-117, 125-127; investigación de, 126-129; observación de caída de objetos en, 121-123, 122; otros universos conectados por, 125; papel de los matemáticos en trabajos sobre, 117; primeras especulaciones científicas sobre, 111-112; rayos cósmicos desde, 84; término de, 107, 119-120, 123; y el efecto de los gemelos, 118-125, 122; y el viaje en el tiempo, 253; y la inclinación de los conos de luz, 249-250; y la simetría del tiempo, 224; y la velocidad de la luz, 121; véase también Schwarzschild, radio de
Agustín, san, 17, 24, 71, 136, 191, 192
«ahora»: percepción de las unidades más pequeñas del, 274-276; relatividad del, 67-68, 71, 72; y el flujo temporal, 267-273
Albert, Stuart, 283
Alemania nazi, 139, 143-144
Amis, Martin, 29, 264; *La flecha del tiempo*, 29
Anderson, A., 120
Andrómeda «M31», nebulosa, 134, 135
Angelus Silesius, 23
anillo de Einstein, 156-157, 157, 168
anisotropía dipolar, 132-133
Annalen der Physik, 47
Anselmo, san, 24
antigravedad cuántica, 256; véase también constante cosmológica
antimateria, 210-225; primera predicción y descubrimiento de, 210-211; y la inversión temporal, 211-214, 212, 213, 220-225, 222; véase también kaones
antimundos, 230-233, 235, 239, 252-253
antiquarks, 215, 217
antropico, principio, 268

* Los números en cursiva hacen referencia a las ilustraciones.

- Arecibo, radiotelescopio de, 45
 Aristóteles, 29, 97
 Arp, Halton, 154, 155-156, 162
 arrugas en el tiempo, 158
 Atkins, Peter, 202
 Australia: aborígenes de, 23, 26-27; como potencia espacial, 80-81; observación de rayos gamma en, 80-84
 Australia Occidental, Universidad, 100
 auto-organizativos, procesos, 36
 Aveni, Anthony: *Empires of Time*, 74
- Baade, Walter, 150
 Barnes, Ernest, 25
 Barrow, Isaac, 189
 «Bayes, regla de», 272
 Bell, Jocelyn, 107-108
 Ben-Gurion, David, 295
 Berkeley, Universidad de California en, 176, 178, 182, 184
 Berlín, 106, 143
 Berlioz, Hector, 220
 Berna, 47; Universidad de, 104
 Besso, Michele, 53, 78, 105
 beta, desintegración, 215
 Betty y Ann, véase gemelos, enigma de los
 big bang: como origen del tiempo, 18, 136, 192, 199, 291; como singularidad, 136, 193, 198; en los modelos cosmológicos en expansión, 142, 144; problemas de la escala de tiempo con, 18, 154-157; término de, 136; y el problema de la edad cósmica, 18-19, 136-139, 137, 292; y la asimetría entre materia y antimateria, 220; y la evolución de la vida, 269; y la simetría del tiempo, 223-224, 228, 237, 238, 239; y los rizos de la radiación de fondo, 132, 152-153, 158
 big crunch: como extremo temporal, 238; en los modelos cerrados del universo, 227-228, 228, 237; y la flecha del tiempo, 239
 binario, véase estrellas binarias, sistema de; pulsar binario
 Birmingham, Universidad de, 112
 Blair, David, 100; reloj de, 100-101
 Blake, William, 73
 Boecio, 24
 Bohm, David, 202, 204-205
 Bohr, Niels: sobre la gravedad y el tiempo, 93, 95, 98-99; y Bohm, 204; y el experimento mental de Einstein, 95, 97, 183; y Wheeler, 116
 Boltzmann, Ludwig, 37-38; sobre la teoría atómica de la materia, 37; teoría de la entropía de, 37-38, 207, 234; y la teoría del tiempo invertido, 233, 234; y Poincaré, 37, 38, 207
 bomba atómica, 57, 115, 251
 Bondi, Hermann, 21, 88, 89, 138-139, 287
 Bragg, sir Lawrence, 57-58
 Bragg, William Henry, 57
 Brahma, 25
 Brown, Robert, 47
 browniano, movimiento, 47, 233-234
 Buckland Park, 81-82
 budismo, 22, 23, 25
 Burbidge, Geoffrey, 131, 154
 Burke, Edmund, 233
- caída de cuerpos, experimento mental de Galileo sobre, 96-97, 96
 cálculo, 31
 calendario: gregoriano comparado con el juliano, 43
 calor: capacidad ilimitada del éter para, 15; y las máquinas de movimiento perpetuo, 87, 88; véase también flujo de calor
 Cambridge, 114, 148; Universidad de, 114, 148
 Campbell, Donald, 83
 campo eléctrico: dipolar, 221-223, 222; y los campos magnéticos, 49
 campo unificado, teoría de, 16, 163, 164, 252, 295
 campos magnéticos: dipolar, 221-223; y los campos eléctricos, 49
 CANGAROO (Colaboración entre Australia y Japón para Observaciones de Rayos Gamma en el Interior), 80-81, 83
 Canuto, Vittorio, 131, 148, 149
 caos, teoría del, 232, 233, 287
 carbono, 269
 carga eléctrica, simetría en la, 164
 Carnap, Rudolf, 79
 Carroll, Lewis, 116, 228
 Carter, Brandon, 268-269, 271, 272, 273
 causalidad: incertidumbre y, 178, 194; y la flecha del tiempo, 229, 235; y la velocidad de la luz, 72; y las paradojas del viaje en el tiempo, 257-260
 cavidad resonante superconductor, 149
 cefeidas, variables, 150, 154
 cerebro, procesos del: modelos de, 277-278; velocidad de, 282; y el tiempo cuántico; 287-288; y el tiempo subjetivo, 282-284; y la

- percepción del tiempo, 59, 200-201, 274-281, 284; y la simetría del tiempo, 229-230
- CERN (Laboratorio europeo del acelerador de partículas), 59, 61
- cero absoluto, 101
- Chandrasekhar, Subrahmanyan, 113-114
- Cherenkov, radiación, 81
- Chiao, Raymond, 182
- ciencia: infinito y fallo de las teorías en, 115; paradigmas en, 205; primeros experimentos cosmológicos en, 209-210; racionalidad en la, 95; síndrome de las «dos culturas», 189-191; y la guerra fría, 115; y la introducción de entidades adicionales en, 50, 140-141, 163; y las ideas especulativas, 208
- cinemática, *véase* relatividad cinemática
- clarividencia, 69
- Clarke, Arthur C., 241
- Clay, Roger, 81, 82
- CMS, ordenador, 169
- COBE (Cosmic Background Explorer Satellite), 19, 151-153; constante cosmológica y observaciones del, 167-168; escenario de universo inflacionario y, 158, 160, 162; grados de irregularidad detectados por, 159-160; rizos en la radiación de fondo detectados por, 19, 132, 151-153, 158, 159; sobre la edad del universo, 292; y la antigravedad de Einstein, 19; y la teoría del big bang, 19, 152, 158; y las «arrugas en el tiempo», 158
- colapso gravitatorio de las estrellas, 116, 126, 127-128
- Colegate, Stirling, 127
- cometas, 134
- cono de luz, 246-251, 247, 248, 249, 251, 253, 258
- conservación de la energía, ley de la, 87, 258
- constante cosmológica, 140-141, 292
- constante de Hubble, 168, 292
- constante gravitatoria de Newton, 140, 149
- Cosmic Background Explorer Satellite, *véase* COBE
- cósmicos, rayos, *véase* rayos cósmicos
- cosmología: avance de la, 141; cuatro clases de, 39; escenario del universo inflacionario, 158, 160; modelo cíclico, 29, 39; modelo de contracción, 143, 225, 226-240, 228, 235, 236; modelo de expansión, 135, 136-139, 137, 143, 152-162, 160; modelo de Hoyle-Narlikar, 234-235, 236; modelo del estado estacionario, 18, 39, 138, 140, 141, 143, 146, 154; modelo Eddington-Lemaître, 165-168, 166, 167; modelo Einstein-de Sitter, 144, 160, 162, 168; modelo estático de Einstein, 140-143; velocidad de expansión del universo en, 137-138, 137, 154, 159, 160, 161; y la simetría del tiempo, 223-225; *véase también* big bang; cosmología cuántica; Hubble, ley de
- cosmología cuántica, 187, 198-199, 237, 238-239; abolición del tiempo por, 187; borrosidad en, 198, 239; estudio de Hawking de la, 237; y el tiempo imaginario, 198
- cosmológico, término, *véase* término cosmológico
- creación, 18, 28, 33, 39-40, 191-192
- cristalografía de rayos X, 57
- cristianismo, 24, 28, 33, 34, 136
- Cronin, James, 218
- cronómetro, para determinar la longitud, 30
- cronones, 193
- Csonka, Paul, 210
- cuántica: *véase* antigravedad cuántica; cosmología cuántica; gravedad cuántica; interferencia cuántica; física cuántica; radiación cuántica; tiempo cuántico
- cuásares (QSO), objetos casi estelares, 154; descubrimiento y descripción de, 128; desplazamiento hacia el rojo de, 155-156, 166-167; lente gravitatoria de, 168; y los agujeros negros, 128
- cuerdas cósmicas, 257
- Cygnus X-1, 128
- Cygnus X-3, 84-85.
- Dalai Lama, 22
- Daresbury, sincrotrón de, 69
- Darwin, sir Charles, 35, 68; *El origen de las especies*, 35
- datación radiactiva, 138, 144, 147
- Davies, Paul: *La frontera del infinito*, 253; *La mente de Dios*, 24, 188; *The Last Three Minutes*, 36, 201, 273
- Dennett, Daniel, 276-279; *La conciencia explicada*, 276, 278
- Descartes, René, 277, 280
- desexcitación cuántica: definición de, 172; y el efecto de «observar pucheros», 172-175; y la simetría temporal, 214-220, 218
- De Sitter, Willem, 144
- desintegración radiactiva: beta, 215; del neutrón, 85, 215
- desplazamiento hacia el azul, 132
- desplazamiento hacia el rojo, 143, 150, 159; de cuásares, 155-156; de la radiación de fondo,

- 132; en el modelo Eddington-Lemaître, 166; en el movimiento de las galaxias, 135, 154; en la teoría de Milne, 146, 162; y la ley de Gubble, 135, 138, 142, 154, 155; y los agujeros negros, 119, 120-121, 126; *véase también* Doppler, efecto
- determinismo, 31, 286-287
- Deutsch, David, 239, 258, 289
- Día del Juicio Final, argumento del, 269-273, 270
- diagramas de Minkowski, 74-76, 75, 77, 246, 247, 248, 249
- Dicke, Robert, 269
- dilatación del tiempo: definición de, 56-57; fórmula para, 58-59; por muones, 56-59; producida por la rotación de la Tierra, 58, 85; y el proceso de envejecimiento, 59-61, 85, 118; y la contracción de la distancia, 66, 74; y las energías de rayos cósmicos, 83-84; y los sincrotrones, 69; *véase también* gemelos, enigma de los
- Dingle, Herbert, 55, 57, 58, 59; observaciones en rayos cósmicos, 57; sobre el tiempo, 55, 261; y la paradoja de los gemelos, 60; *Science at the Crossroads*, 57; *Relativity for All*, 55
- Dios, 40; como Relojero Divino, 31; muerte de, 38; y el tiempo, 24, 31, 136, 191-192, 291
- Dirac, Paul, 148-149, 211
- Disraeli, Benjamin, 183
- distorsión del tiempo, factor, *véase* dilatación del tiempo
- Doppler, efecto: en el enigma de los gemelos, 63-64, 65; en el movimiento de las galaxias, 134-135; y la luz, 90-91, 92, 96, 120; y la radiación de fondo, 132; y las ondas sonoras, 64, 90-91; y los agujeros negros, 120-121; *véase también* desplazamiento hacia el azul; desplazamiento hacia el rojo
- «dos culturas», síndrome de las, 189-191
- Droste, Johannes, 116
- Dukas, Helen, 296
- Dunne, J. W.: *An Experiment with Time*, 263
- Dyson, Freeman, 201, 283
- $E = mc^2$, 57, 88, 92, 98
- Eccles, sir John, 280, 288
- Eclesiastés, 238
- ecuaciones de campo gravitatorio de Einstein: formulación de las, 108; predicción de varios modelos de, 140-143, 158, 162; y el radio de Schwarzschild, 109-110; y la distorsión del tiempo infinito, 108-110, 115; y la energía total, 186; y la física newtoniana, 140; y Lemaître, 142; y los datos de COBE, 162; *véase también* término cosmológico
- ecuaciones electromagnéticas de Maxwell, 14, 15, 49, 163, 203
- edad del universo, *véase* universo, edad del
- Eddington, sir Arthur: confirmación de la curvatura de la luz por la gravedad, 112, 129, 156; flecha del tiempo según, 207, 226, 287; sobre cosmología, 143, 144, 151, 165-168, 166, 207; sobre la distorsión del tiempo infinito, 125; visión del tiempo, 25, 286; y el radio de Schwarzschild, 116, 117; y la teoría de la relatividad general, 113; y la velocidad de la luz, 243
- Eddington-Lemaître, modelo, 165-168, 166, 167
- Efstathiou, George, 168
- Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), 46, 73, 105
- Einstein, Albert: actitud escéptica hacia los agujeros negros, 114, 115, 116, 129; artículos escritos en 1905 de, 47, 51, 53, 60, 93, 113, 233; carrera académica de, 90, 104-106, 113; ciudadanía de, 46, 144; como figura legendaria, 13-14, 45; como judío, 46, 105, 113, 139, 251, 295; como pacifista, 108, 113, 139, 251, 295; cosmología estática favorecida por, 18, 39, 139-140, 141, 142, 143, 166; discusiones con Bohr, 93, 95, 98-99; educación de, 46; en la Oficina de Patentes suiza, 44, 47, 48, 53, 90, 104; experimentos mentales propuestos por, 95-99, 97, 104; fama de, 112-113; matrimonios de, *véase* Einstein, Elsa; Einstein, Mileva Maric; muerte de, 295-296; nacimiento e infancia, 46; predicción de las ondas gravitatorias, 100; premio Nobel, 93, 113; rechazo de la física cuántica, 15, 93, 94-95, 97-99, 97, 133, 169-170, 174, 178, 183, 204, 287; sobre el sentido común, 71; sobre el viaje en el tiempo, 241, 243, 251; sobre la diferencia entre pasado, presente y futuro, 71, 78-79, 267; teoría de campo unificado buscada por, 16, 251-252, 295; tiempo de, 17-18, 32-33; traslado a Norteamérica, 144; visión filosófica de la teoría de, 51-52; y Bondi, 88; y la emisión estimulada de fotones, 203-204; y la simetría temporal en electromagnetismo, 206, 210; y un «continuo espacio-temporal» unificado, 74, 267; y Wheeler, 116; «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento», 47, 53-54, 60; *véase también* ecuaciones de campo gravitatorio; Einstein-de Sit-

- ter, modelo; relatividad especial, teoría de la; relatividad general, teoría de la
- Einstein, Elsa, 106, 133, 144, 295-296
- Einstein, Hermann, 46
- Einstein, Jakob, 46
- Einstein, Mileva Maric, 46, 47, 105-106, 113, 203, 296
- Einstein, Pauline, 46
- Einstein-de Sitter, modelo, 144, 160, 162, 168
- Einstein-Rosen, puente de, 255; «factor amañado de Einstein», 162; *véase también* término cosmológico
- élan vital*, 36
- electromagnéticas, ecuaciones, *véase* ecuaciones electromagnéticas de Maxwell
- electromagnetismo: ecuaciones de Maxwell del, 14, 15, 49, 163, 202-203; en la teoría de campo unificada, 163; termodinámica y, 14-15; universo opaco al, 208; y la flecha del tiempo, 202-210, 216; y la simetría gauge, 163; y la velocidad de la luz, 49; y las leyes del movimiento de Newton, 15, 48-49
- electrón-voltio, definición de, 83-84
- electrones: que van hacia atrás en el tiempo, 212-213, 213, 258; *véase también* positrones
- Eliade, Mircea, 26, 28; *El mito del eterno retorno*, 28
- Eliot, T. S., 73, 78
- emisión de la luz, teoría de la, 206
- enanas blancas, estrellas, 113-114
- energía: de fotones, 92, 94, 104; del universo, 186-187; en relación a la velocidad, 83; fórmula de Einstein de la, 57, 88, 92, 98; simetría temporal y, 222; y el movimiento perpetuo, 88-89; y el principio de incertidumbre de Heisenberg, 93; *véase también* conservación de la energía, ley de la
- entropía, 34-35, 38, 234
- envejecimiento, proceso de: irreversible, 207; y la dilatación temporal, 60-61, 85, 118
- EPR, experimento, 182
- equivalencia, principio de, 90
- escape, *véase* velocidad de escape
- escenario de universo inflacionario, 158, 162
- espacio: contracción del, 74; en la teoría de la relatividad especial, 15, 16, 52, 53
- espacio-tiempo: agujeros de gusano en el, 253-257, 254, 255; campo gravitatorio como una curvatura del, 105, 140, 185; como un campo, 17; dentro de los agujeros negros, 120, 124-125; diferencias entre espacio y tiempo en, 195-196, 197-198; en cosmología cuántica, 187; geometría del, 74-76, 75, 77, 105, 188, 195-198; intervalos en, 195-197; líneas de universo en, 76-77, 77, 246-251, 247, 248, 249, 251; y el viaje en el tiempo, 244-251, 245, 247, 248, 249, 251, 252
- Espagnat, Bernard d', 21
- estadística, 271-272
- estado estacionario, modelo de, 18, 39, 138-139, 140, 141, 142, 143, 144, 154, 156, 166
- estoicos, 29
- estrella congelada, 123; *véase también* agujeros negros
- estrellas: cefeidas variables, 150, 154; colapso gravitacional de, 116, 126-127, 128; edad de las, 136, 161; enanas blancas, 113-114; explosión de supernova, 84, 126, 269; oscuras, 153; sistemas binarios de, 128; *véase también* agujeros negros; estrellas de neutrones; púlsares
- estrellas de neutrones, 47-48; colisiones con agujeros negros, 100; descubrimiento de, 128; dipolo eléctrico de, 221-223; y la distorsión del tiempo, 108; *véase también* agujeros negros; púlsares
- éter: capacidad calorífica ilimitada del, 15; definición del, 49-50; rechazo experimental del, 51
- eternidad, 23-24, 28, 41, 291
- ETH, *véase* Eidgenössische Technische Hochschule
- evolución biológica, 35, 36, 258
- expansión del universo, 135-136, 137-138, 137, 143, 152-162, 160
- experimentos mentales: de Einstein, 95-99, 97, 104; definición de, 95; sobre la caída de cuerpos, 96-97, 96; y el efecto real, 60
- extrañeza, cualidad del kaón, 216-217
- Faraday, Michael, 49
- Feynman, Richard, 207, 208, 209, 210, 211-212, 214, 258
- Fiesta del Año Nuevo, 28
- Filón de Judea, 41
- filosofía: consciencia en, 289; evolución en, 35, 36; flecha del tiempo en, 34; Lockwood sobre, 261; *ser* y *devenir*, 285; y la ciclicidad, 29; y la segunda ley de la termodinámica, 36
- Finkelstein, David, 116-117, 127, 131, 193, 231
- física: experimental y física teórica, 51-52; relación entre el universo y las leyes de la, 145, 185-186; teoría global de la, 14, 16; y filosofía, 289; *véase también* física clásica; física

- cuántica; relatividad especial, teoría de la; relatividad general, teoría de la
- física clásica (newtoniana): fin de la, 14-15, 16; y la teoría de la relatividad, 15-16
- física cuántica, 139, 210, 253; aceptación de los científicos de la, 95; contribución de Einstein a, 47; dualidad onda-partícula en, 94; indeterminación como característica esencial de, 173, 194, 238, 286; nacimiento de la, 129, 133, 143, 170; rechazo de Einstein, 15, 93, 94-95, 97-99, 97, 143, 169, 174, 178, 183, 204, 286; y el orden implicado, 204-205; véase también incertidumbre, principio de; tiempo cuántico
- Fitch, Val, 218-219
- flecha del tiempo, 202-240; antimundos y, 230-233, 235, 239; como problema no resuelto, 293; definición de, 15, 202; evolución biológica y, 35, 36; flujo de calor como manifestación de, 15, 36, 227-228, 236-237; inversiones a pequeña escala de, 233-234; origen religioso de, 33-34; simetría en, 213-225; viaje en el tiempo comparado con la inversión de, 242; y el flujo del tiempo, 266-267; y la antimateria, 210-225; y la comunicación con el tiempo invertido, 230, 239; y la contracción del universo, 226-240, 228, 235, 236; y la gravedad, 224-225; y la infinitud de universos, 239; y la relatividad del tiempo, 17; y la segunda ley de la termodinámica, 34-35, 207, 227; y las ondas electromagnéticas, 202-210, 216
- flujo de calor: y la flecha del tiempo, 15, 36-37, 227, 237
- flujo de Hubble, 135
- flujo del tiempo, 261-273; «ahora» y el, 267-273; como pregunta no contestada, 293-294; como una ilusión, 261-264; como un mito, 264-265; en el tiempo cuántico, 287-288; y la flecha del tiempo, 266-267; y los crecimientos acelerados de población, 269-273, 270
- fluxiones, teoría de, 31
- Foreword, Robert: *Dragon's Egg*, 283
- fósiles, registros, 14, 39, 40
- fotoeléctrico, efecto, 47, 93, 113
- fotomisión inducida, 88, 203-204
- fotones: de rayos gamma, 83-84, 103-104, 211-212, 212; definición de, 83-84, 94; emisión estimulada de, 88, 204; en el experimento mental del reloj en la caja, 97-99, 97; en experimentos de sistema cuántico, 174-184, 176, 177, 181; energía de, 92, 94, 104, 172; flecha del tiempo en la absorción y emisión de, 203-204, 205-206; par electrón-positrón creado por, 211-212, 212
- fotónica, 169
- frecuencia, definición de, 91
- Friedman, Milton, 86
- Friedmann, Aleksandr, 142, 143
- fuerza nuclear: débil, 215, 217; en la teoría de campo unificado, 163, 164; fuerte, 215
- fuerza vital, véase élan vital
- galaxias: agujeros negros y, 112, 128; descubrimiento de, 134; distribución de, 131, 152; en la expansión del universo, 131, 134-135, 136-139, 154, 155-156; espirales, 135, 155; materia oscura en, 153-154, 157
- Galileo Galilei: descubrimiento de la ley fundamental del péndulo, 30; experimento mental sobre la caída de objetos de, 96-97, 96; principio de relatividad conocido por, 15, 48; sobre el tiempo y la realidad física, 90, 284
- gamma, rayos, véase rayos gamma
- Gardner, Martin, 219, 229
- gases, movimiento molecular de los, 37-38
- gauge, simetría, 164
- Geiger, contador, 55-56, 57
- Gell-Mann, Murray, 237, 238
- gemelos, enigma de los: agujeros de gusano en el, 255; contracción de la distancia en, 66; delimitación de sucesos, 61; diagramas de Minkowski del, 76-77, 77; dilatación del tiempo como función de velocidad en, 61, 62, 196-197; explicación del, 63-66; multiplicidad de «ahoras» en, 67-68, 71, 72; y el efecto Doppler, 64, 65; y el viaje en el tiempo, 242, 243-244, 255; y los agujeros negros, 118, 125, 122
- Gibbs, Willard, 233
- Ginebra, Universidad de, 105
- Gödel, Kurt, 250-251, 251, 253
- Goethe, Johann, 66
- Gold, Thomas: y la flecha del tiempo, 227-228, 228, 235-236, 239; y la inversión temporal, 227-228, 228, 234, 239; y la teoría del estado estacionario, 138
- Goodman, Nelson, 276, 278
- Gotinga, Universidad de, 205
- Gott, Richard, 257
- Gould, Stephen Jay, 282
- Govinda, Lama, 25
- Gran Nube de Magallanes, 40, 134, 157

- gravedad cuántica, 185
 gravitación: clásica (newtoniana), 14, 110, 111, 140; como curvatura en la geometría del espacio-tiempo, 105, 140, 185; como una atracción universal, 140; efecto de la luz sobre, 91, 103, 112, 129, 154, 156-157, 157; efecto sobre la expansión del universo, 137, 152, 158-159, 160, 165; en la teoría de campo unificado, 163, 164; escala de tiempo de Milne para, 145-146; fuerza antigravitatoria, véase término cosmológico; pulsares y, 47-48; tiempo frenado por, 86, 88-89, 89, 91-93, 97-99, 97, 101, 102-103, 103, 104, 107-129, 109, 131, 242; y aceleración, 90, 93, 96-97; y cuerdas cósmicas, 257; y la simetría temporal, 224-225; y la velocidad de caída de los cuerpos, 96-100, 96; y presión, 256; véase también colapso gravitatorio de las estrellas; lente gravitatoria; ondas gravitatorias; relatividad general, teoría de la
- Grecia antigua, 29, 33, 39, 285, 289
 Greenberger, Daniel, 169
 Gregorio XIII, papa, 42-43
 Grossmann, Marcel, 105
 guerra fría, 115
- Hafele, J. C., 58
 Hall, David, 57
 Harding, Warren, 113
 Harrison, John, 30
 Hartle, James, 194, 237, 238
 Hartle-Hawking, teoría del origen del universo, 194-199
 Harvard, 103; Universidad de, 103
 Hawking, Stephen, 151, 163, 238; investigación de los agujeros negros, 224; reacción en contra, 190-191; sobre las paradojas del viaje en el tiempo, 259-260; teoría del tiempo imaginario, 194-199; teorías del tiempo, 18, 131, 189, 190, 193, 194-199; voz de, 189-190; *Historia del tiempo*, 131, 190
 Haystack, antena de radar, 102
 Hébridias Exteriores, 43
 Heisenberg, Werner, 93, 99; véase también incertidumbre, principio de
 Herrick, Robert, 266
 Hewish, Anthony, 107
 Hiley, Basil, 204
 hinduismo, 23, 25-26
 Hinton, Charles, 74; «¿Qué es la cuarta dimensión?», 74
- Hitler, Adolf, 144
 Holub, Miroslav, 275; «La dimensión del momento presente», 275
 Hooker, telescopio, 133
 horizonte de sucesos, 124
 Hoyle, Fred, 41, 42, 138, 154, 155, 162, 234; *October the First is Too Late*, 41
 Hoyle-Narlikar, modelo de, 234-235, 235, 236
 Hubbard, Kin, 282
 Hubble, Edwin, 134, 135, 136, 138, 139, 142, 144, 149-150, 154, 155, 161; véase también flujo de Hubble
 Hubble, ley de, 135, 138, 143, 150, 154, 155
 Hulse, Russell, 45
 Humason, Milton, 150
- imaginario, tiempo, 194-199
 incertidumbre, principio de: aplicabilidad del, 94; definición, 93-94; imposibilidad de medir el tiempo según el, 98-99, 97, 170, 172, 174, 185; y causalidad, 178; y el efecto túnel, 170-172, 170, 171; y la desexcitación cuántica, 172-175
 indeterminismo: como característica esencial de la física cuántica, 173, 194, 238, 286; véase también incertidumbre, principio de
 infinito: como singularidad, 115, 116, 117; y el fallo de la teoría científica, 115
 información táctil, trucos temporales con la, 279-281
 interferencia de las ondas de luz, 51, 176, 179
 interferencia cuántica, 176, 179
 intuición, 285
 inversión del tiempo, véase flecha del tiempo
 Isham, Christopher, 185, 194
 islam, 34
 Israel, 295
 Israel, Werner, 114, 115
 iterbio, fluoruro de (YbF), 223
- Jerusalén, 113; Unidad Hebrea de, 113
 Johnson, Samuel, 180
 Joyce, James: *Finnegans Wake*, 29
- Kant, Immanuel, 192
 kaones, 214-220, 223, 231; descubrimiento y descripción, 214-215; y la violación de la simetría de inversión temporal, 216, 219-220, 224, 225, 293

- Keating, Richard, 58
 Kennedy, John F., 40
 Kerr, Roy, 252-253
 Kornhuber, H. H., 280
 Kruskal, Martin, 116, 127, 231
 Kubrick, Stanley: *2001: una odisea del espacio*, 90
- Lamb, Charles, 68
 Landau, Lev Davidovich: *Física estadística*, 116
 Laplace, Pierre de, 31, 107, 112, 286-287
 Las Campanas, Observatorio de, en Chile, 39
 láseres, 88, 204
 Leibniz, Gottfried, 192
 Lemaître, Georges, 141-142, 143, 144, 165
 lente gravitatoria, 146, 157, 168
 Leo, 132
 Lerner, Eric: *The Big Bang Never Happened*, 157
 Leslie, John, 271
 Levine, Martin, 101
 Libet, Benjamin, 279, 280
 Lifshitz, Evgeni Mijailovich: *Física estadística*, 116
 línea de universo, 76-77, 77, 246-251, 247, 248, 249, 251
 Livermore Laboratory, en California, 127
 Lockwood, Michael, 261
 Lodge, sir Oliver, 112, 156
 Longfellow, Henry Wadsworth, 13, 32
 longitud en el mar, determinación de la, 30
 Lowell, Percival, 134
 Lucrecio, 33, 82; *De Rerum Natura*, 23
 Luitpold Gymnasium, 46
 Luna, edad de la, 138
 luz: consta de corpúsculos, 111; dualidad onda-partícula de, 94, 117, 180; efecto de la gravedad sobre, 91, 103, 111, 112, 129, 154, 156-157, 157; escala de tiempo de Milne para la, 146; frecuencia de la, 91; Johnson sobre, 180; teoría de emisión de la, 206; y el efecto Doppler, 90-91, 92, 96, 120; y los agujeros negros, 111, 119-125; véase también cono de luz; velocidad de la luz
- Mach, Ernst, 52
 Magallanes, nubes de: Gran, 40, 134, 157; Pequeña, 134
 Major, John, 189
 Marco Aurelio Antonio, 28
- Markarian 205, QSO, 155-156
 Marte, 103, 134, 149
 masa, equivalencia con la energía ($E=mc^2$), 57, 88, 92, 98
 matemáticas: de la geometría del espacio-tiempo, 74-77, 75, 77, 105, 195-198; Einstein y las, 45, 105; en el enigma de los gemelos, 59-67, 62, 243-244; jerga de las, 195; números imaginarios en, 194-195, 197; y los agujeros negros, 117, 231
 materia oscura: cantidad de, 159; y el escenario del universo inflacionario, 158-169; y la edad del universo, 292; y las estrellas invisibles, 157
 materia oscura caliente, 153
 materia oscura fría, 153-154, 168
 Maxwell, James Clerk, 49; véase también ecuaciones de Maxwell
 McCrea, William, 144
 McFlaggart, John E., 263, 267
 mecánica estadística, 47
 memoria, desvanecimiento de la, 283
 mercurio, 223
 mesones, 215
 «mesotrones», 57
 Messier, Charles, 134
 meteoritos, 138
 meteorólogos, 265
 Michell, John, 111-112, 119
 Michelson, Albert, 51
 Michelson-Morley, experimento, 50-51, 176
 micromáquinas, 69
 Milne, Edward, 144, 145-146, 148, 149, 162
 Milton, John, 226
 Minkowski, Hermann, 45, 73-74, 77, 78, 195, 196, 197; véase también diagramas de Minkowski
 misticismo, 25-27
 «moksha», 23
 Monod, Jacques, 36
 Monte Stromlo, Observatorio del, en Nueva Gales del Sur, 157
 Monte Wilson, Observatorio del, en California, 112, 129, 133, 134, 150
 Morley, Edward, 50
 movimiento: en la teoría de la relatividad especial, 53, 131; percepción del tiempo a través del, 29-30; todos los relojes son afectados por el, 59; y el razonamiento de Zenón, 263; y los pulsares, 47-48, 54; véase también movimiento uniforme
 movimiento, inversión del, 216
 movimiento, leyes de Newton del, 14, 31, 37; y

- electromagnetismo, 15, 48-49; y el principio de la relatividad, 49
- movimiento perpetuo, máquinas de, 35, 86-89, 87, 89; sistema de cinta transportadora, 88-89, 89, 91, 103; y las leyes de la termodinámica, 87-88
- movimiento uniforme, y aceleración, 48, 52, 60
- M31 (Andrómeda), nebulosa, 134, 135
- M33, nebulosa, 134
- muerte térmica del universo, 34-35, 38, 39, 201, 227
- muones, y la dilatación del tiempo, 56-58, 61
- Nahin, Paul, 210
- Narlikar, Jayant, 154, 234
- NASA, 103, 132, 158
- nebulosas, 133-135
- Ne'eman, Yuval, 224
- nervioso, sistema, respuesta refleja del, 275
- neurocirugía, experimentos de, 279
- neutrinos, 153, 210
- neutrones, 215; vida media de los, 85; y la simetría temporal, 221-223, 222; y mesones, 215
- Newman, Riley, 210
- New York Times*, *The*, 80, 151
- Newsweek*, 151
- Newton, sir Isaac: teoría de la gravitación de, 14, 90, 110, 111; teoría de la óptica de, 111; véase también física clásica; movimiento, leyes de Newton del; tiempo clásico
- Nietzsche, Friedrich, 38
- nihilismo, 38
- «nirvana», 23
- Nobel, premios: Dirac, 147; Einstein, 93, 113; Gell-Mann, 237; Heisenberg, 99; Hulse y Taylor, 45
- números de Mach, 52
- números imaginarios, 194-195, 197
- «observar pucheros», efecto de, 172-175
- Ockham, navaja de, 163
- Oficina de Patentes suiza, 44, 47, 48, 53, 90, 104
- Oficina Internacional de Pesos y Medidas de Sèvres, 21
- Ojo de Mosca, sistema detector, 84
- onda-partícula, dualidad, 94, 177, 180
- ondas avanzadas: interferencia y, 208; probabilidad de, 206, 208, 216; simetría y, 206, 216; viajando hacia el pasado, 203, 209, 216; y las ondas retardadas, 203
- ondas electromagnéticas de choque, 81
- ondas gravitatorias, 100, 252
- ondas retardadas: interferencia y, 208; y la simetría, 216; y las ondas avanzadas, 203, 206
- ondas sonoras, efecto Doppler y, 64, 90-91
- Ong, Walter, 28
- óptica, teoría de Newton de la, 111
- Oppenheimer, J. Robert, 115, 116, 127; «Sobre la atracción gravitatoria continuada», 115, 116
- orden implicado, 204-205
- ordenadores: y el efecto túnel, 172; y la velocidad de la luz, 169
- oro, 70
- Osborne, John, 230
- paisaje temporal, véase tiempo en bloque
- palingenesia*, 29
- paradojas: antimundos, 230-233, 235, 239, 252-253; de Zenón, 263; del tiempo en bloque, 73, 78, 262, 271; efecto túnel, 170-172, 170, 171; rizos en la radiación de fondo, 19, 132, 151-153, 158, 159; viaje en el tiempo, 257-260; véase también experimentos mentales; gemelos, enigma de los; incertidumbre, principio de; movimiento perpetuo, máquinas de
- paranormal, 68, 126
- Park, David, 264
- Parménides, 262
- parsec, definición de, 161
- partículas, energía de las, 83
- Partridge, Bruce, 209, 238
- Peirce, C. S., 274
- péndulo, ley fundamental del, 30
- Penrose, Roger, 145; sobre el tiempo interno, 286; sobre los procesos mentales, 280, 288; técnicas geométricas de, 128; y Hawking, 189-190; y la diferencia entre un agujero negro y un agujero blanco, 224-225
- Penzias, Arno, 131, 139
- Pequeña Nube de Magallanes, 134
- Perth, 100
- phi, fenómeno, 276
- Philosophical Magazine*, 120
- Physical Review*, 115
- Physical Review Letters*, 103
- piones, 210, 215, 218
- Piscis, 132
- planetas, órbitas de los, 148
- Platón, 24, 29, 226, 231, 261

- Plotino, 24
- población, crecimiento de la, 269-273, 270
- Podolsky, Boris, 181
- Poincaré, Henri, 37-38, 207
- Popper, Karl, 280
- positivismo, 52
- positrones, 211-213, 212
- «potencial de disposición», 280
- Potsdam, Observatorio de, 109
- Pound, Robert, 103-104
- presente, *véase* «ahora»; flecha del tiempo
- presión, gravedad producida por la, 256
- Price, Huw, 238
- Priestley, J. B., 27, 29, 284
- Prigogine, Ilya, 31, 36, 131, 285
- Primer Suceso, 193, 198
- Princeton: Instituto para Estudio Avanzado en, 115, 143, 144, 250, 251, 295; Universidad de, 116
- privación sensorial, 275
- probabilidad, teoría de la, 271-272
- Proceedings of the Prussian Academy of Sciences*, 109
- protección cronológica, hipótesis de, 259
- protones, 215; en los rayos cósmicos, 81, 83, 84
- PS 1913+16, 44, 45, 48
- púlsares: binarios, 44, 45, 47-48, 54; como relojes, 44-45, 48, 100; densidad de los, 44, 47; descripción de los, 47; descubrimiento de los, 108, 128; frecuencias de rotación de los, 47-48; movimiento y gravitación, 47, 54; teoría de la relatividad confirmada por, 54; y la radiación sincrotrón, 69; *véase también* estrellas de neutrones
- QSO, *véase* cuásares
- quarks, 215, 217, 218, 223
- Quinteto de Stephan, galaxias, 156
- rádar: eco registrado en Venus, 102; ondas de, 102, 103
- radiación: beta, 215; Cherenkov, 81; cuántica, 224; *véase también* radiación de fondo; rayos cósmicos; rayos gamma; rayos X
- radiación de fondo: descubrimiento de la, 131-132, 139; evolución biológica producida por, 56, 258; rizos en, 19, 132, 151-153, 158, 159; *véase también* COBE
- radioastronomía, 252
- rayos cósmicos, 56; antipartículas en, 211, 215; atmósfera y, 56; energía de partículas en, 83, 84-85; evolución y, 258; posibles fuentes de, 84; y las distorsiones del tiempo, 56, 57
- rayos gamma: definición de, 84; desplazamiento gravitacional hacia el rojo medido por, 103-104; experimentos para la detección de, 80-81, 83; *véase también* fotones
- rayos X: del sincrotrón, 69; fuentes cósmicas de, 84, 128
- Reagan, Ronald, 289
- Rebka, Glen, 103-104
- reflexión especular, 218
- Regreso al futuro*, película, 257
- Reichenbach, Hans, 287
- relatividad, principio de, 145-147
- relatividad cinemática, 145-147
- relatividad especial, teoría de la, 115, 195, 211, 244, 290; aceptación de los científicos de la, 60, 93, 205; como paradigma, 205; desarrollo de la, 47, 48, 49, 52-54; velocidad de la luz como barrera en, 52-53, 56, 67, 72, 81, 83; verificaciones experimentales de la, 54, 56-59, 101, 102-105; *véase también* gemelos, enigma de los; tiempo relativista
- relatividad general, teoría de la, 139, 145, 193, 290; aceptación de los científicos, 113, 252; desarrollo de la, 105-106, 108; predicción de la curvatura de la luz por un cuerpo masivo, 156, 157; verificaciones experimentales de, 45, 107, 112, 113, 156, 251; y el flujo del tiempo, 266-267; y el viaje en el tiempo, 244, 250; y los agujeros negros, 126, 129
- reloj estándar, 21
- relojes: astronómicos, 146, 148; de Blair, 100-101; experimento mental de Einstein con, 97, 98-99; para el tiempo imaginario, 199-201; pequeños intervalos medidos por, 199-200; púlsares como, 44-45, 48, 100; y la dilatación del tiempo, 59-60, 118; y la incertidumbre, 174, 184-185; *véase también* reloj estándar; relojes atómicos; relojes biológicos; relojes de haces de cesio
- relojes atómicos, 21-22; experimentos de la dilatación del tiempo con, 58-59; precisión de, 21-22, 100, 145-146; procesos atómicos, escala de tiempo para, 146, 149; y los relojes astronómicos, 146-149
- relojes biológicos, 282-284; dependen del tamaño corporal, 282; y la memoria, 283; y la psicología, 282
- relojes de haces de cesio, 21-22, 58-59, 100-101, 145, 146, 149

- respuesta, experimentos de tiempo de, 275, 276-281
 reversibilidad, principio de la, 216
 Reyna, Ruth, 25-26
 Ritz, Walther, 205-206
 Rochester, Universidad de, 180
 Rosen, Nathan, 181, 255
 Rosenfeld, Leon, 98
 Rossi, Bruno, 57
 rotación: del universo, 250, 251; gravedad simulada por la, 91; velocidad de la Tierra de, 22
 Royal Society de Londres, 113, 269

 Sachs, Oliver, 275
 Sagan, Carl, 256; *Contacto*, 254
 Sandage, Allan, 161
 Sanduleak 69.202, estrella, 39-40
 Sankara, 25
 Schlumberger, Anne, 130
 Schopenhauer, Arthur, 71
 Schwarzschild, Karl, 109, 112, 129, 231-232
 Schwarzschild, radio de: atravesando el, 119, 121, 122, 127; como artificio matemático, 116-117; como horizonte de sucesos, 124; creencia de imposibilidad física, 110, 114, 115, 116, 126; descubrimiento del, 109-110; en la formación de los agujeros negros, 110, 111-112, 113, 114, 116, 117; y el tiempo, 121-124, 122, y la distorsión del tiempo, 117, 119
Scientific American, 219
 Scully Marlan, 175, 178, 183
 sede de la consciencia, 277
 segundo, definición de, 22
 segundos bisiestos, 22
 selección natural, 35
 señales temporales de radio (bips), 21, 45, 54
 ser y devenir, 262-263, 285, 287
 Shakespeare, William, 115, 274, 289
 Shapiro, Irwin, 102-103
 simetría, 163-165; de la carga eléctrica, 164; en la reflexión especular y la simetría temporal, 218; gauge, 163; véase también flecha del tiempo
 simetría de la inversión del tiempo, 216-225
 simultaneidad: relatividad de la, 72-73; y el enigma de los gemelos, 66-68, 70
 sincrotrones, 69-70
 singularidad desnuda, 253
 singularidades: big bang como, 136, 193, 199; en el centro de los agujeros negros, 124, 127; infinitos como, 115, 116, 117
 sionismo, 113, 295
 Sirio B, 112, 113
 Slipher, Vesto, 134-135, 143
 Smart, Jack, 261-262, 263-264, 286
 Smiles, Samuel, 237
 Smoot, George, 152
 Snow, C. P., 190
 Snyder, Hartland, 127; «Sobre la atracción gravitatoria continuada», 115, 116
 Sol: campo gravitatorio del, 110; radio del, 110; retraso temporal por la gravedad del, 102-103, 103; velocidad orbital en la galaxia, 131
 Solvay, Conferencias (1930), 95, 98
 sonido, velocidad del, 52
 Stannard, Russell, 214, 219
 Stanner, W. E. H., 26-27
 Stern, Otto, 221
 sujeto consciente, 277
 superconductividad, 101; véase también cavidad resonante superconductor
 supernova, 84, 126, 269
 Szekeres, George, 116-117, 127, 231

 táctil, véase información táctil
 taquiones: existencia de los, 290; posible descubrimiento de los, 81-82; y el viaje en el tiempo, 184, 242-243
 Taylor, John G., 125; *Black holes: The End of the Universe?*, 126
 Taylor, Joseph, 45
 telescopio de Hubble, 292
 temperatura: de la radiación de fondo, 19, 132, 151-153, 158; y los procesos físicos, 200-201
 Teoría de Todo, 14, 16
 teoría unificada, gran, 14, 16
 término cosmológico (fuerza Λ), 140-144, 292; como fracaso teórico, 141, 162-163; efecto con la distancia, 141, 163, 165; en el modelo Eddington-Lemaître, 165, 167; formulación del, 140-141, 162-163; y el problema de la edad cósmica, 19, 162-165, 168; y la constante cosmológica, 141
 termodinámica: primera ley de la, véase conservación de la energía, ley de; segunda ley de la, 34-35, 36-37, 39, 87-88, 207, 227; y la simetría temporal, 229; y la teoría de la radiación electromagnética, 14-15; y las máquinas de movimiento perpetuo, 87-88
 Tetrode, Hugo, 210

Thomas Dylan: *Bajo el bosque lácteo*, 107

Thorne, Kip, 126, 127, 255, 256

tiempo: átomos de, 193; citas sobre el, 11, 13, 17, 21, 23, 25, 28, 40, 66, 71, 73, 78, 79, 136, 144, 184, 189, 191, 202, 220, 226, 230, 233, 238, 241, 244, 257, 261, 264, 267, 274, 276, 278, 284, 289; comienzo del, 130-150, 190, 191-199, 291; cuestiones no respondidas sobre, 289-294; filósofos y el, 29, 34, 35, 36; físicos y la subjetividad del, 284-288, 293; humano, 200-201; imaginario, 194-199; lineal, véase flecha del tiempo; medición de los intervalos más pequeños de, 199; metáfora de las casillas para el, 42; origen del, 17-18, 135-136, 192, 198, 291; percepciones mentales del, 22, 23; primeras mediciones del, 30; primeras representaciones espaciales del, 73-74; resultado de un condicionamiento cultural, 22, 26-27, 28-29, 55; universal, véase tiempo cósmico; vacío, 192; visión cíclica del, 26-29, 36-38, 226-240, 228, 235, 236; y Dios, 24, 31, 136, 192, 291; y el misticismo, 25-27; y religión, 22, 23-24, 28, 34; véase también dilatación del tiempo; flujo del tiempo; tiempo subjetivo

tiempo clásico (newtoniano), 29-32, 43, 133, 188, 284, 286; choque entre la relatividad del movimiento y el, 15, 32, 47; como abstracción, 17; desarrollo del, 29-32

tiempo cósmico, 130-150; big bang como origen del, 18, 135-136; escalas múltiples del, 145-150, 147, 162; no universalidad el, 186; sistema de referencia para el, 132-133; y la edad del universo, 18, 85, 136-138, 137, 145, 149

tiempo cuántico, 18, 136, 169-188, 291; barrera de la velocidad de la luz y, 184; borrar el pasado y, 175-179, 176, 177, 182; imposibilidad de medición, 97-99, 97, 170, 173-175, 184-188, 200; y el efecto túnel, 170-172, 170, 171; y el tiempo subjetivo, 287; y las partículas psíquicas, 180-183, 181

Tiempo del Sueño, de los aborígenes, 23, 26-27

tiempo en bloque, 73, 78, 262, 271; véase también línea del mundo

tiempo relativista, 15, 16, 289; desarrollo del, 32-33, 47, 53-54; como cuarta dimensión, 74, 195, 197, 262; deficiencias del, 284, 292, 294; efecto de la gravedad sobre, 86, 88-89, 89, 91-93, 97-99, 97, 101, 102-103, 103, 104, 107-129, 109, 131, 242; en el espacio-tiempo, 74-77, 75, 77; opiniones disidentes sobre, 55,

58, 80; pasado, presente y futuro en el, 71-79, 267, 271, 286; y la distorsión del tiempo infinita, 108, 109, 110, 114, 115, 116, 117

tiempo subjetivo, 274-278; experimentos sobre, 276-281; tiempo de los físicos y, 284-288, 293-294; unidades más pequeñas de, 274-276; y los relojes biológicos, 282-284

Tierra: cambios en la velocidad de rotación de la, 22; campo gravitatorio de la, 110; dilatación del tiempo producida por la rotación y la gravedad de, 58, 86; edad de la, 138, 144, 147; escala de tiempo de Milne para, 146; periodo orbital de la, 43, 148; presión interna de, 256; término cosmológico en la gravedad de la, 141; velocidad de escape, 111; velocidad del movimiento en relación con la radiación de fondo, 132-133; velocidad orbital de la, 131; y el tiempo cósmico, 133

Time, 151

Times, *The*, de Londres, 295

Tipler, Frank, 201, 253, 283

Toda, Masanao, 284

Treilles, Les, reunión en, 130-131, 132

túnel, efecto, 170-172, 170, 171, 175

Turner, Edwin, 168

Ullmo, Jean, 51

universo: cartografía del, 152; como un mecanismo de relojería, 31; edad del, 18-19, 39-40, 85, 136-138, 137, 144, 149-150, 152, 161-162, 167-168, 167, 292; energía total del, 187-188; muerte térmica del, 34-35, 38, 39, 201, 227; opaco a todas las ondas electromagnéticas, 208; relación entre las leyes de la física y, 145, 186; rotación del, 250, 251; tamaño del, 150; y el big crunch, 227, 228, 237, 238, 239; y los ciclos de Poincaré, 37-38; véase también big bang; cosmología; radiación de fondo; tiempo cósmico

universo inflacionario, escenario de, 158, 162

universos alternativos: atravesando agujeros negros, 125; véase también antimundos

Ussher, James, 130

vacío, tiempo, 192

Vaucouleurs, Gérard de, 161

Vaughan, Henry: «El Mundo», 11

velocidad de escape, definición, 111

velocidad en tierra, record de, 83

velocidad de la luz: chascarillo sobre, 82; como barrera, 53, 56, 67, 81, 82, 83, 169, 200, 243,

- 256; en el principio de relatividad en relación a la teoría electromagnética, 49; valor de la, 49; y el tiempo cuántico, 184; y los agujeros negros, 120-121; y los relojes, 199-200; y los taquiones, 82
- Venus, ecos de radar desde, 102, 103
- Vessot, Robert, 101-102, 118
- Vía Láctea, 133; agujero negro en el centro de la, 128-129; como una de las muchas galaxias, 134; en el modelo estático del universo, 135; materia oscura en la, 153; velocidad orbital de la, 131
- viajes en el tiempo, 82, 124-125, 241-260, 290; agujeros de gusano y el, 253-256, 254, 255, 259; inversión del tiempo comparada con, 242; paradojas del, 257-260; rotación de un cilindro de materia, 253; señalando al pasado, 241-244; y el enigma de los gemelos, 242, 243-244; y la geometría espacio-temporal, 244-251, 245, 247, 248, 249, 251; y la gravedad cuántica, 256; y las cuerdas cósmicas, 257; y los agujeros negros, 252-253; y los taquiones, 242-243
- Viking, nave espacial, 103, 148-149
- Watts, Isaac, 261
- Weinberg, Stephen, 165, 190
- Weizmann, Chaim, 113
- Weldon, Fay, 133
- Wells, H. G., 243, 250; *La máquina del tiempo*, 241, 253, 257, 260
- Weyl, Hermann, 76, 78, 244
- Wheeler, John, 123, 184, 211, 244, 252, 254, 257, 276; investigación de agujeros negros, 107, 116, 126-127
- Wheeler-Feynman, teoría de la electrodinámica de, 207-209, 210
- White, T. H., 226
- Whitrow, Gerald J., 44, 284, 287
- Wiener, Norbert, 230
- Wilson, Robert, 131, 139
- Woomera, ciudad australiana, 80-81, 83, 84
- X, rayos, véase rayos X
- Yale, Universidad de, 223
- zafiro, oscilaciones del cristal de, 100-101
- zahories, 69
- Zenón, paradoja de, 263
- Zurich, 46; Universidad de, 90, 105, 205

●

Índice

<i>Prefacio</i>	9
<i>Prólogo</i>	13
1. <i>Una historia muy breve del tiempo</i>	21
¿De qué tiempo se trata en cualquier caso?	21
La búsqueda de eternidad	23
Escapar del tiempo	25
Mundos cíclicos y eterno retorno	28
El tiempo de Newton y el universo mecánico	29
El tiempo de Einstein	32
¿Está muriendo el universo?	33
El retorno del eterno retorno	36
El comienzo de todo	39
Sucede cuando sucede	40
2. <i>Tiempo de cambio</i>	44
Un regalo del cielo	44
Adiós al éter	48
Una solución a tiempo	51
Interludio	54
Estirar el tiempo	55
El enigma de los gemelos	59
Adiós al presente	66
El tiempo es oro	68
Paisaje temporal	71
3. <i>Distorsiones del tiempo</i>	80
La barrera de la luz	80
El movimiento perpetuo y la lucha cuesta arriba	86
¿Por qué el tiempo corre más rápido en el espacio?	90

El reloj en la caja	93
El mejor reloj del universo	99
El eco que llegó tarde	102
Subiendo en el mundo	103
4. <i>Agujeros negros: puertas al fin del tiempo</i>	107
Factor de distorsión infinito	107
Un misterio oscuro	111
Penetrando en el círculo mágico	115
Un problema singular	116
Más allá del fin del tiempo	123
¿Están realmente ahí fuera?	125
5. <i>El comienzo del tiempo: ¿cuándo fue exactamente?</i>	130
El gran reloj del cielo	130
El big bang y lo que sucedió antes de él	133
¿Más vieja que el universo?	136
El mayor error de Einstein	139
Dos tiempos en el cosmos	145
6. <i>¿El mayor triunfo de Einstein?</i>	151
La escritura de Dios	151
¿Tuvo lugar alguna vez el big bang?	154
¿Qué son unos pocos miles de millones de años entre amigos?	158
Un problema repulsivo	162
El universo indolente	165
7. <i>El tiempo cuántico</i>	169
Tiempo para hacer un túnel	169
Observar pucheros	172
Borrar el pasado	175
Señales fantasmales y partículas videntes	180
¿Más rápido que la luz?	183
¡El tiempo desaparece!	184
8. <i>El tiempo imaginario</i>	189
Las dos culturas revisadas	189
Cómo empezó el tiempo	191
La teoría de Hartle-Hawking	194
Relojes imaginarios	199
9. <i>La flecha del tiempo</i>	202
Coger la onda	202

Señales del futuro	207
Una cuestión de inversión temporal	210
La partícula que puede indicar el tiempo	214
El universo sesgado	220
10. <i>Hacia atrás en el tiempo</i>	226
Marcha atrás	226
Pensar hacia atrás	229
Antimundos	231
Dar cuerda al reloj	233
El mayor error de Hawking	237
Un tiempo para todos	238
11. <i>Viajes en el tiempo: ¿realidad o fantasía?</i>	241
Hacer señales al pasado	241
Visitar el pasado	244
Máquinas del tiempo en los agujeros negros	251
Agujeros de gusano y cuerdas	253
Paradojas	257
12. <i>Pero ¿qué hora es «ahora»?</i>	261
¿Puede fluir realmente el tiempo?	261
El mito del paso del tiempo	264
¿Vuela la flecha del tiempo?	266
¿Por qué ahora?	267
13. <i>Experimentar con el tiempo</i>	274
¿Cuánto dura el presente?	274
Ahora lo ves, ahora no lo ves	276
Llenar el tiempo	279
Tiempo subjetivo	282
La puerta trasera de nuestras mentes	284
14. <i>La revolución inacabada</i>	289
<i>Epílogo</i>	295
Notas	297
Bibliografía	304
Índice alfabético	307

PAUL Davies, profesor de la Universidad de Adelaide y autor de obras de divulgación científica tan famosas como *La mente de Dios* o *El universo desbocado*, nos ofrece ahora un libro extraordinario, entretenido y accesible, acerca de los misterios del tiempo, que toma el tema donde Hawking lo había dejado, para sintetizar las últimas teorías en este apasionante campo de investigación y hacer nuevas e imaginativas propuestas.

Las teorías de Einstein transformaron por completo nuestra concepción del tiempo, pero esta revolución quedó inacabada. Necesitamos ir más allá: alcanzar una comprensión más profunda del tiempo y de su relación con el resto del universo. Davies nos muestra que las teorías actuales son incapaces de explicar a la vez por qué el tiempo se detiene en los agujeros negros y se desvanece en el mundo de la física

cuántica, y nos propone un nuevo modo de enfocar las cuestiones que puede ayudarnos a resolver estos enigmas. En unas páginas fácilmente comprensibles nos habla de las paradojas que presenta la perspectiva del viaje en el tiempo (científicamente posible), de los kaones subatómicos y la expansión del universo, de antimundos hipotéticos en que el tiempo fluye al revés... Y se plantea preguntas inquietantes como la de por qué el universo parece ser más joven que algunos de los objetos que encontramos en él.

Michio Kaku, el autor de *Hiperespacio*, ha dicho de este libro: «Ya era hora de que alguien escribiera la historia definitiva del tiempo, y no puedo pensar en alguien más adecuado para hacerlo que Paul Davies, que escribe de manera clara y accesible, a la vez que con un estilo ingenioso y entretenido. Este libro le hubiera gustado al propio Einstein».



ISBN: 84-7423-798-X



9 788474 237986