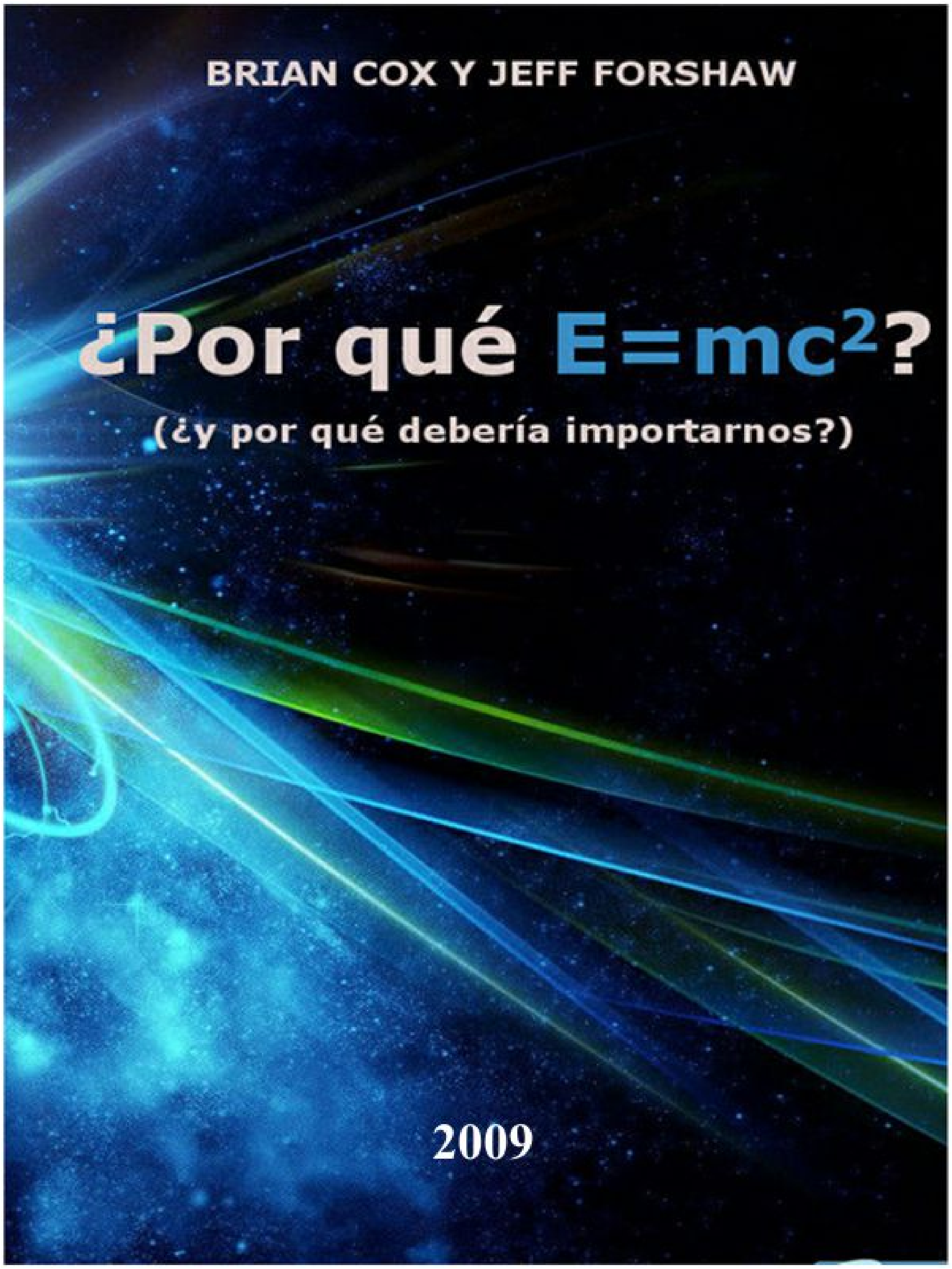
BRIAN COX Y JEFF FORSHAW
¿Por qué E=mc²?
(¿y por qué debería importarnos?)
2009

¿Qué significa en realidad $E = mc^2$? Brian Cox y Jeff Forshaw emprenden un viaje hasta las fronteras de la ciencia del siglo XXI para descubrir qué se esconde detrás de la secuencia de símbolos que conforman la ecuación más famosa de Einstein. Explicando y simplificando las nociones de energía, masa y luz, demuestran que es la ecuación contiene la estructura misma de la naturaleza. Para ello nos llevan hasta el CERN, en Ginebra, donde tiene lugar uno de los experimentos científicos más importantes y ambiciosos de todos los tiempos: el gran colisionador de hadrones, el famoso acelerador de partículas capaz de recrear las condiciones que existían en el universo fracciones de segundo después del big bang. ¿Por qué $E = mc^2$?, *best seller* aclamado por la crítica internacional, expone una de las explicaciones más fascinantes y accesibles sobre la teoría de la relatividad y sobre cómo se relaciona con nuestro mundo contemporáneo.

Índice

A nuestras familias, en especial a Gia, Mo, George,
David, Barbara, Sandra, Naomi,
Isabel, Sylvia, Thomas y Michael

Agradecimientos

Queremos darles las gracias a nuestros agentes y representantes, Susan, Diane y George, y a nuestros editores, Ben y Cisca. De entre nuestros colegas científicos, estamos particularmente agradecidos a Richard Battye, Fred Loebinger, Robin Marshall, Simone Marzani, Ian Morison y Gavin Smith. Queremos extender un agradecimiento especial a Naomi Baker, en particular por sus comentarios sobre los primeros capítulos, y a Gia Milinovich, por plantear la pregunta.

Prefacio

El objetivo de este libro es describir la teoría de Einstein sobre el espacio y el tiempo de la forma más sencilla posible y poner de manifiesto su profunda belleza. Esto nos permitirá llegar a su famosa ecuación $E = mc^2$ utilizando matemáticas apenas más complicadas que el teorema de Pitágoras (no te preocupes si no recuerdas este teorema, porque también lo explicaremos). Otra motivación importante de este breve libro es tratar de que todos aquellos que lo terminen entiendan qué es lo que los físicos modernos piensan sobre la naturaleza y cómo construyen sus teorías, extraordinariamente útiles y capaces de cambiarnos la vida. Al desarrollar su modelo del espacio y del tiempo, Einstein abrió el camino para llegar a entender cómo brillan las estrellas, reveló el fundamento profundo del funcionamiento de los motores y generadores eléctricos y, en última instancia, colocó los cimientos sobre los que se erige toda la física moderna. Este libro también pretende ser provocativo y estimulante. La física en sí no se cuestiona: las teorías de Einstein están firmemente establecidas y cuentan con el respaldo de una enorme cantidad de evidencias experimentales, como iremos viendo a lo largo del libro. Es muy importante hacer hincapié en que, llegado el momento, es posible que el modelo de Einstein tenga que cederle el lugar a una representación aún más precisa de la naturaleza. En ciencia no existen las verdades universales, sino únicamente formas de ver el mundo que aún no hemos podido demostrar que sean falsas. Lo único que podemos afirmar con seguridad es que, de momento, la teoría de Einstein funciona. La provocación reside, pues, en la forma en la que la ciencia nos espolea a pensar sobre el mundo que nos rodea. Seamos científicos o no, cada uno de nosotros posee intuición, y todos inferimos cosas sobre el mundo a partir de nuestras experiencias cotidianas. No obstante, si sometemos nuestras observaciones al escrutinio frío y preciso del método científico, descubrimos con frecuencia que la naturaleza engaña a nuestra intuición. A lo largo del libro, descubriremos que cuando los objetos se mueven de aquí para allá a grandes velocidades nuestras ideas preconcebidas sobre el espacio y el tiempo saltan en mil pedazos, siendo reemplazadas por algo completamente nuevo, inesperado y elegante. Es una oportuna lección de humildad, que provoca en muchos científicos una sensación de asombro: el universo es mucho más rico de lo que nuestras experiencias cotidianas nos dan a entender. Quizá lo más importante de todo sea el hecho de que la nueva física, con toda su riqueza, rebosa de una elegancia matemática arrebatadora.

Por difícil que a veces parezca, la ciencia no es, en esencia, una disciplina complicada. Podríamos incluso decir que se trata de un intento de deshacernos de nuestros prejuicios innatos y así poder observar el mundo de la manera más objetiva posible. Se acercará más o menos a ese objetivo, pero pocos pueden poner en duda su capacidad para enseñarnos cómo «funciona» el universo. Lo que realmente nos cuesta es aprender a desconfiar de lo que preferiríamos creer que es sentido común. Al enseñarnos a aceptar la naturaleza tal y como es, y no como nuestros prejuicios nos llevan a pensar que debería ser, el método científico ha engendrado el mundo tecnológico moderno. En una palabra, funciona.

En la primera mitad del libro deduciremos la ecuación $E = mc^2$. Con «deducir» nos referimos a que veremos cómo Einstein llegó a la conclusión de que la energía es igual a la masa multiplicada por la velocidad de la luz al cuadrado, que es lo que dice la ecuación. Si te paras un momento a pensarlo, puede parecer muy raro. Quizá la forma más conocida de energía sea la energía del movimiento: si alguien te tira una pelota de críquet a la cara, te dolerá. Un físico diría que el lanzador le suministró energía a la pelota, que se transfiere a tu cara cuando esta detiene el movimiento de la pelota. La masa es una medida de la cantidad de materia que compone un objeto. Una pelota de críquet tiene más masa que una pelota de tenis de mesa, pero menos que un planeta. Lo que $E = mc^2$ dice es que la energía y la masa son intercambiables, como los dólares y los euros son intercambiables, y que la velocidad de la luz al cuadrado es el tipo de cambio. ¿Cómo pudo Einstein llegar a esta conclusión y cómo es posible que la velocidad de la luz apareciese en una ecuación sobre la relación entre la energía y la masa? No asumimos ningún conocimiento científico previo y evitaremos las matemáticas siempre que podamos. No obstante, sí buscamos ofrecer al lector una explicación real de la ciencia, y no una mera descripción. En este sentido en particular, confiamos en ofrecer algo nuevo.

En la parte final del libro, veremos cómo $E = mc^2$ constituye la base de nuestra manera de entender el funcionamiento del universo. ¿Por qué brillan las estrellas? ¿Por qué la energía nuclear es mucho más eficiente que el carbón o el petróleo? ¿Qué es la masa? Esta pregunta nos llevará a adentrarnos en el mundo de la física de partículas moderna, el gran colisionador de hadrones del CERN, en Ginebra, y la búsqueda de la partícula de Higgs, que podría proporcionarnos una explicación del origen mismo de la masa. El libro termina con el extraordinario descubrimiento, que debemos a Einstein, de que la estructura del espacio y del tiempo es en última instancia responsable de la fuerza de gravedad, y la extraña idea de que la Tierra está cayendo «en línea recta» alrededor del Sol.

Capítulo 1
Espacio y tiempo

¿Qué significan para ti las palabras «espacio» y «tiempo»? Puede que te imagines el espacio como la oscuridad que ves entre las estrellas cuando alzas la mirada hacia el firmamento en una fría noche de invierno. O quizá te imagines una nave espacial revestida de aluminio dorado que surca el vacío entre la Tierra y la Luna, engalanada con la bandera estadounidense, pilotada hacia la desolada inmensidad por exploradores de cabeza rapada con nombres como Buzz. El tiempo puede ser el tictac de tu reloj o la manera que tienen las hojas de teñirse de rojo cuando el recorrido anual de la Tierra alrededor del Sol hace que las sombras se alarguen sobre las latitudes septentrionales por cinco milmillonésima vez. Todos sentimos intuitivamente el tiempo y el espacio, forman parte del tejido de nuestra existencia. Nos movemos a través del espacio sobre la superficie de nuestro planeta azul viendo pasar el tiempo.

Durante los últimos años del siglo XIX, una serie de avances científicos en campos aparentemente muy distintos entre sí obligaron a los físicos a revisar esta imagen sencilla e intuitiva del espacio y el tiempo. A principios del siglo XX, Hermann Minkowski, colega y mentor de Albert Einstein, sintió la necesidad de escribir su famoso obituario de ese escenario dentro del cual los planetas orbitaban y donde se emprendían grandes viajes: «De ahora en adelante, el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo están destinados a desvanecerse entre las sombras, y solo una especie de mezcla de ambos tendrá una existencia independiente».

¿A qué se refería Minkowski con una mezcla del espacio y el tiempo? Entender esta frase, con un toque místico, equivale a entender la teoría de la relatividad especial de Einstein, la teoría que dio al mundo la ecuación más famosa de todas, $E = mc^2$, y puso para siempre en primer plano de nuestra forma de ver el universo la magnitud que se oculta tras el símbolo c, la velocidad de la luz.

La teoría de la relatividad especial de Einstein es básicamente una descripción del espacio y el tiempo. Para la teoría es fundamental la idea de una velocidad especial, que nada en el universo, por muy potente que sea, puede superar. Es la velocidad de la luz: 299.792.458 metros por segundo en el vacío del espacio intergaláctico. A esta velocidad, un destello de luz emitido desde la Tierra tarda unos ocho minutos en llegar al Sol, 100.000 años en atravesar nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, y más de dos millones de años en alcanzar la galaxia más próxima, Andrómeda. Esta noche, los mayores telescopios que existen en la Tierra levantarán la vista hacia la oscuridad del espacio y captarán la antigua luz de soles distantes y muertos hace mucho tiempo, situados en los confines del universo observable. Esta luz inició su recorrido hace más de 10.000 millones de años, varios miles de millones de años antes de que el colapso de una nube de polvo interestelar diese lugar a la formación de la Tierra. La velocidad de la luz es alta, pero no es, ni remotamente, infinita. Comparada con las enormes distancias que separan las estrellas y las galaxias, su lentitud puede ser frustrante; hasta tal punto que nosotros mismos somos capaces de acelerar objetos diminutos hasta velocidades extraordinariamente próximas a la de la luz con máquinas como el gran colisionador de hadrones, de 27 kilómetros de longitud, en el Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN), en la ciudad de Ginebra, en Suiza.

La existencia de esa velocidad especial, un límite de velocidad cósmico, es una idea extraña. Como descubriremos más adelante en el libro, vincular esta velocidad especial con la velocidad de la luz resulta ser en cierta manera una cortina de humo. De hecho, desempeña un papel todavía mucho más importante en el universo de Einstein, y existen motivos de peso por los que la velocidad de la luz es la que es. Eso lo veremos más adelante, de momento bastará con decir que, cuando los objetos se aproximan a esa velocidad especial, empiezan a pasar cosas extrañas. ¿Cómo es posible si no que un objeto no pueda superar esa velocidad? Es como si existiese una ley universal de la física que impidiese que tu coche pasase de los 120 kilómetros por hora, por muy potente que fuese su motor. No obstante, a diferencia del límite de velocidad, esta ley no necesitaría que una policía etérea garantizase su cumplimiento. El propio tejido del espacio y el tiempo está construido de tal manera que, por fortuna, es absolutamente imposible incumplir esta ley, pues de lo contrario las consecuencias serían desagradables. Más adelante veremos que, si fuese posible superar la velocidad de la luz, podríamos construir máquinas capaces de transportarnos a cualquier instante del pasado. Podríamos viajar a un momento anterior a nuestro nacimiento y, conscientemente o no, hacer que nuestros padres no se llegasen a conocer nunca. Todo esto constituye un excelente material para la ciencia ficción, pero no es forma de construir un universo, y Einstein descubrió que, en efecto, el universo no estaba hecho así. El espacio y el tiempo están cuidadosamente entretejidos de tal manera que paradojas como estas no pueden darse. Sin embargo, esto tiene un precio: debemos abandonar nuestras ideas profundamente arraigadas sobre el espacio y el tiempo. En el universo de Einstein los relojes en movimiento marcan el tiempo más despacio, los objetos en movimiento se encogen, y podemos viajar a miles de millones de años en el futuro. Es un universo en el que la duración de una vida humana puede estirarse casi indefinidamente. Podríamos presenciar la muerte del Sol, ver cómo los océanos terrestres se evaporan y cómo nuestro sistema solar se sumerge en una oscuridad perpetua. Podríamos contemplar el nacimiento de estrellas a partir de remolinos de polvo cósmico, la formación de planetas y quizá incluso los orígenes de la vida en mundos nuevos, aún inexistentes. El universo de Einstein nos permite viajar hacia el futuro lejano, pero mantiene las puertas del pasado firmemente cerradas.

En la última parte del libro, veremos cómo Einstein no tuvo más remedio que llegar a esa fantástica visión de nuestro universo, y cómo muchos experimentos científicos y aplicaciones tecnológicas han demostrado que esa imagen es correcta. El sistema de navegación por satélite de tu coche, por ejemplo, está diseñado de forma que tiene en cuenta que el tiempo transcurre a una velocidad distinta en los satélites que orbitan alrededor de la Tierra que sobre su superficie. La visión de Einstein es radical: el espacio y el tiempo no son lo que parecen.

Pero nos estamos adelantando. Para entender y valorar el descubrimiento fundamental de Einstein, primero tenemos que pensar con mucho detenimiento sobre los dos conceptos que forman el núcleo de la teoría de la relatividad: el espacio y el tiempo.

Imagina que estás leyendo un libro mientras viajas en avión. A las 12.00 miras tu reloj, decides dejar de leer, te levantas y vas a hablar con tu amigo, sentado diez filas por delante de ti. A las 12.15 vuelves a tu sitio, te sientas y retomas el libro. El sentido común te dice que has vuelto al mismo sitio. Has tenido que recorrer las mismas diez filas para volver a tu asiento, y al hacerlo te has encontrado el libro donde lo habías dejado. Detente un momento en la idea de «el mismo lugar». Puede parecer algo puntilloso, porque es intuitivamente obvio a qué nos referimos cuando hablamos de un lugar. Podemos llamar a un amigo y quedar en un bar para tomar algo, y cuando lleguemos allí el bar seguirá en su sitio. Estará en el mismo lugar donde lo habíamos dejado, muy probablemente la noche anterior. Muchas de las cosas que veremos en este capítulo inicial parecerán puntillosas en un primer momento, pero verás que tienen su sentido. Pensar con detenimiento sobre estos conceptos aparentemente obvios nos permitirá seguir los pasos de Aristóteles, Galileo Galilei, Isaac Newton y Einstein. ¿Cómo podríamos, pues, definir con precisión lo que queremos decir con «el mismo lugar»? Sabemos cómo hacerlo en la superficie terrestre: dibujando sobre un globo terráqueo una cuadrícula formada por líneas de latitud y longitud. Se puede definir cualquier punto de la superficie terrestre mediante dos números, que representan su posición en la cuadrícula. Por ejemplo, la ciudad de Manchester, en el Reino Unido, está situada a 53 grados y 30 minutos de latitud norte y 2 grados y 15 minutos de longitud oeste. Estos dos números nos indican con precisión dónde se encuentra Manchester, suponiendo que nos hayamos puesto de acuerdo sobre la ubicación del ecuador y el meridiano de Greenwich. Por tanto, trazando una sencilla analogía, una forma de especificar la ubicación de cualquier punto, tanto en la superficie de la Tierra como fuera de ella, sería imaginando una cuadrícula tridimensional que se extendiese hacia el cielo desde la superficie terrestre. De hecho, la cuadrícula también continuaría hacia el centro de la Tierra y saldría por el extremo opuesto del planeta. Entonces, podríamos utilizar su posición relativa respecto a la cuadrícula para describir dónde se encuentra cualquier objeto en el mundo, tanto si está en el aire como en la superficie o bajo tierra. De hecho, no tendríamos por qué limitarnos a nuestro planeta. La cuadrícula podría extenderse hacia la Luna, pasar por Júpiter, Neptuno y Plutón y dejar atrás la galaxia de la Vía Láctea para llegar hasta los confines más lejanos del universo. Tomando como referencia nuestra cuadrícula gigante, infinita incluso, podemos determinar dónde están todos los objetos, algo que, parafraseando a Woody Allen, es muy útil si eres de los que nunca recuerdan dónde han dejado las cosas. Nuestra cuadrícula define, por tanto, el escenario dentro del cual existen todas las cosas, una especie de caja gigante que contiene todos los objetos del universo. Es posible incluso que nos sintamos tentados de llamar a este escenario «espacio».

Volvamos a la pregunta de qué es lo que queremos decir con «el mismo lugar» y al ejemplo del avión. Puedes pensar que a las 12.00 y a las 12.15 estabas en el mismo punto del espacio. Imagina ahora cómo vería la sucesión de acontecimientos una persona que mirase al avión desde el suelo. Al ver cómo el avión la sobrevuela a unos 1.000 kilómetros por hora, ella diría que entre las 12.00 y las 12.15 te has desplazado casi 250 kilómetros. Dicho de otro modo, a las 12.00 y a las 12.15 tú estabas en distintos puntos del espacio. ¿Quién tiene razón? ¿Quién se ha movido y quién ha permanecido inmóvil?

Si no tienes respuesta para esta pregunta aparentemente sencilla, no eres el único. Aristóteles, uno de los grandes pensadores de la antigua Grecia, se equivocó por completo. Aristóteles no habría dudado en decir que eres tú, el pasajero del avión, el que se está moviendo. Aristóteles pensaba que la Tierra estaba inmóvil en el centro del universo. El Sol, la Luna, los planetas y las estrellas giraban a su alrededor, acoplados a cincuenta y cinco esferas cristalinas concéntricas, que estaban encajadas las unas dentro de las otras como muñecas rusas. Compartía, pues, con nosotros la idea intuitivamente satisfactoria de que el espacio es como un escenario o estadio que ocupan la Tierra y las esferas. Desde la perspectiva de la modernidad, esta idea de un universo formado únicamente por la Tierra y un conjunto de esferas giratorias resulta algo pintoresca. Pero imagina por un momento qué pensarías si nadie te hubiese contado que la Tierra gira alrededor del Sol y que las estrellas son soles lejanos, algunas de ellas muchos miles de veces más brillantes que nuestra estrella, pero a miles de millones de kilómetros de distancia. Desde luego, no sentimos que la Tierra esté a la deriva en un universo de un tamaño inconcebible. Nos ha costado un gran esfuerzo llegar a la forma moderna de ver el mundo, que muchas veces va contra nuestra intuición. Si la imagen del universo que hemos ido construyendo a lo largo de miles de años de experimentos y reflexión fuese evidente, los grandes pensadores de la historia, como Aristóteles, la habrían deducido por sí mismos. Esto es algo que conviene tener presente si alguno de los conceptos del libro te resulta difícil de entender: es muy probable que a las mentes más brillantes de la antigüedad les hubiese pasado lo mismo.

Para ver dónde está el error en la respuesta de Aristóteles, demos por buena su imagen del universo por un momento y veamos adónde nos lleva. Según Aristóteles, deberíamos rellenar el espacio con una cuadrícula de líneas imaginarias centradas en la Tierra y, tomándola como referencia, podríamos definir la posición de todos los objetos y determinar quién se está moviendo. Si aceptamos esta visión del universo como una caja llena de objetos en cuyo centro se encuentra fija la Tierra, entonces es evidente que tú, que vas en el avión, has cambiado de posición en la caja, mientras que la persona que te ve pasar por el aire desde la superficie terrestre se encuentra inmóvil en el espacio. Un objeto está en movimiento absoluto si, con el tiempo, varía su posición en el espacio en relación con la cuadrícula imaginaria fija respecto al centro de la Tierra.

Evidentemente, uno de los problemas de esta representación es que la Tierra no está inmóvil en el centro del universo, sino que es una bola que gira sobre sí misma mientras describe una órbita alrededor del Sol. De hecho, la Tierra se mueve a más de 100.000 kilómetros por hora respecto al Sol. Si te vas a la cama por la noche y duermes ocho horas, cuando te despiertes habrás recorrido más de 800.000 kilómetros. Incluso podrías decir que, en unos 365 días, habrás vuelto exactamente al mismo punto en el espacio, ya que la Tierra habrá completado una órbita alrededor del Sol. Podrías entonces decidir modificar ligeramente esta visión, manteniendo intacto el espíritu de Aristóteles. ¿Por qué no situar el centro de la cuadrícula en el Sol? Es una idea sencilla, pero errónea, porque el propio Sol también orbita alrededor del centro de la galaxia de la Vía Láctea. La Vía Láctea es nuestra isla de más de 200.000 millones de soles y, como puedes imaginar, es tan enorme que se tarda mucho tiempo en dar una vuelta a su alrededor. El Sol, con la Tierra a rastras, se desplaza por la Vía Láctea a unos 780.000 kilómetros por hora, a una distancia de 250.000 billones de kilómetros de su centro. A esa velocidad, se tardan 226 millones de años en completar una órbita. Entonces, quizá bastaría un paso más para preservar a Aristóteles. Si hiciésemos coincidir el centro de la cuadrícula con el de la Vía Láctea, podría pasar por la cabeza otra idea evocadora: tumbado en tu cama, imagina cómo sería el mundo la última vez que la Tierra estuvo «aquí», en este punto preciso del espacio. Un dinosaurio pastaba al amanecer, comiendo hojas prehistóricas en el lugar donde ahora está tu dormitorio. Un nuevo error. De hecho, las propias galaxias se alejan unas de otras a gran velocidad, mayor cuanto más grande es la distancia que las separa. Parece realmente difícil dilucidar cómo nos movemos entre la enorme multitud de galaxias que componen el universo.

Así pues, Aristóteles tiene un problema, porque parece imposible definir exactamente qué significa «estar inmóvil». En otras palabras, parece imposible precisar dónde habría que centrar la cuadrícula imaginaria que nos serviría para determinar la posición de todas las cosas y decidir así cuáles se están moviendo y cuáles no. El propio Aristóteles nunca tuvo que enfrentarse a este problema, porque su visión de una Tierra inmóvil rodeada por esferas giratorias no se puso verdaderamente en entredicho durante casi 2.000 años. Quizá debería haber sucedido antes, pero, como ya hemos dicho, estas cosas distan mucho de ser evidentes incluso para las mentes más preclaras. Claudio Ptolomeo trabajó en la Biblioteca de Alejandría, en Egipto, en el siglo II de nuestra era. Era un observador atento del cielo nocturno y le interesaba el movimiento aparentemente extraño a través del firmamento de las cinco «estrellas errantes» (ese es el significado de la palabra «planeta») que se conocían por aquel entonces. Si se observan desde la Tierra a lo largo de muchos meses, los planetas no siguen una trayectoria regular sobre el fondo estrellado, sino que describen tirabuzones en el cielo. Este extraño recorrido se denomina movimiento retrógrado, y ya era conocido miles de años antes de Ptolomeo. Los antiguos egipcios se referían a Marte como «el planeta que se mueve hacia atrás». Ptolomeo coincidía con Aristóteles al afirmar que los planetas giraban alrededor de una Tierra inmóvil, pero para explicar su movimiento retrógrado se vio abocado a acoplarlos a pequeñas ruedas giratorias excéntricas, conectadas a su vez a las esferas giratorias. Este complicado modelo permitía explicar el movimiento de los planetas a través del firmamento nocturno, aunque distaba mucho de ser elegante. Para llegar a la explicación correcta del movimiento retrógrado hubo que esperar hasta mediados del siglo XVI, cuando Nicolás Copérnico propuso una descripción más elegante (y más correcta), según la cual la Tierra no se encuentra estacionaria en el centro del universo, sino que orbita alrededor del Sol, junto con el resto de los planetas. El trabajo de Copérnico se topó con importantes detractores y estuvo incluido en el índice de libros prohibidos por la Iglesia católica hasta 1835. Las precisas mediciones realizadas por Tycho Brahe, junto con el trabajo de Johannes Kepler, Galileo y Newton, no solo demostraron finalmente que Galileo estaba en lo cierto, sino que dieron pie a una teoría del movimiento planetario, en la forma de las leyes de Newton del movimiento y de la gravedad. Estas leyes constituyeron nuestra mejor descripción del movimiento de las estrellas errantes, y de hecho de cualquier objeto bajo la influencia de la gravedad, de las galaxias en rotación a los proyectiles de artillería, hasta la aparición de la teoría de la relatividad general de Einstein en 1915.

La continua evolución de nuestra forma de entender la posición de la Tierra y de los planetas y su movimiento por el firmamento debería servir de lección para cualquiera que esté absolutamente convencido de que sabe algo. En el mundo hay muchas cosas que a primera vista parecen evidentemente ciertas, y una de ellas es que estamos inmóviles en el universo. Siempre cabe la posibilidad de que las observaciones futuras nos sorprendan, cosa que sucede con frecuencia. Aunque probablemente no debería sorprendernos demasiado el hecho de que la naturaleza en ocasiones no le resulte intuitiva a una tribu de observadores descendientes de simios, compuestos de carbono, que se pasean por la superficie de un mundo rocoso que orbita alrededor de una estrella de mediana edad situada en los confines de la galaxia de la Vía Láctea. Las teorías del espacio y del tiempo que veremos en este libro bien podrían resultar aproximaciones de una teoría más fundamental aún por descubrir (de hecho, es probable que acaben siéndolo). La ciencia es una disciplina que celebra la duda, y la clave de su éxito radica en admitirlo.

Galileo Galilei nació veinte años después de que Copérnico propusiese su modelo heliocéntrico del universo, y reflexionó en profundidad sobre lo que significaba el movimiento. Su intuición probablemente coincidía con la nuestra: nos parece que la Tierra está quieta, aunque el movimiento de los planetas en el firmamento indica insistentemente lo contrario. La ocurrencia genial de Galileo consistió en extraer una conclusión profunda de esta aparente paradoja. Parece que estamos quietos, aunque sabemos que nos movemos en órbita alrededor del Sol, porque no hay manera, ni siquiera en principio, de decidir qué es lo que está quieto y qué lo que se mueve. Dicho de otro modo, solo tiene sentido hablar del movimiento relativo respecto a algo. Esta idea es de una importancia extraordinaria. En cierto sentido puede parecer obvia, pero para apreciar completamente su contenido es necesario detenerse a pensar lo que implica. Puede parecer obvia porque, claramente, cuando te sientas en el avión con tu libro, este no se mueve respecto a ti. Si dejas el libro en la mesilla, permanece a una distancia constante de ti. Y, por supuesto, desde el punto de vista de alguien que se encuentre en el suelo, el libro se desplaza por el aire junto con el avión. El verdadero contenido de la idea de Galileo es que esto es lo único que puede afirmarse. Si todo lo que puedes hacer es hablar de cómo el libro se mueve respecto a ti cuando estás sentado en el avión, o respecto al suelo, o respecto al Sol, o respecto a la Vía Láctea, pero siempre respecto a algo, entonces el concepto de movimiento absoluto es superfluo.

Esta provocativa afirmación suena superficialmente profunda, a la manera de las frases de inspiración zen tan típicas de los videntes. No obstante, en este caso la idea resulta ser verdaderamente genial; la reputación de Galileo es merecida. Para ver por qué, supongamos que queremos saber si la cuadrícula de Aristóteles, mediante la cual podríamos precisar si algún objeto está en movimiento absoluto, es útil desde un punto de vista científico, lo que implica determinar si la idea tiene consecuencias observables, es decir, si tiene algún efecto que pueda detectarse a través de un experimento. Con «experimento» nos referimos a cualquier medida de lo que sea; la oscilación de un péndulo, el color de la luz que emite la llama de una vela o las colisiones de partículas subatómicas en el gran colisionador de hadrones (LHC, Large Hadron Collider) del CERN (volveremos sobre este experimento más adelante). Si una idea no tiene consecuencias observables, entonces no es necesaria para entender el funcionamiento del universo, aunque podamos darle algún supuesto valor al hecho de que nos reconforte.

Esta es una forma muy eficaz de separar el grano de la paja en un mundo pleno de ideas y opiniones diversas. En su analogía de la tetera de porcelana, el filósofo Bertrand Russell pone de manifiesto la futilidad de aferrarse a conceptos que carecen de consecuencias observables. Russell afirma que él cree que entre la Tierra y Marte orbita una tetera de porcelana tan pequeña que ni siquiera el más potente de los telescopios puede detectarla. Si se construyese un telescopio aún mayor y, tras rastrear detenida y exhaustivamente todo el firmamento, siguiese sin encontrar rastro alguno de la tetera, Russell diría entonces que esta es algo más pequeña de lo que cabía esperar, pero que sigue existiendo. Esto es lo que se conoce comúnmente como cambiar las reglas a mitad del juego. Aunque la tetera nunca se llegue a observar, dudar de su existencia es para Russell de una «presuntuosidad intolerable» por parte de la humanidad. De hecho, el resto de la humanidad debería respetar su opinión, por muy ridícula que parezca. Lo que Russell busca no es reafirmar su derecho a que le dejen tranquilo con sus delirios personales, sino poner de manifiesto que carece de sentido elaborar una teoría que no puede probarse ni refutarse mediante observaciones, en la medida en que no permite aprender nada, por muy convencido que estés de su validez. Puedes concebir cualquier objeto o idea, pero si no hay forma de observarlos, directamente o a través de sus consecuencias, no has contribuido a la comprensión científica del universo. Asimismo, la idea del movimiento absoluto solo tendrá algún sentido en un contexto científico si podemos imaginar algún experimento para detectarlo. Por ejemplo, podríamos instalar un laboratorio de física en un avión y realizar medidas de alta precisión de cualquier fenómeno físico, en un último y osado intento de detectar nuestro movimiento. Podríamos poner en movimiento un péndulo y medir el tiempo que tarda en completar una oscilación, podríamos llevar a cabo experimentos eléctricos con baterías, generadores y motores, o podríamos ver cómo se producen reacciones nucleares y realizar mediciones de la radiación emitida. En principio, si tuviésemos una aeronave lo suficientemente grande, podríamos llevar a cabo prácticamente cualquiera de los experimentos que se han realizado a lo largo de la historia de la humanidad. La idea clave que constituye la base de este libro y es también una de las piedras angulares de la física moderna es que, suponiendo que el avión no acelera ni desacelera, ninguno de los experimentos permitirá saber si nos estamos moviendo. Ni siquiera el hecho de mirar por la ventana nos dará información al respecto, porque es igualmente correcto decir que es el suelo el que se mueve a casi 1.000 kilómetros por hora, mientras nosotros estamos inmóviles. Todo lo que podemos decir es que «permanecemos estacionarios respecto al avión» o que «nos movemos respecto al suelo». Este es el principio de relatividad de

Galileo: no existe el movimiento absoluto, porque no se puede detectar experimentalmente. Es muy probable que esto no te sorprenda, porque en realidad ya lo sabemos de manera intuitiva. Un buen ejemplo es la experiencia de estar sentados en un tren parado mientras el tren de la vía contigua empieza a salir lentamente de la estación. Durante unas décimas de segundo nos parece que somos nosotros quienes nos movemos. Nos cuesta detectar el movimiento absoluto porque no existe tal cosa.

Todo esto puede parecer bastante filosófico, pero lo cierto es que este tipo de reflexiones llevan a conclusiones profundas sobre la naturaleza del propio espacio, y nos permiten dar el primer paso en el camino hacia las teorías de la relatividad de Einstein. Entonces, ¿qué conclusión sobre el espacio cabe extraer del razonamiento de Galileo? La siguiente: si en principio es imposible detectar el movimiento absoluto, la idea de una cuadrícula especial que define lo que significa «en reposo» carece de valor alguno, y tampoco lo tiene, por tanto, el concepto de espacio absoluto.

Esto es importante, así que lo estudiaremos con más detalle. Ya hemos visto que, si fuese posible definir una cuadrícula aristotélica especial que cubriese todo el universo, el movimiento respecto a ella podría definirse como absoluto. También hemos razonado que, puesto que no es posible diseñar un experimento que nos permita saber si estamos en movimiento, deberíamos abandonar la idea de la cuadrícula, sencillamente porque nunca podríamos determinar a qué debería acoplarse. Pero entonces, ¿cómo deberíamos definir la posición absoluta de un objeto? En otras palabras, ¿dónde nos encontramos en el universo? Sin la cuadrícula especial de Aristóteles, estas preguntas no tienen significado científico. Solo podemos hablar de las posiciones relativas de los objetos. Por tanto, no hay forma de especificar posiciones absolutas en el espacio, y es a eso a lo que nos referimos cuando decimos que la propia idea de espacio absoluto carece de significado. Imaginar el universo como una caja gigante dentro de la cual las cosas se mueven de un sitio a otro es superfluo para los experimentos. No podemos insistir lo suficiente en la importancia de este razonamiento. El gran físico Richard Feynman dijo una vez que, sea cual sea tu nombre, por muy inteligente que seas, por muy bella que sea tu teoría, si no concuerda con los experimentos es errónea. En esta afirmación radica la clave de la ciencia. Dándole la vuelta, si un concepto no puede ponerse a prueba experimentalmente no tenemos manera de saber si es correcto o erróneo, pero en cualquier caso carece de importancia. Obviamente, esto significa que podríamos suponer que una idea es cierta aunque no haya forma de demostrarlo, pero al hacerlo corremos el riesgo de entorpecer futuros avances al aferrarnos a un prejuicio innecesario. Por lo tanto, puesto que no hay manera posible de identificar una cuadrícula especial, quedamos liberados de la idea del espacio absoluto, así como del concepto de movimiento absoluto. ¿Y eso qué implica? Para Einstein, quitarse de encima la cruz del espacio absoluto fue fundamental en el desarrollo de su teoría del espacio y del tiempo, pero para verlo habrá que esperar hasta el capítulo siguiente. De momento, hemos alcanzado la libertad, pero aún no nos hemos comportado como científicos libres. Para abrir boca, empecemos por dejar claro que, si no existe el espacio absoluto, no hay ningún motivo por el que dos observadores deban ponerse necesariamente de acuerdo en el tamaño de un objeto determinado. Esto debería resultarte muy extraño —si una pelota tiene un diámetro de 4 centímetros, no hay más que hablar—, pero sin el espacio absoluto no tiene por qué ser así.

Hasta ahora hemos tratado con cierto detalle la conexión entre el movimiento y el espacio. ¿Qué hay del tiempo? El movimiento se expresa a través de la velocidad, y la velocidad se mide en kilómetros por hora (es decir, la distancia recorrida en el espacio en un determinado intervalo de tiempo). Así que la idea del tiempo ya ha entrado en nuestros razonamientos. ¿Tenemos algo que decir sobre el tiempo? ¿Podemos hacer algún experimento para demostrar que el tiempo es absoluto, o también deberíamos abandonar esta idea, aún más arraigada? Aunque Galileo desechó la idea del espacio absoluto, su razonamiento no tiene nada que aportarnos en lo que se refiere al tiempo absoluto. Según Galileo, el tiempo es inmutable, lo que significa que es posible imaginar pequeños relojitos perfectos, todos sincronizados entre sí, que marcan el mismo tiempo en todos los puntos del universo. Habría un reloj en el avión, otro en el suelo, otro (resistente) en la superficie del Sol y otro en órbita alrededor de una galaxia lejana y, suponiendo que sean perfectamente regulares, todos marcarían la misma hora para siempre. Para nuestro asombro, resulta que esta suposición aparentemente obvia entra en contradicción con la afirmación de Galileo según la cual no existe experimento que nos permita saber si estamos en movimiento absoluto. Aunque pueda parecer increíble, la evidencia experimental que le dio la puntilla a la idea del tiempo absoluto provino de un experimento como los que muchos de nosotros hicimos en clase de física en el colegio: baterías, cables, motores y generadores. Para poder tratar la idea del tiempo absoluto, antes tenemos que hacer una parada en el siglo XIX, la edad dorada de los descubrimientos en electricidad y magnetismo.

Capítulo 2
La velocidad de la luz

Michael Faraday, hijo de un herrero del condado de Yorkshire, nació en el sur de Londres en 1791. Autodidacta, dejó la escuela a los catorce años para aprender el oficio de encuadernador. Se las ingenió para entrar en el mundo de la ciencia profesional tras asistir a una conferencia que ofreció en Londres en 1811 el científico *sir* Humphry Davy. Faraday le envió a Davy las notas que había tomado durante la conferencia, y este quedó tan impresionado por su diligente transcripción que lo nombró su ayudante científico. Faraday llegó a ser uno de los gigantes de la ciencia del siglo XIX, comúnmente reconocido como el mejor físico experimental de la historia. Se dice que Davy afirmó que Faraday había sido su mayor descubrimiento científico.

Como científicos del siglo XXI, es fácil sentir envidia al volver la vista hacia principios del siglo XIX. Faraday no necesitaba colaborar con otros 10.000 científicos e ingenieros en un CERN o poner en órbita un telescopio espacial del tamaño de un autobús de dos pisos para realizar descubrimientos reveladores. El «CERN» de Faraday cabía de sobra en su mesa de trabajo, y a pesar de ello fue capaz de llevar a cabo observaciones que condujeron directamente al abandono de la idea del tiempo absoluto. No cabe duda de que la dimensión de la ciencia ha cambiado a lo largo de los siglos, en parte porque los campos de la ciencia cuya observación no requiere de equipos tecnológicamente avanzados ya han sido objeto de estudios exquisitamente detallados. Eso no significa que no podamos encontrar en la ciencia actual ejemplos de experimentos sencillos que obtienen resultados importantes, pero sí quiere decir que suele ser necesario utilizar máquinas complejas para producir avances significativos en todas las disciplinas. En el Londres de principios de la era victoriana, Faraday no necesitó nada más exótico o más caro que unas bobinas de cable, unos imanes y una brújula para producir la primera evidencia experimental de que el tiempo no es lo que parece. La obtuvo haciendo lo que mejor saben hacer los científicos. Dispuso todos los aparatos relacionados con la recién descubierta electricidad, jugueteó con ellos y observó con atención. Uno casi puede oler el oscuro barniz de su mesa de trabajo, moteada de sombras de rollos de cable girando a la luz del gas, porque, aunque el propio Davy había asombrado a su público con demostraciones de luces eléctricas en 1802 en la Royal Institution, el mundo tendría que esperar hasta mucho más avanzado el siglo para que Thomas Edison perfeccionase la bombilla eléctrica hasta hacer posible su difusión. A principios del siglo XXI, la electricidad constituía la frontera de nuestro conocimiento en física e ingeniería.

Faraday descubrió que, al mover un imán a través de una bobina de cable, fluía por este una corriente eléctrica, siempre que el imán siguiese moviéndose. También observó que, si enviaba un pulso de corriente eléctrica por un cable, la aguja de una brújula cercana se desviaba durante el pulso. Una brújula no es más que un detector de imanes: si no fluye electricidad por el cable, la aguja se alinea con la dirección del campo magnético terrestre, señalando hacia el polo norte. El pulso eléctrico debe, por tanto, crear un cambio magnético como el de la Tierra, aunque más potente, pues la aguja de la brújula se desvía del norte magnético durante el breve instante en que pasa el pulso. Faraday se dio cuenta de que estaba observando una conexión profunda de algún tipo entre el magnetismo y la electricidad, dos fenómenos que, a primera vista, no parecen tener ninguna relación entre sí. ¿Qué tiene que ver la corriente eléctrica que fluye a través de una bombilla cuando pulsas el interruptor del salón con la fuerza que hace que las letras magnéticas se peguen a la puerta de tu nevera? Desde luego, la conexión no es obvia, y a pesar de ello Faraday, gracias a sus detalladas observaciones de la naturaleza, descubrió que las corrientes eléctricas crean campos magnéticos, y que los imanes en movimiento generan corrientes eléctricas. Estos dos sencillos fenómenos, que hoy en día se conocen como inducción electromagnética, son la base de la producción de electricidad en todas las centrales eléctricas del mundo, y de todos los motores eléctricos que usamos a diario, desde la bomba que hay en el interior de tu nevera al mecanismo de «expulsión» del reproductor de DVD. El valor de la contribución de Faraday al crecimiento del mundo industrial es incalculable.

Sin embargo, los avances en física fundamental rara vez se deben únicamente a los experimentos. Faraday quería entender el mecanismo que subyacía a sus observaciones. ¿Cómo era posible, preguntó, que un imán fuese capaz de provocar una corriente eléctrica en un cable con el que no estaba físicamente conectado? ¿Y cómo podía un pulso de corriente eléctrica hacer que la aguja de una brújula se desviase del norte magnético? Algún tipo de influencia debía atravesar el espacio vacío entre el imán, el cable y la brújula; la bobina de cable debía sentir cómo el imán la atravesaba y la brújula debía sentir la corriente. Esta influencia es lo que se conoce como campo electromagnético. Ya hemos utilizado la palabra «campo» en el contexto del campo magnético terrestre, aunque es posible que ni siquiera te dieses cuenta, porque es una palabra de uso cotidiano. De hecho, el concepto de campo es uno de los más abstractos de la física, pero también uno de los más necesarios y fructíferos para alcanzar una comprensión más profunda. Las ecuaciones que mejor describen el comportamiento de los billones de partículas subatómicas que componen el libro que estás leyendo, la mano con la que lo sostienes frente a tus ojos, e incluso tus propios ojos, son ecuaciones de campo. Faraday visualizaba sus campos como un conjunto de líneas, que él llamó líneas de flujo, que emanaban de los imanes y de los cables por los que fluía corriente. Si alguna vez has puesto un imán bajo un papel sobre el que previamente has espolvoreado virutas de hierro, habrás podido verlas por ti mismo. Un ejemplo fácil de una magnitud cotidiana que puede representarse mediante un campo es la temperatura del aire en tu habitación. Cerca del radiador, la temperatura será más caliente; junto a la ventana será más fría. Podrías imaginarte midiendo la temperatura en cada punto de la habitación e introduciendo esta enorme sucesión de números en una tabla, que sería entonces una representación del campo de temperaturas en tu habitación. En el caso del campo magnético, podrías imaginarte anotando la desviación de la aguja de una pequeña brújula en cada punto, y construyendo así una representación del campo magnético en la habitación. El campo de una partícula subatómica es aún más abstracto. Su valor en un punto del espacio te informa sobre la probabilidad de que encuentres la partícula en ese punto si la buscas. Volveremos a ver estos campos en el capítulo 7.

Es normal que te plantees por qué nos molestamos en introducir esta idea tan abstracta de campo. ¿Por qué no limitarnos a las cosas que podemos medir: la corriente eléctrica y las desviaciones de la aguja de la brújula? La idea le resultó atractiva a Faraday porque en el fondo era un hombre práctico, un rasgo que comparte con muchos de los grandes científicos e ingenieros de la revolución industrial. Su instinto le llevó a desarrollar una imagen mecánica de la conexión entre los imanes en movimiento y las bobinas de cable, pues los campos le permitían salvar la distancia entre ellos y establecer la conexión física que, según sus experimentos, debía existir. No obstante, hay una razón más profunda por la que los campos son necesarios, y por la que, para los físicos modernos, son de hecho tan reales como la corriente eléctrica y las desviaciones de la brújula. La clave para esta visión más profunda de la naturaleza radica en el trabajo del físico escocés James Clerk Maxwell. En 1931, con ocasión del centenario de su nacimiento, Einstein describió la obra de Maxwell sobre la teoría del electromagnetismo como «la más profunda y fructífera que ha dado la física desde la época de Newton». En 1864, tres años antes de la muerte de Faraday, Maxwell logró escribir un conjunto de ecuaciones que describían todos los fenómenos eléctricos y magnéticos que Faraday y muchos otros habían observado y documentado meticulosamente durante la primera mitad del siglo XIX.

Las ecuaciones son la herramienta más potente de que disponen los físicos en su intento de entender la naturaleza. También se encuentran entre las cosas que más intimidan a la mayoría de la gente en sus años de formación. Por este motivo, antes de continuar, nos parece necesario dirigirle unas breves palabras al lector aprensivo. Desde luego, somos conscientes de que no todo el mundo siente lo mismo hacia las matemáticas, por lo que rogamos un poco de paciencia a los lectores que se manejan bien con ellas, y esperamos que no interpreten lo siguiente como un signo de condescendencia. Al nivel más básico, una ecuación permite predecir los resultados de un experimento sin tener que llevarlo a cabo en la práctica. Un ejemplo muy sencillo, que utilizaremos más adelante en el libro para demostrar toda clase de resultados increíbles sobre la naturaleza del tiempo y del espacio, es el famoso teorema de Pitágoras, que relaciona las longitudes de los lados de un triángulo rectángulo. Pitágoras dice que «el cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los otros dos lados». Utilizando símbolos matemáticos, podemos escribir el teorema de Pitágoras como $x^2 + y^2 = z^2$, donde z es la longitud de la hipotenusa, que es el lado más largo del triángulo rectángulo, y x e y son las de los otros dos lados. La figura 1 ilustra la situación. Se entiende que los símbolos x, y y z sustituyen a las longitudes reales de los lados, y x^2 es la notación matemática para expresar x multiplicado por x. Por ejemplo, $3^2 = 9$, $7^2 = 49$, etcétera. El hecho de que utilicemos x, y y z no tiene ningún significado especial; podríamos utilizar cualquier otro símbolo en su lugar. Puede que el teorema de Pitágoras resultase más simpático si lo escribiésemos como

$$\text{☾}^2 + \text{✈}^2 = \text{☺}^2$$

En este caso, el símbolo de la sonrisa representa la longitud de la hipotenusa. He aquí un ejemplo de aplicación del teorema: si los dos lados más cortos del triángulo miden 3 y 4 centímetros (cm), respectivamente, el teorema nos dice que la longitud de la hipotenusa es igual a 5 centímetros, puesto que $3^2 + 4^2 = 5^2$. Evidentemente, los números no tienen por qué ser enteros. Medir las longitudes de los lados de un triángulo es un experimento, aunque bastante aburrido. Pitágoras nos evitó tener que hacerlo al escribir su ecuación, que nos permite calcular fácilmente la longitud del tercer lado de un triángulo si conocemos las de los otros dos. Lo más importante es entender que, para un físico, las ecuaciones expresan relaciones entre «cosas» y son una forma de hacer afirmaciones precisas sobre el mundo real.

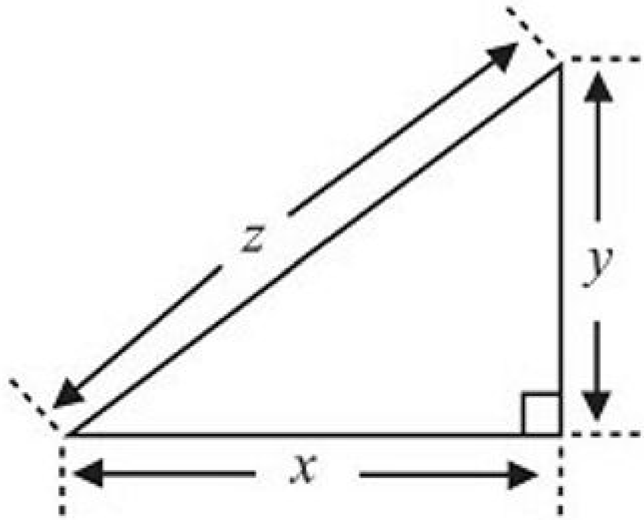

Figura 1

Las ecuaciones de Maxwell son bastante más complicadas desde un punto de vista matemático, pero básicamente sirven para lo mismo. Pueden, por ejemplo, permitirte saber, sin necesidad de ver la brújula, en qué dirección se desviará su aguja si envías un pulso de corriente eléctrica a través de un cable. Lo maravilloso de las ecuaciones, sin embargo, es que también pueden revelar conexiones profundas entre magnitudes que no son inmediatamente evidentes a partir de los resultados de los experimentos, y al hacerlo pueden llevar a una comprensión mucho más profunda de la naturaleza. No cabe ninguna duda de que eso es lo que sucede con las ecuaciones de Maxwell. En su descripción matemática de los fenómenos eléctricos y magnéticos son fundamentales los campos abstractos, eléctrico y magnético, que Faraday imaginó por primera vez. Maxwell escribió sus ecuaciones en el lenguaje de los campos porque no tenía otra opción. Era la única manera de reunir en un único conjunto unificado de ecuaciones el enorme abanico de fenómenos eléctricos y magnéticos que Faraday y sus colegas habían observado. Igual que el teorema de Pitágoras expresa la relación entre las longitudes de los lados de un triángulo, las ecuaciones de Maxwell reflejan las relaciones entre las cargas y corrientes eléctricas y los campos eléctricos y magnéticos que crean. La genialidad de Maxwell radicó en hacer que los campos saliesen de las penumbras y pasasen a ocupar el centro del escenario. Si, por ejemplo, le preguntases a Maxwell por qué una batería hace que una corriente fluya por un cable, te diría: «Porque la batería provoca un campo eléctrico en el cable y este hace que la corriente fluya». O, si le preguntases por qué la aguja de una brújula se desvía al acercarla a un imán, diría: «Porque alrededor del imán hay un campo magnético y eso hace que la aguja se mueva». Si le preguntases por qué un imán en movimiento da lugar a una corriente dentro de una bobina de cable, puede que te contestase que dentro del cable enrollado existe un campo magnético variable que propicia la aparición en el cable de un campo eléctrico que a su vez provoca la corriente. La descripción de cada uno de estos diversos fenómenos remite siempre a la presencia de campos eléctricos y magnéticos, y a la interacción de los campos entre sí. Esto es algo habitual en física: la introducción de un nuevo concepto unificador permite alcanzar una visión más simple y satisfactoria de muchos fenómenos diversos que a primera vista no parecían tener ninguna relación entre sí. De hecho, esto puede entenderse como la razón del éxito de la ciencia en su conjunto. En el caso de Maxwell, condujo a una visión sencilla y unificada de todos los fenómenos eléctricos y magnéticos observados que funcionaba a la perfección, en el sentido de que permitía predecir y entender los resultados de todos y cada uno de los innovadores experimentos de sobremesa de Faraday y sus colegas. Este era un gran logro en sí mismo, pero en el proceso que condujo a la deducción de las ecuaciones correctas sucedió algo todavía más notable. Maxwell se vio obligado a añadir a sus ecuaciones un elemento adicional que no venía impuesto por los experimentos. Desde el punto de vista de Maxwell, era necesario únicamente para hacer que las ecuaciones fuesen matemáticamente consistentes. Esta última frase contiene una de las ideas más profundas y en cierto sentido misteriosas sobre el funcionamiento de la ciencia moderna. El comportamiento de los objetos físicos en el mundo real puede predecirse recurriendo prácticamente a las mismas leyes matemáticas básicas que Pitágoras tal vez ya conocía cuando se propuso calcular las propiedades de los triángulos. Este es un hecho empírico que no puede decirse, en absoluto, que sea obvio. En 1960, el físico teórico Eugene Wigner, ganador del premio Nobel, escribió un famoso artículo titulado «The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences» («La irrazonable eficacia de las matemáticas en las ciencias naturales») en el que afirmó que «no es algo en absoluto natural que existan las leyes de la naturaleza, y mucho menos aún que el hombre tenga la capacidad de descubrirlas». La experiencia nos enseña que, efectivamente, existen leyes en la naturaleza, regularidades en el comportamiento de los objetos, y que la mejor manera de expresar estas leyes es mediante el lenguaje de las matemáticas. Esto abre la interesante posibilidad de que la consistencia matemática pueda servirnos de guía, junto con la observación experimental, para llegar a las leyes que describen la realidad física, algo que se ha repetido una y otra vez a lo largo de la historia de la ciencia. Veremos cómo sucede a lo largo del libro, y el hecho de que sea así constituye uno de los maravillosos misterios del universo.

Volviendo a nuestra historia, en su búsqueda de consistencia matemática, Maxwell incorporó el elemento adicional, conocido como corriente de desplazamiento, a la ecuación que describía las observaciones experimentales de Faraday sobre la desviación de la aguja de la brújula provocada por el flujo de una corriente eléctrica a través de un cable. La corriente de desplazamiento no era necesaria para describir las observaciones de Faraday y, tanto con ella como sin ella, las ecuaciones describían los datos experimentales de la época. Sin embargo, sin que Maxwell fuese consciente de ello en un principio, gracias a este sencillo añadido sus hermosas ecuaciones eran capaces de mucho más que describir el funcionamiento de los motores eléctricos. La introducción de la corriente de desplazamiento revela una profunda relación entre los campos eléctrico y magnético. En concreto, las nuevas ecuaciones pueden reformularse en forma de lo que se conoce como ecuaciones de onda que, como su propio nombre indica, describen el movimiento de unas ondas. Las ecuaciones que describen la propagación de las ondas sonoras en el aire son ecuaciones de onda, como también lo son las que describen la trayectoria de las olas del mar hasta la costa. Sorprendentemente, la descripción matemática que Maxwell realizó de los experimentos de Faraday con cables e imanes predijo la existencia de un tipo de ondas viajeras. Pero, mientras que las olas del mar son perturbaciones que se propagan por el agua, y las ondas sonoras se producen por la vibración de las moléculas del aire, las ondas de Maxwell están compuestas por la oscilación de campos eléctricos y magnéticos.

¿Qué son estos misteriosos campos oscilantes? Imagina un campo eléctrico que empieza a crecer porque Faraday genera un pulso de corriente eléctrica en un cable. Ya sabemos que cuando el pulso de corriente eléctrica recorre el cable, se genera un campo magnético (recuerda que Faraday observó cómo se desviaba la aguja de una brújula situada en las inmediaciones del cable). En palabras de Maxwell, el campo eléctrico variable genera un campo magnético variable. Faraday también nos dice que, cuando hacemos que varíe un campo magnético al mover un imán a través de una bobina de cable, se genera un campo eléctrico, que hace que una corriente fluya por el cable. Maxwell diría que un campo magnético variable genera un campo eléctrico variable. Imagina que ahora quitamos las corrientes y los imanes, de forma que solo nos queden los propios campos, que oscilan repetidamente, a medida que las variaciones en cada uno de ellos provocan cambios en el otro. Las ecuaciones de onda de Maxwell describen cómo los dos campos están conectados entre sí, oscilando de un lado a otro. También predicen que las ondas deben avanzar con una velocidad determinada. No te extrañará saber que esta velocidad viene definida por las cantidades que midió Faraday. En el caso de las ondas sonoras, la velocidad de la onda es de aproximadamente 330 metros por segundo, algo mayor que la de un avión de pasajeros. La velocidad del sonido está determinada por los entresijos de las interacciones entre las moléculas de aire que transportan la onda. Varía en función de las condiciones atmosféricas de presión y temperatura, que a su vez reflejan la distancia a la que se encuentran las moléculas de aire entre sí y con qué velocidad salen despedidas cuando chocan entre ellas. En el caso de las ondas de Maxwell, la velocidad viene dada por la relación entre las intensidades de los campos eléctrico y magnético, algo que puede medirse con mucha facilidad. La intensidad del campo magnético puede calcularse midiendo la fuerza que se ejerce entre dos imanes. La palabra «fuerza» aparecerá de vez en cuando, y con ella nos referimos a la magnitud con que se tira o se empuja algo. Dicha magnitud puede cuantificarse y medirse, y si estamos intentando entender cómo funciona el mundo, parece razonable pensar que nos interesará saber cómo se originan estas fuerzas. De forma igualmente sencilla, la intensidad del campo eléctrico puede medirse haciendo que dos objetos adquieran carga eléctrica y midiendo cuál es la fuerza que existe entre ellos. Es posible que, sin ser consciente de ello, tú mismo hayas experimentado este proceso de «carga». Puede que te hayas paseado sobre una alfombra de nailon en un día seco y después hayas notado un calambre al tratar de abrir una puerta con pomo metálico. Esta desagradable experiencia se produce porque al arrastrar tus pies por la alfombra le has arrancado electrones, las partículas fundamentales de la electricidad, que han pasado a las suelas de tus zapatos. Has acumulado una carga eléctrica, lo que significa que existe un campo eléctrico entre el pomo de la puerta y tú. Cuando agarras el pomo, el campo hace que fluya una corriente eléctrica, como Faraday demostró en sus experimentos.

Mediante experimentos tan sencillos como estos, los científicos pueden medir las intensidades de los campos eléctricos y magnéticos, y las ecuaciones de Maxwell indican que la proporción entre ambas intensidades es igual a la velocidad de las ondas. ¿Cuál es entonces la respuesta? ¿Cuál fue el valor de la velocidad de las ondas electromagnéticas que predijeron los experimentos de Faraday, combinados con el genio matemático de Maxwell? Este es uno de los muchos momentos clave de nuestra historia, y un ejemplo maravilloso de por qué la física es una disciplina hermosa, poderosa y profunda: las ondas de Maxwell viajan a una velocidad de 299.792.458 metros por segundo. Sorprendentemente, esta es la velocidad de la luz. Sin buscarla, Maxwell había encontrado una explicación de la propia luz. Puedes ver el mundo que te rodea porque el campo electromagnético de Maxwell se propaga a través de la oscuridad hasta tus ojos, a una velocidad que podemos predecir usando tan solo una bobina de cable y un imán. Las ecuaciones de Maxwell son la rendija en la puerta a través de la cual la luz entra en nuestra historia con tanta preeminencia como los descubrimientos de Einstein a los que dio lugar. La existencia en la naturaleza de esta velocidad especial, única e invariable, de 299.792.458 metros por segundo, nos conducirá en el siguiente capítulo, como hizo con Einstein, a desechar la idea del tiempo absoluto.

El lector atento se habrá dado cuenta de que aquí hay algo que no cuadra, o de que hemos cometido algún descuido al escribir. Teniendo en cuenta lo que hemos dicho en el capítulo 1, evidentemente no tiene ningún sentido hablar de una velocidad sin especificar respecto a qué se define, cosa que las ecuaciones de Maxwell no hacen. La velocidad de las ondas —es decir, la velocidad de la luz— aparece como una constante de la naturaleza, dada por la relación entre las intensidades relativas de los campos eléctrico y magnético. En esta elegante estructura matemática no hay lugar para la velocidad de la fuente o del receptor de las ondas. Sin duda, Maxwell y sus contemporáneos eran conscientes de ello, pero no les preocupó demasiado porque la mayoría de los científicos de la época, por no decir todos, creían que las ondas, incluida la luz, debían propagarse a través de alguna clase de medio. «Algo real» tenía que «ondear». Eran personas prácticas, en la línea de Faraday, y para ellas las cosas no podían oscilar por sí mismas sin ningún tipo de soporte. Las olas solo pueden existir en presencia de agua, y las ondas sonoras solo se propagan en presencia de aire o alguna otra sustancia, pero sin duda no en el vacío: «En el espacio nadie escucha tus gritos».

Así que, a finales del siglo XIX, la idea dominante era que la luz debía propagarse a través de algún medio, conocido como éter. La velocidad que aparecía en las ecuaciones de Maxwell tenía una interpretación muy evidente: era la velocidad de la luz respecto al éter. Algo exactamente análogo a la propagación de ondas sonoras por el aire. Si el aire está a una temperatura y una presión fijas, el sonido siempre viaja a velocidad constante, que depende únicamente de los entresijos de la interacción entre las moléculas de aire y no tiene nada que ver con el movimiento de la fuente de las ondas.

Pero el éter tenía que ser una sustancia bastante peculiar. Debía permear todo el espacio, puesto que la luz atraviesa el vacío entre el Sol y la Tierra y entre las estrellas y las galaxias lejanas. Al ir por la calle, tendrías que moverte por el éter, igual que haría la Tierra en su recorrido anual alrededor del Sol. Cualquier cosa que se mueva en el universo debería hacerlo a través del éter, que apenas ofrecería resistencia al movimiento de objetos sólidos, incluidos algunos tan grandes como los planetas. Porque, de no ser así, el movimiento de la Tierra habría ido ralentizándose a lo largo de sus 5.000 millones de órbitas alrededor del Sol, como se detiene una bola de metal si la soltamos en un tarro de melaza, y la duración de los años terrestres habría variado gradualmente. La única suposición razonable sería que la Tierra y el resto de los objetos se moviesen a través del éter sin impedimentos. Quizá creas que esto haría que fuese imposible detectarlo, pero si por algo se caracterizaban los experimentalistas victorianos era por su ingenio, y en una serie de experimentos de alta precisión realizados a partir de 1881, Albert Michelson y Edward Morley se propusieron detectar lo aparentemente indetectable.

La idea en la que se basaron era hermosa por su sencillez. En su excelente libro sobre la relatividad, escrito en 1925, Bertrand Russell compara el movimiento de la Tierra a través del éter con dar un paseo circular un día de viento: harás parte del recorrido a favor del viento y otra parte con él en contra. De una forma similar, puesto que la Tierra se movía a través del éter al describir su órbita alrededor del Sol, y ambos se desplazaban juntos por el éter en su recorrido alrededor de la Vía Láctea, en algún momento del año la Tierra debía moverse en contra del viento de éter, y en otros, a favor. E incluso en el improbable caso de que el sistema solar en su conjunto estuviese en reposo respecto al éter, el movimiento de la Tierra alrededor del Sol seguiría dando lugar a un viento de éter, igual que uno siente el movimiento del aire en su cara al sacar la cabeza por la ventana del coche aunque ese día no haya viento.

Michelson y Morley se marcaron el objetivo de medir la velocidad de la luz en distintos momentos del año. Ellos, como todos los demás, estaban convencidos de que la velocidad cambiaría a lo largo del año, aunque la variación sería muy pequeña, porque la velocidad de la Tierra (y de su experimento con ella) respecto al éter debería cambiar de manera continua. La sensibilidad de los experimentos era muy elevada, gracias a una técnica llamada interferometría, que Michelson y Morley fueron refinando durante seis años, hasta que, en 1887, publicaron sus resultados, que fueron inequívocamente negativos: no se observó ninguna diferencia en la velocidad de la luz en ninguna dirección o momento del año.

Si la hipótesis del éter era correcta, era muy difícil explicar este resultado. Imagina, por ejemplo, que te lanzas a un río que fluye a gran velocidad y te pones a nadar a favor de la corriente. Si nadas a 5 kilómetros por hora y el río baja a 3 kilómetros por hora, tu velocidad respecto a la orilla será de 8 kilómetros por hora. Si ahora das media vuelta y empiezas a nadar a contracorriente, lo harás a 2 kilómetros por hora con respecto a la orilla. El experimento de Michelson y Morley es completamente análogo: tú, el nadador, eres el rayo de luz, el río es el éter a través del cual se supone que se propaga la luz, y la orilla es el equipo experimental, que está en reposo sobre la superficie terrestre. Ahora podemos entender por qué el resultado de Michelson-Morley fue tan sorprendente. Era como si siempre te movieses a 5 kilómetros por hora respecto a la orilla, independientemente de la velocidad con que el río fluyese y de la dirección en la que decidieses nadar.

Por lo tanto, Michelson y Morley fracasaron en su intento de detectar la presencia del éter que fluía supuestamente a través de sus equipos. He aquí un nuevo desafío para nuestra intuición: teniendo en cuenta lo que hemos visto hasta ahora, lo más atrevido sería abandonar la idea del éter porque sus efectos no pueden medirse, como hemos hecho con la idea de espacio absoluto en el capítulo 1. Por otra parte, desde una perspectiva filosófica, el éter siempre había sido un concepto poco atractivo, porque permitiría establecer una referencia en el universo respecto a la cual se podría definir un movimiento absoluto, lo que iría en contra del principio de relatividad de Galileo. Desde una perspectiva histórica, es probable que este fuese el punto de vista personal de Einstein, porque parece que no estaba más que marginalmente al tanto de los resultados experimentales de Michelson y Morley cuando tomó la arriesgada decisión de abandonar el éter al formular su teoría de la relatividad especial en 1905. No obstante, no cabe ninguna duda de que esas sutilezas filosóficas no pueden servir como guía fiable para entender el funcionamiento de la naturaleza y que, en última instancia, la razón principal para rechazar la idea del éter es que los resultados experimentales no lo hacían necesario.[1]

Aunque este rechazo resulte estéticamente satisfactorio y esté fundamentado en los datos experimentales, si decidimos dar este salto habremos de enfrentarnos a un problema serio: las ecuaciones de Maxwell predicen con gran precisión la velocidad de la luz, pero no contienen información alguna sobre qué se debe tomar como referencia para medirla. Seamos atrevidos por un momento, aceptemos lo que parecen decirnos las ecuaciones y veamos adónde nos conduce este viaje intelectual. Si llegamos a un resultado absurdo, siempre podemos dar marcha atrás y explorar otra hipótesis, con la conciencia tranquila por haber hecho ciencia de calidad. Las ecuaciones de Maxwell predicen que la luz siempre viaja a una velocidad de 299.792.458 metros por segundo, y no hay en ellas ningún lugar donde introducir la velocidad de la fuente o del receptor de la luz. En realidad, parecen decir que siempre mediremos el mismo valor para la velocidad de la luz, por muy elevada que sea la velocidad con que la fuente y el receptor se mueven la una respecto al otro. Parece que las ecuaciones de Maxwell nos dicen que la velocidad de la luz es una constante de la naturaleza. Esta es una afirmación verdaderamente extraña, así que vamos a dedicar algo más de tiempo a explorar su significado.

Imagina que tenemos una linterna que emite luz. El sentido común nos dice que si corremos lo suficientemente rápido podríamos alcanzar el principio del haz de luz mientras este avanza hacia delante. El sentido común también nos sugiere incluso que, si fuésemos capaces de correr a la velocidad de la luz, podríamos avanzar en paralelo al extremo delantero del haz. Pero si hacemos caso a lo que dicen literalmente las ecuaciones de Maxwell, por muy rápido que corramos el haz se aleja de nosotros a una velocidad de 299.792.458 metros por segundo. De no ser así, la velocidad de la luz sería distinta para la persona que corre y para la que tiene la linterna, lo que entraría en contradicción con los resultados experimentales de Michelson y Morley y con nuestra afirmación de que la velocidad de la luz es una constante de la naturaleza, un mismo número, independientemente del movimiento de la fuente o del observador. Parece que hemos llegado a una conclusión absurda. Evidentemente, el sentido común nos aconsejaría que rechazásemos, o al menos modificásemos o reinterpretásemos, las ecuaciones de Maxwell, que puede que solo sean aproximadamente correctas. No parece una idea descabellada, ya que el movimiento de cualquier equipo experimental real solo provocaría una minúscula variación en los 300 millones de metros por segundo que aparecen en las ecuaciones de Maxwell. Tan minúscula que quizá habría pasado desapercibida en los experimentos de Faraday. La alternativa es aceptar la validez de las ecuaciones de Maxwell y la estrafalaria idea de que nunca podremos alcanzar el haz de luz. Esa idea no solo choca frontalmente con el sentido común, sino que, como veremos en el capítulo siguiente, implica que deberíamos rechazar la propia idea de un tiempo absoluto.

Cortar nuestros vínculos con el tiempo absoluto es algo tan difícil de asumir hoy en día como lo fue para los científicos del siglo XIX. Nuestra intuición se inclina con tanta fuerza a favor de un espacio y un tiempo absolutos que es difícil ir en su contra, pero debemos tener claro que la intuición no es más que eso, intuición. Por otra parte, las leyes de Newton asumen estas ideas incondicionalmente y, todavía a día de hoy, estas leyes constituyen la base del trabajo de muchos ingenieros. En el siglo XIX, las leyes de Newton parecían intocables. Mientras Faraday exponía el comportamiento de la electricidad y el magnetismo en la Royal Institution, Isambard Kingdom Brunel construía para la Great Western Railway el tren que uniría Londres con Bristol. El emblemático puente colgante de Clifton, obra también de Brunel, se completó en 1864, el mismo año en que Maxwell logró su grandiosa síntesis del trabajo de Faraday y desveló el secreto de la luz. El puente de Brooklyn se inauguró ocho años más tarde, y en 1889 la torre Eiffel ya se elevaba por encima de los tejados parisinos. Todos los grandes logros de la era del vapor se diseñaron y se construyeron utilizando los conceptos que Newton estableció. La mecánica newtoniana distaba mucho de ser una ensoñación matemática abstracta. Los símbolos de su éxito se erigían por todo el planeta en una creciente celebración del dominio humano de las leyes de la naturaleza. Imagina la consternación que debieron de sentir los científicos de finales del siglo XIX al enfrentarse a las ecuaciones de Maxwell y a su ataque implícito a los cimientos mismos de la imagen newtoniana del mundo. Era evidente que solo podía haber un ganador. Newton y la idea del tiempo absoluto se impondrían. Sin embargo, el siglo XX amaneció bajo la sombra que proyectaban las oscuras nubes del problema de la constancia de la velocidad de la luz: no era posible que tanto Maxwell como Newton tuviesen razón. Hubo que esperar hasta 1905 para que el trabajo de un físico hasta entonces desconocido llamado Albert Einstein demostrase definitivamente que la naturaleza estaba del lado de Maxwell.

Capítulo 3
Relatividad especial

En el capítulo 1 hemos conseguido probar que la visión aristotélica del espacio y el tiempo, tan intuitiva, arrastraba un exceso de equipaje. Es decir, hemos demostrado que no hay necesidad de ver el espacio como la estructura fija, inmutable y absoluta donde suceden las cosas. También hemos visto cómo Galileo comprendió la futilidad de aferrarse a la idea del espacio absoluto, aunque siguió creyendo firmemente en la existencia de un tiempo universal. En el capítulo anterior hemos hecho parada en la física del siglo XIX, con Faraday y Maxwell como protagonistas, donde hemos aprendido que la luz no es otra cosa que la simbiosis de unos campos eléctrico y magnético que avanzan oscilando, en perfecto acuerdo con las hermosas ecuaciones de Maxwell. ¿Adónde nos lleva todo esto? Si hemos de abandonar la idea de un espacio absoluto, ¿qué ocupará su lugar? ¿A qué nos referimos con el colapso de la idea de un tiempo absoluto? El objetivo de este capítulo es dar respuesta a estas preguntas.

No cabe duda de que Albert Einstein es la figura emblemática de la ciencia moderna. Su pelo blanco desaliñado y su aire despistado constituyen hoy en día la viva imagen del «profesor». Pídele a un niño que represente a un científico y muy probablemente dibujará a alguien parecido al viejo Einstein. Sin embargo, las ideas que figuran en este libro son las de un hombre joven. A principios del siglo XX, cuando Einstein reflexionaba sobre la naturaleza del espacio y el tiempo, tenía poco más de veinte años, mujer y familia. No ocupaba ningún puesto académico en una universidad o centro de investigación, aunque solía debatir sobre física con un reducido grupo de amigos, a menudo hasta altas horas de la madrugada. Una desafortunada consecuencia del aparente aislamiento de Einstein respecto a las principales instituciones científicas es la tentación moderna de verlo como un díscolo que se enfrentó con éxito al mundo científico tradicional; desafortunada porque sirve de inspiración a muchos chiflados que creen que han descubierto por su cuenta una nueva teoría del universo y son incapaces de entender por qué nadie les hace caso. De hecho, Einstein mantenía relaciones relativamente fluidas con las altas esferas del mundo científico, aunque lo cierto es que su carrera científica no tuvo unos comienzos fáciles.

Sorprende su perseverancia al seguir explorando los grandes problemas científicos de la época pese a que no se le tuviese en cuenta de cara a ocupar un puesto académico universitario. Tras graduarse en la Escuela Politécnica Federal (ETH) de Zurich, a la edad de veintiún años, habiéndose especializado en ciencia y matemáticas, estuvo dando clases como profesor interino en varios lugares, lo que le dejaba tiempo para trabajar en su tesis doctoral. Durante 1901, mientras impartía clases en una escuela privada en Schaffhausen, en el norte de Suiza, presentó su tesis doctoral en la Universidad de Zurich, que fue rechazada. Tras esa decepción, Einstein se trasladó a Berna y, como es bien sabido, comenzó su carrera como experto técnico de tercera clase en la oficina de patentes de Suiza. La relativa estabilidad económica y la libertad que esta situación le ofrecía dieron lugar a los años más productivos de su vida, muy probablemente los más productivos de cualquier científico a lo largo de la historia.

La mayor parte de este libro trata sobre el trabajo de Einstein que desembocó en su año dorado, 1905, en el que escribió por primera vez la ecuación $E = mc^2$, obtuvo por fin su doctorado, y terminó de escribir un artículo sobre el efecto fotoeléctrico, por el que acabaría recibiendo el premio Nobel. Curiosamente, en 1906 Einstein seguía trabajando en la oficina de patentes, donde la recompensa que obtuvo por cambiar para siempre nuestra manera de entender el universo fue un ascenso a experto técnico de segunda clase. Fue en 1908 cuando por fin obtuvo, en Berna, un puesto académico «propiamente dicho». Aunque resulte tentador imaginar lo que Einstein habría podido conseguir si durante esos años no hubiese tenido que relegar la física a la condición de pasatiempo, él siempre guardó muy gratos recuerdos de esa época en Berna. En su libro *El Señor es sutil*, Abraham Pais, biógrafo y amigo de Einstein, describió los años que este pasó en la oficina de patentes como «lo más parecido al paraíso en la Tierra», porque pudo dedicar tiempo a pensar en la física.

La inspiración que condujo a Einstein hacia $E = mc^2$ surgió de la belleza matemática de las ecuaciones de Maxwell, que le impresionaron hasta tal punto que decidió tomarse en serio la predicción de que la velocidad de la luz es constante. Científicamente, no parece que este paso sea muy controvertido: las ecuaciones de Maxwell se construyeron sobre los cimientos de los experimentos de Faraday, ¿quiénes somos nosotros para rebatir sus consecuencias? Lo único que se interpone en nuestro camino son los prejuicios contra la idea de que algo pueda moverse a la misma velocidad independientemente de lo rápido que nosotros corramos tras ello. Imagina que vas en el coche a 60 kilómetros por hora y que te adelanta un coche que va a 80 kilómetros por hora. Parece bastante evidente que verás al coche alejarse a una velocidad neta de 20 kilómetros por hora. Pensar que esto es «evidente» es el tipo de prejuicio al que hemos de resistirnos si queremos acompañar a Einstein y aceptar que la luz siempre se aleja de nosotros a la misma velocidad, independientemente de lo rápido que nos estemos moviendo. Aceptemos de momento, como Einstein, que nuestro sentido común puede confundirnos y veamos adónde nos llevaría una velocidad de la luz constante.

En el núcleo de la teoría de la relatividad especial de Einstein se encuentran dos proposiciones, que en el lenguaje de la física se llaman axiomas. Un axioma es una proposición que se asume como cierta. Partiendo de los axiomas, podemos deducir sus consecuencias en el mundo real, que comprobaremos mediante la realización de experimentos. La primera parte de este método se remonta de hecho a la antigua Grecia. Como es bien sabido, Euclides la explica en sus *Elementos*, donde desarrolla el sistema geométrico que aún hoy se sigue enseñando en los colegios. Para construir su geometría, Euclides se basó en cinco axiomas, que él consideraba verdades manifiestas. Como veremos más adelante, la euclidiana es en realidad solo una entre muchas geometrías posibles: la de un espacio plano, como la superficie de una mesa. La geometría de la superficie terrestre no es euclidiana y viene definida por un conjunto de axiomas diferente. Otro ejemplo todavía más importante para nosotros, como enseguida veremos, es la geometría del espacio y del tiempo. La segunda parte, la comprobación de las consecuencias en la naturaleza, no fue algo que los griegos practicasen mucho. De haberlo hecho, es posible que el mundo fuese hoy en día un lugar muy diferente. Este paso, aparentemente sencillo, lo introdujeron los científicos musulmanes en el siglo XI y no arraigó en Europa hasta mucho después, en los siglos XVI y XVII. Partiendo de la sólida referencia de los experimentos, la ciencia pudo al fin progresar rápidamente, y llegaron así los avances tecnológicos y la prosperidad.

El primero de los axiomas de Einstein es que las ecuaciones de Maxwell son ciertas, en el sentido de que la luz siempre viaja por el espacio vacío a la misma velocidad, independientemente de cuál sea el estado de movimiento de la fuente o del observador. El segundo axioma sostiene que hemos de seguir los pasos de Galileo cuando afirmó que nunca se podrá llevar a cabo ningún experimento que permita identificar un estado de movimiento absoluto. Provistos únicamente con estas proposiciones, podemos ahora proceder como buenos físicos e investigar cuáles son sus consecuencias. Como sucede siempre en la ciencia, la prueba definitiva de la teoría de Einstein, derivada de sus dos axiomas, es su capacidad para predecir y explicar los resultados de los experimentos. Citando a Feynman, más extensamente esta vez: «En general, para buscar una ley nueva seguimos este proceso. Primero, planteamos una hipótesis. Después, extraemos las consecuencias de nuestra suposición para ver qué implicaría la teoría si fuese correcta. A continuación, comparamos el resultado de nuestras deducciones con la naturaleza, mediante experimentos o experiencias, o directamente a través de observaciones, para ver si concuerda. Si no está de acuerdo con los experimentos, es errónea. En esta sencilla afirmación radica la clave de toda la ciencia. No importa lo hermosa que sea tu hipótesis. Da igual lo inteligente que seas, quién plantee la hipótesis, o cómo se llame. Si no concuerda con el experimento, es errónea. Eso es todo». Esta magnífica cita pertenece a una clase grabada en 1964 que te recomendamos que busques en YouTube.

Por lo tanto, nuestro objetivo en las páginas que siguen es extraer las consecuencias que se derivan de los axiomas de Einstein. Empezaremos empleando una técnica que era del agrado del propio Einstein: el experimento mental. En particular, queremos estudiar las consecuencias de suponer que la velocidad de la luz es constante para todos los observadores, independientemente de cómo se muevan unos respecto a otros. Para hacerlo, vamos a imaginarnos un reloj de aspecto rudimentario, llamado reloj de luz, que consta de dos espejos entre los que rebota repetidamente un haz de luz. Podemos utilizarlo como reloj si contamos cada rebote del haz de luz como un pulso del segundero. Por ejemplo, si los espejos están a 1 metro de distancia, la luz tarda aproximadamente 6,67 nanosegundos en hacer un recorrido de ida y vuelta.[2] Puedes comprobar esta cifra tú mismo: la luz debe recorrer 2 metros y lo hace a una velocidad de 299.792.458 metros por segundo. Se trataría de un reloj de muy alta precisión, pues daría alrededor de 150 millones de pulsos por cada latido de un corazón humano.

Imagina ahora que colocamos el reloj de luz en un tren que pasa a toda velocidad frente a una persona situada en el andén de una estación. La pregunta del millón es: ¿a qué velocidad marca el tiempo el reloj del tren según la persona que se encuentra en el andén? Antes de Einstein, todo el mundo daba por hecho que lo hacía al mismo ritmo, un pulso cada 6,67 nanosegundos.

La figura 2 muestra cómo ve un pulso del reloj en el tren la persona que está en el andén. Como el tren se está moviendo, desde el andén se observa que la luz debe recorrer una distancia mayor en cada pulso. Dicho de otra manera, para la persona que está en el andén, el punto inicial del recorrido del haz de luz no está en el mismo lugar que su punto final, porque el reloj se ha movido durante el pulso.

Para que el reloj marcase el tiempo al mismo ritmo que cuando está en reposo, la luz debería viajar un poco más rápido, pues de lo contrario no completará un recorrido más largo en 6,67 nanosegundos. Eso es exactamente lo que sucede en el mundo tal y como lo veía Newton, porque la luz recibía el impulso del movimiento del tren.

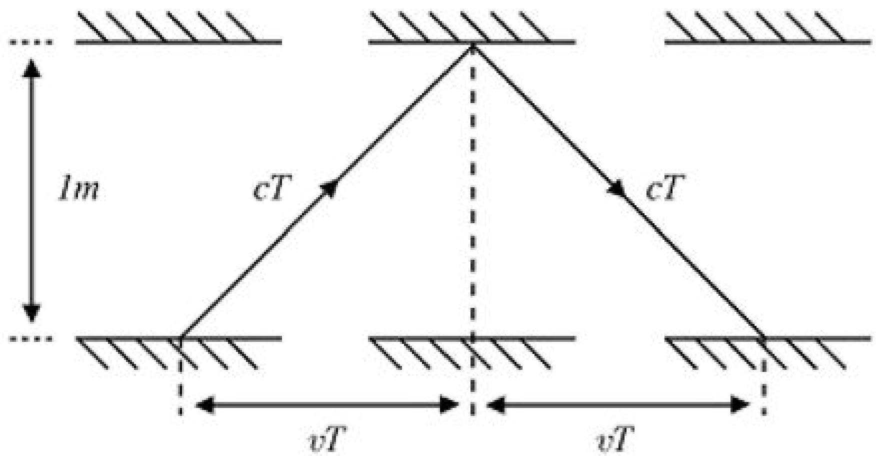

Figura 2

Pero —este es el paso fundamental— aplicar la lógica de Einstein implica que la luz no puede acelerarse porque la velocidad de la luz debe ser la misma para todo el mundo. Esto tiene la perturbadora consecuencia de que el reloj en movimiento debe marcar el tiempo realmente más despacio, simplemente porque la luz tiene que recorrer una distancia mayor, desde el punto de vista de la persona que se encuentra en el andén. Este experimento mental nos muestra que, si hemos de sostener que la velocidad de la luz es una constante de la naturaleza, como parece que Maxwell nos quiere decir, de ello se desprende que el tiempo pasa a ritmos diferentes dependiendo de cómo nos movemos respecto a otra persona. En otras palabras, el tiempo absoluto no es compatible con la idea de una velocidad de la luz universal. Es muy importante hacer hincapié en que esta conclusión no es válida únicamente para los relojes de luz. No existen diferencias importantes entre un reloj de luz y uno de péndulo, que funciona haciendo que «rebote» el péndulo entre dos posiciones una vez por segundo. O, de hecho, con un reloj atómico, que genera los pulsos al contar el número de picos y valles de una onda de luz emitida desde un átomo. Incluso la tasa de desintegración de las células de tu cuerpo podría servir como reloj, y la conclusión sería la misma, porque todos estos dispositivos miden el paso del tiempo. En realidad, el reloj de luz es una manera, algo manida, de explicar esta teoría de Einstein, origen de innumerables y confusas discusiones, al tratarse de un tipo de reloj tan poco familiar. Es tentador atribuir la chocante conclusión a la que acabamos de llegar a esta falta de familiaridad, en lugar de aceptar que se trata de la naturaleza del tiempo en sí. Hacerlo supondría cometer un grave error, pues la única razón para utilizar un reloj de luz en lugar de uno de cualquier otro tipo es que así podemos sacar provecho, a la hora de extraer conclusiones, de la extraña exigencia de que la luz debe viajar a la misma velocidad para todo el mundo. Cualquier conclusión a la que lleguemos al pensar en relojes de luz debe ser válida también para cualquier otro tipo de reloj, por lo siguiente: imagina que nos encerramos dentro de una caja sellada con un reloj de luz y otro de péndulo, los sincronizamos y los ponemos en funcionamiento. Si son muy precisos, permanecerán sincronizados y siempre marcarán la misma hora. Ahora, subamos la caja al tren en movimiento. De acuerdo con el segundo axioma de Einstein, no deberíamos ser capaces de saber si nos estamos moviendo. Pero, si el reloj de luz se comportase de una manera diferente que el de péndulo, dejarían de estar sincronizados y, desde dentro de la caja sellada, podríamos saber sin lugar a dudas que nos estamos moviendo.[3] Por lo tanto, un reloj de péndulo y uno de luz deben marcar el tiempo de la misma manera, lo que significa que, si el reloj de luz en movimiento lo marca más despacio para la persona que lo ve desde el andén, lo mismo sucederá con cualquier otro reloj en movimiento. No se trata de una ilusión óptica: para una persona situada en el andén, el paso del tiempo en el tren en movimiento se ralentiza.

El resultado es que podemos elegir entre aferrarnos a la reconfortante idea de un tiempo absoluto y desechar las ecuaciones de Maxwell, o bien abandonar el tiempo absoluto en favor de Maxwell y Einstein. ¿Cómo podríamos cerciorarnos de que escogemos la opción correcta? Tenemos que encontrar un experimento en el que, si

Einstein tiene razón, observaremos cómo el tiempo efectivamente se ralentiza para los objetos en movimiento.

Para diseñar un experimento así, antes necesitamos calcular a qué velocidad debe moverse algo para poner de manifiesto el efecto que buscamos. Debemos tener muy claro que, si un coche va a 100 kilómetros por hora por la autopista, eso no hará que el tiempo vaya mucho más despacio, porque sabemos que no es verdad que, al volver de hacer la compra, nos encontremos con que nuestros hijos han envejecido más que nosotros mientras estábamos fuera. Por tonto que parezca, tomarse en serio lo que dice Einstein implica aceptar que eso es justo lo que ocurre y, si nos moviésemos a una velocidad suficientemente alta, notaríamos la diferencia. Pero ¿qué significa una velocidad suficientemente alta? Desde el punto de vista de la persona que está en el andén de la estación, la luz viaja a lo largo de los dos lados del triángulo que se ve en el dibujo. El argumento de Einstein es que, como esta distancia es mayor que la que la luz recorrería si el reloj estuviese en reposo, el tiempo pasará más despacio porque el pulso tarda más en producirse. Todo lo que tenemos que hacer ahora es calcular cuánto más (para una determinada velocidad del tren) y tendremos la respuesta. Podemos hacerlo con una pequeña ayuda de Pitágoras.

Si no quieres seguir el desarrollo matemático, puedes saltar al párrafo siguiente, pero entonces tendrás que dar por buena nuestra palabra de que los números cuadran. Lo mismo sucederá con cualquier otro razonamiento matemático que aparezca a lo largo del libro. Siempre cabe la posibilidad de saltárselo y despreocuparse: las matemáticas ayudan a alcanzar una comprensión más profunda de la física, pero no son absolutamente imprescindibles para seguir el desarrollo del libro. Nosotros preferiríamos que les dieses una oportunidad a las matemáticas incluso si no tienes ninguna experiencia previa. Hemos tratado de hacerlas accesibles. Puede que la mejor manera de enfrentarse a ellas sea sin darles mucha importancia. Los rompecabezas lógicos que aparecen en los periódicos son mucho más difíciles de resolver que cualquier cosa que hagamos en este libro. Dicho lo cual, a continuación veremos uno de los razonamientos matemáticos más complicados de todo el libro. Pero el resultado merece la pena.

Échale otro vistazo a la figura 2 e imagina que el tiempo que tarda en producirse medio pulso en el reloj que está en el tren, tal y como lo mide la persona que se encuentra en el andén, es igual a T. Es el tiempo que tarda la luz en ir del espejo inferior al superior. Nuestro objetivo es calcular el valor de T y multiplicarlo por dos para obtener la duración de un pulso del reloj para la persona que está en el andén. Si conociésemos T, podríamos calcular la longitud del lado más largo del triángulo (la hipotenusa) como cT, es decir, la velocidad de la luz (c) multiplicada por el tiempo que tarda la luz en llegar desde el espejo inferior al superior (T). Recuerda que la distancia que recorre un objeto se obtiene al multiplicar su velocidad por la duración del recorrido. Por ejemplo, la distancia que recorre en una hora un coche que se desplaza a 100 kilómetros por hora es $100 \times 1 = 100$ kilómetros. No es difícil calcular el resultado para un viaje de dos horas. Lo único que estamos haciendo aquí es recurrir a la fórmula

«distancia = velocidad × tiempo».

Conociendo T, también podríamos calcular la distancia que recorre el reloj en medio pulso. Si el tren se mueve a una velocidad v, el reloj recorre una distancia vT cada medio pulso. De nuevo, no hemos hecho más que utilizar la fórmula «distancia = velocidad × tiempo». Esta distancia es la longitud de la base de un triángulo rectángulo y, puesto que conocemos la longitud de su lado más largo, podemos utilizar el teorema de Pitágoras para calcular la distancia entre los dos espejos. Pero ya sabemos cuál es esa distancia: un metro. Por lo tanto, el teorema de Pitágoras nos dice que

$$(cT)^2 = 1^2 + (vT)^2$$

Fíjate en los paréntesis: en matemáticas se utilizan para indicar qué operaciones se realizan antes. En este caso, $(vT)^2$ significa «multiplicamos *v* por *T* y después elevamos el resultado al cuadrado». Nada más que eso.

Ya casi hemos acabado. Conocemos c, la velocidad de la luz, y supondremos que también sabemos cuánto vale v, la velocidad del tren. Podemos entonces utilizar esta ecuación para calcular T. La forma más rudimentaria de hacerlo sería probar con un valor de T y ver si satisface la ecuación. Lo más probable es que no sea así y haya que probar con un valor distinto. Poco a poco, podríamos ir aproximándonos a la respuesta correcta. Por suerte, podemos evitar ese proceso tedioso porque la ecuación se puede «resolver». La respuesta es

$$T^2 = 1/(c^2 - v^2)$$

que significa «calculamos primero $c^2 - v^2$ y después dividimos 1 por ese número». La barra inclinada es el símbolo que utilizaremos para denotar «dividir por». Así, 1/2 = 0,5 y a/b significa «a dividido por b», etcétera. Si sabes algo de matemáticas, probablemente ya estés aburrido de todo esto. Si no, quizá te preguntes cómo hemos llegado a $T^2 = 1/(c^2 - v^2)$. Este no es un libro de matemáticas, así que tendrás que confiar en que no nos hemos equivocado (siempre puedes comprobar que lo hemos hecho bien introduciendo números en la ecuación y haciendo los cálculos). De hecho, lo que tenemos es el resultado para T^2, que significa «*T* multiplicado por *T*». Para obtener *T* calculamos la raíz cuadrada. Matemáticamente, la raíz cuadrada de un número es otro número tal que, cuando lo multiplicamos por sí mismo, obtenemos de nuevo el número original. Por ejemplo, la raíz cuadrada de 9 es 3, y la de 7 es aproximadamente 2,646. La mayoría de las calculadoras tienen un botón para calcular raíces cuadradas. Normalmente está marcado con el símbolo «√» y se suelen escribir cosas como $3 = \sqrt{9}$ .Como puedes ver, calcular la raíz cuadrada es la operación inversa de elevar al cuadrado: $4^2 = 16$ y $\sqrt{16} = 4$

Volviendo a la tarea que tenemos entre manos, ahora podemos expresar el tiempo que dura un pulso en el reloj, tal y como lo observa una persona que se encuentre en el andén: es el tiempo que tarda la luz en subir hasta el espejo superior y en volver a bajar; es decir, $2T$. Tomando la raíz cuadrada en la expresión que hemos obtenido antes para T^2 y multiplicándola por 2, obtenemos: $2T = 2/\sqrt{(c^2 - v^2)}$ Esta ecuación nos permite calcular el tiempo que dura un pulso, medido por la persona que está en el andén, si conocemos la velocidad del tren, la velocidad de la luz y la distancia entre los dos espejos (1 metro). Pero la duración de un pulso para alguien que se encuentre en el tren, junto al reloj, es simplemente igual a $2/c$, porque para él la luz sencillamente recorre 2 metros a una velocidad c (puesto que distancia = velocidad × tiempo, entonces tiempo = distancia / velocidad). Dividiendo estos dos intervalos de tiempo entre sí obtenemos cuánto se retrasa el reloj del tren, tal y como lo mide alguien que esté en el andén. Va más despacio en un factor de $c/\sqrt{(c^2 - v^2)}$, que, reordenando los términos, también puede escribirse como $1/\sqrt{(1 v^2/c^2)}$. Esta es una cantidad muy importante en la teoría de la relatividad, que suele representarse con la letra griega γ (que se llama «gamma»). Date cuenta de que γ es mayor que 1, siempre y cuando el reloj se mueva a una velocidad menor que la de la luz, puesto que v/c será entonces menor que 1. Cuando v es mucho menor que la velocidad de la luz (como, por ejemplo, la mayoría de las velocidades habituales, ya que, en unidades a las que los motoristas están más acostumbrados, la velocidad de la luz es de 1.079 millones de kilómetros por hora), el valor de γ es muy próximo a 1. Solo cuando la magnitud de v es comparable a la de la velocidad de la luz γ empieza a desviarse significativamente de 1.

Ya hemos acabado con las matemáticas. Hemos conseguido calcular exactamente cuánto se dilata el tiempo en el tren para alguien que se encuentra en el andén. Pongamos números para hacernos una idea de cómo son las cosas. Si el tren se mueve a 300 kilómetros por hora, puedes comprobar que v^2/c^2 es un número muy pequeño: 0,000000000000077. Para obtener el valor del factor γ de «dilatación temporal», hemos de calcular $1/\sqrt{(1 - 0.00000000000007)} = 1{,}00000000000039$.

Como cabía esperar, el efecto es minúsculo: si viajases durante 100 años en el tren, tu amigo en el andén vería cómo tu vida se alargaría únicamente 0,0000000000039 años, apenas algo más de una décima de milisegundo. No obstante, el efecto no sería tan minúsculo si el tren viajase a un 90 por ciento de la velocidad de la luz. El factor de dilatación temporal sería en ese caso mayor de 2, lo que significa que el reloj en movimiento marcaría el tiempo a un ritmo menor de la mitad del reloj de la estación, según la persona que se encontrase en el andén. Esta es la predicción de Einstein y, como buenos científicos, para creérnosla tenemos que comprobarla experimentalmente. Desde luego, en este momento resulta un poco increíble.

Antes de comentar el experimento que zanja la discusión, parémonos a reflexionar sobre el resultado que acabamos de descubrir. Veamos de nuevo el experimento desde el punto de vista de la pasajera del tren que se encuentra junto al reloj. Para ella, el reloj no se está moviendo y la luz simplemente rebota arriba y abajo, como lo haría para quien estuviese junto al mismo reloj en la cafetería de la estación. La pasajera debe ver que el reloj marca un pulso cada 6,67 nanosegundos, 150 millones de veces por cada latido de un corazón humano, porque tiene toda la razón al pensar que el reloj no se mueve respecto a ella, siguiendo a Galileo. Mientras tanto, la persona que está en el andén afirma que el reloj en el tren ha tardado algo más de 6,67 nanosegundos en dar un pulso. Después de 150 millones de pulsos del reloj en movimiento, su corazón habrá dado algo más de un latido. Esto es asombroso: la persona que está en el andén ve cómo envejece más rápido que la pasajera del tren.

Como acabamos de ver, el efecto es minúsculo para los trenes de verdad, que no se mueven a velocidades ni remotamente próximas a la velocidad de la luz, pero no deja de ser real. En un mundo imaginario en el que el tren recorriese una vía muy larga a una velocidad cercana a la de la luz, el efecto sería mayor y no cabría ninguna duda: desde su punto de vista, la persona que está en el andén envejecería más rápido.

En los experimentos reales, si queremos demostrar la quiebra del tiempo absoluto, necesitamos buscar la manera de estudiar objetos que se muevan a velocidades próximas a la de la luz, ya que solo entonces el factor de dilatación temporal γ será apreciablemente mayor que 1. Idealmente, también nos gustaría analizar un objeto que tenga un tiempo de vida, es decir, que muera. Así, podríamos ver si es posible prolongar su tiempo de vida simplemente haciendo que se mueva rápido.

Por suerte para los científicos, esos objetos existen. De hecho, los propios científicos están formados por ellos. Las partículas elementales son diminutos objetos subatómicos que, debido a su reducido tamaño, es fácil acelerar a velocidades enormes. Se dice que son elementales porque, hasta donde sabemos gracias a la tecnología de la que disponemos actualmente, son los componentes más pequeños de todo lo que existe en el universo. Más adelante en el libro hablaremos largo y tendido sobre las partículas elementales. De momento, nos gustaría describir solo dos: el electrón y el muón.

El electrón es una partícula a la que todos le debemos mucho, porque estamos compuestos por ellos. Es también la partícula que fluye por los cables eléctricos para hacer que nuestras bombillas brillen y nuestros hornos calienten. Es la partícula de la electricidad. El muón es idéntico al electrón en todos los aspectos, salvo en que es más pesado. Los físicos realmente no entienden por qué la naturaleza decidió darnos una copia del electrón en apariencia redundante si lo único que quería era formar planetas y personas. Sea cual fuere la razón de la existencia del muón, es muy útil para los científicos que desean comprobar la teoría de la relatividad de Einstein, porque su tiempo de vida es muy corto y es fácil acelerarlo hasta velocidades muy elevadas. Por lo que sabemos, los electrones nunca mueren, mientras que un muón que estuviese en reposo junto a ti viviría unos 2,2 microsegundos (un microsegundo es una millonésima de segundo). Cuando un muón muere, casi siempre se transforma en un electrón y en otro par de partículas subatómicas llamadas neutrinos, pero esta información adicional no nos hace falta. Todo lo que necesitamos saber es que el muón muere. Las instalaciones del sincrotrón de gradiente alterno (AGS, Alternating Gradient Synchrotron) en el Laboratorio Nacional de Brookhaven de Long Island, en Nueva York, nos proporcionan una buena manera de comprobar la teoría de Einstein. A finales de la década de 1990, los científicos de Brookhaven construyeron una máquina que producía haces de muones y los hacía circular alrededor de un anillo de 14 metros de diámetro a una velocidad del 99,94 por ciento de la de la luz. Si los muones solo viviesen 2,2 microsegundos mientras recorren el anillo, únicamente podrían dar 15 vueltas antes de morir.[4] En la práctica, los muones dan unas 400 vueltas, lo que significa que su tiempo de vida se multiplica por 29, hasta alcanzar algo más de 60 microsegundos. Es un hecho experimental. Parece que Einstein va por buen camino, pero ¿con cuánta precisión?

Es aquí donde las matemáticas que hemos desarrollado en la primera parte del capítulo nos serán muy útiles. Hemos hecho una predicción precisa sobre la magnitud del retraso de un pequeño reloj que se mueve a una determinada velocidad respecto a otro que se encuentre en reposo. Por lo tanto, podemos utilizar nuestra ecuación para predecir cuánto debería ralentizarse el tiempo cuando se viaja a un 99,94 por ciento de la velocidad de la luz, y ver así en qué proporción debería ampliarse el tiempo de vida del muón. Einstein predice que el tiempo de vida de los muones de Brookhaven debería ampliarse en un factor $\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$, con $v/c = 0{,}9994$. Si tienes una calculadora a mano, introduce los números y mira lo que pasa. La fórmula de Einstein da 29, exactamente el mismo resultado que los experimentos de Brookhaven.

Merece la pena dedicar un momento a reflexionar sobre lo que ha pasado. Utilizando únicamente el teorema de Pitágoras y la suposición de Einstein sobre la constancia de la velocidad de la luz, hemos deducido una fórmula matemática que nos ha permitido predecir la extensión del tiempo de vida de una partícula subatómica llamada muón cuando esta se acelera en la máquina de Brookhaven hasta un 99,94 por ciento de la velocidad de la luz. Nuestra predicción era que debería vivir 29 veces más tiempo que un muón en reposo, lo que concuerda exactamente con lo que observaron los científicos de Brookhaven. Cuanto más lo piensas, más asombroso es. ¡Bienvenido al mundo de la física! Evidentemente, la teoría de Einstein ya estaba bien consolidada a finales de la década de 1990. Los científicos de Brookhaven querían estudiar otras propiedades de sus muones; los efectos de la teoría de Einstein sobre la extensión de su tiempo de vida supusieron una recompensa adicional, pues significaban que tendrían más tiempo para observarlos.

Debemos, por tanto, concluir, porque así nos lo dice el experimento, que el tiempo es maleable. La velocidad con la que pasa varía de una persona a otra (o de un muón a otro), dependiendo de cómo se muevan.

Por si este desconcertante comportamiento del tiempo no fuese suficiente, nos espera algo más, que el lector atento quizá ya haya detectado. Volvamos a los muones que dan vueltas a toda velocidad en el AGS. Pongamos una pequeña línea de meta en el anillo y contemos cuántas veces la cruzan los muones antes de morir. Para la persona que los observa, la cruzan 400 veces porque su tiempo de vida ha aumentado. ¿Cuántas veces cruzarías la meta si pudieses acompañar a los muones en su recorrido circular? Tendrían que ser también 400, desde luego; si no, el mundo no tendría ningún sentido. El problema es que, según tu reloj, cuando te mueves con los muones por el anillo, estos viven únicamente 2,2 microsegundos, porque los muones están en reposo respecto a ti, y ese es el tiempo que viven los muones en reposo. Sin embargo, tanto el muón como tú conseguís dar unas 400 vueltas al anillo antes de que el muón finalmente expire. ¿Qué ha pasado? Cuatrocientas vueltas en 2,2 microsegundos no es algo que parezca posible. Por suerte, este dilema tiene solución. La circunferencia del anillo podría reducirse desde el punto de vista del muón. Para ser del todo consistentes, la longitud del anillo, tal y como la veis el muón y tú, debe reducirse exactamente en la misma proporción en que se extiende el tiempo de vida del muón. De forma que ¡el espacio también ha de ser maleable! Como sucede con la dilatación temporal, este efecto asimismo es real. Los objetos reales se encogen cuando se mueven. Como un ejemplo extraño, imagina un coche de 4 metros de largo que intenta encajar en un garaje de 3,9 metros de longitud. Einstein predice que si el coche se mueve a más del 22 por ciento de la velocidad de la luz, se encogerá lo justo para caber en el garaje, al menos durante un instante, antes de volver a chocar con las paredes. Repetimos: si has seguido el desarrollo matemático, podrás comprobar que la cifra es efectivamente del 22 por ciento. Si el coche se mueve aún más rápido, se encogerá hasta medir menos de 3,9 metros; si va más despacio, no se encogerá lo suficiente.

El descubrimiento de que el paso del tiempo puede ralentizarse y las distancias pueden encogerse ya es suficientemente extraño cuando se aplica al mundo de las partículas subatómicas, pero el razonamiento de Einstein es igualmente válido para objetos del tamaño de los seres humanos. Puede que un día tengamos que recurrir a este chocante comportamiento para poder sobrevivir. Imagina la vida en la Tierra en un futuro lejano. En unos pocos miles de millones de años, el Sol ya no podrá proporcionar constantemente la iluminación suficiente para hacer posible la vida en nuestro mundo, y se convertirá en una estrella monstruosa en ebullición inestable, perfectamente capaz de engullir nuestro planeta cuando se hinche y se aproxime a sus rojizos estertores finales. Si para entonces no nos hemos extinguido por algún otro motivo, los humanos tendremos que escapar de nuestro hogar ancestral y emprender viaje hacia las estrellas. La Vía Láctea, nuestra propia isla espiral de 100.000 millones de soles, tiene un diámetro de 100.000 años luz, lo que significa que la luz tarda 100.000 años en atravesarla, para alguien que se encuentre en la Tierra. Esperamos que sea evidente por qué es necesario introducir este último matiz, teniendo en cuenta todo lo que hemos estado diciendo. Podría parecer que los posibles destinos de la humanidad dentro de la Vía Láctea quedarían por siempre restringidos a la diminuta proporción de estrellas muy próximas a nuestro hogar (a escala astronómica), porque cuesta imaginar que fuésemos capaces de emprender un viaje hacia los remotos confines de la galaxia adonde la propia luz tardaría 100.000 años en llegar. Pero es aquí donde Einstein acude a nuestro rescate. Si pudiésemos construir una nave espacial que nos transportase por el espacio a velocidades muy próximas a la de la luz, las distancias a las estrellas se reducirían en una proporción que aumentaría cuanto más nos acercásemos a la velocidad de la luz. Si lográsemos movernos a un 99,99999999 por ciento de la velocidad de la luz, podríamos salir de la Vía Láctea y llegar a nuestra vecina galaxia de Andrómeda, que se encuentra a casi 3 millones de años luz de distancia, en apenas cincuenta años. Hay que reconocer que no parece una tarea menor, y en efecto no lo es. La mayor dificultad radica en encontrar la manera de propulsar una nave espacial de forma que consiguiese llegar a velocidades tan altas, pero lo cierto es que, si incorporamos a nuestro pensamiento la curvatura del tiempo y el espacio, podemos imaginar viajes a lugares remotos del universo que antes parecían imposibles. Si formases parte de la primera expedición de la humanidad hacia Andrómeda, que llegaría a una nueva galaxia tras un viaje de cincuenta años, tus hijos, nacidos en el espacio, podrían querer volver a su mundo de origen y contemplar la Tierra con sus propios ojos por primera vez. Para ellos, el Planeta Azul, no sería más que un cuento infantil espacial. Si diesen media vuelta a la nave y volviesen a la Tierra, el viaje entero de ida y vuelta a Andrómeda habría durado cien años. Sin embargo, cuando volviesen a entrar en la órbita terrestre, para los habitantes del planeta habría pasado la alucinante cantidad de seis millones de años. Quién sabe si la civilización de sus antepasados habría siquiera sobrevivido. Einstein nos ha abierto los ojos a un mundo extraño y maravilloso.

Capítulo 4
Espacio-tiempo

En los capítulos anteriores, hemos seguido el recorrido histórico que condujo a la relatividad, y de hecho nuestro razonamiento no ha sido muy distinto del que Einstein expuso originalmente. Nos hemos visto obligados a aceptar que el espacio no es ese gran escenario en el que tienen lugar los sucesos de nuestras vidas, como tampoco el tiempo es algo universal y absoluto. En su lugar, hemos pasado a una imagen del espacio y el tiempo mucho más maleable y subjetiva. El gran reloj celeste y, en cierto sentido, el propio cielo, han sido desterrados. Podemos creer que el mundo es una caja dentro de la cual nos afanamos en nuestros quehaceres, porque esa imagen nos permite darle sentido rápida y eficientemente. La capacidad de referir el movimiento de los objetos a una cuadrícula imaginaria es lo que podríamos llamar visión espacial, algo obviamente importante si uno quiere escapar de sus depredadores, encontrar comida y sobrevivir en un entorno peligroso y hostil. Pero no hay razón por la que este modelo, bien arraigado en nuestros cerebros y reforzado a lo largo de millones de años de selección natural, no sea más que eso, un modelo. Si cierta forma de pensar sobre el mundo confiere ventajas de cara a la supervivencia, esa forma de pensar se hará ubicua. Su exactitud científica es irrelevante. Lo importante es que, al optar por aceptar los resultados de los experimentos que Faraday realizó sobre su mesa de trabajo llena de manchas y las explicaciones codificadas por Maxwell, nos hemos comportado como científicos y hemos rechazado el cómodo modelo del espacio y el tiempo que permitió a nuestros antepasados sobrevivir y prosperar en las antiguas llanuras africanas. Este modelo se ha ido incrustando y reforzando en lo más profundo de nuestra psique debido a nuestras experiencias a lo largo de millones de años, y desecharlo puede resultar desconcertante. Esa vertiginosa sensación de confusión, cuando (con algo de suerte) viene seguida de una epifanía de claridad, constituye el regocijo de la ciencia. Si el lector siente ahora lo primero, esperamos que al final del libro hayamos conseguido también que experimente lo segundo.

Este no es un libro de historia. Nuestro objetivo es describir el espacio y el tiempo de la manera más esclarecedora posible, y pensamos que el recorrido histórico que condujo a la relatividad no es necesariamente el mejor camino hacia la comprensión. Desde un punto de vista moderno, más de un siglo después de la revolución de Einstein, hemos aprendido que hay una manera más profunda y satisfactoria de pensar sobre el espacio y el tiempo. En lugar de seguir profundizando en la perspectiva de los libros de texto antiguos, empezaremos desde cero, y al hacerlo comprenderemos lo que quería decir Minkowski cuando afirmó que el espacio y el tiempo debían combinarse en una única entidad. Una vez que hayamos desarrollado una representación más elegante, nos encontraremos en una buena posición para lograr nuestro objetivo principal: estaremos en condiciones de deducir $E = mc^2$.

Este es el punto inicial. Las teorías de Einstein pueden construirse prácticamente en su totalidad a partir del lenguaje de la geometría. Es decir, no se necesita mucha álgebra, sino únicamente imágenes y conceptos. Básicamente, la cuestión se reduce a tres conceptos fundamentales: invariancia, causalidad y distancia. A menos que seas físico, es muy probable que las dos primeras palabras no te resulten familiares y, aunque la tercera sí lo sea, tiene sus matices, como veremos.

La invariancia es un concepto fundamental para la física moderna. Levanta la vista del libro y mira a tu alrededor. Ahora date la vuelta y mira en la dirección contraria. El aspecto de tu habitación será diferente cuando la mires desde distintos puntos de vista, por supuesto, pero las leyes de la naturaleza son las mismas. Da igual que estés mirando hacia el norte, el sur, el este o el oeste, la gravedad sigue teniendo la misma intensidad y sigue manteniendo tus pies pegados al suelo. Tu televisor sigue funcionando cuando lo giras, y tu coche sigue arrancando aunque lo hayas aparcado en Londres, Los Ángeles o Tokio. Todos estos son ejemplos de invariancia en la naturaleza. Si se expresa así, parece que la invariancia es poco más que una obviedad. Pero resulta que obligar a que nuestras teorías científicas cumplan con el requisito de invariancia es algo asombrosamente fructífero. Acabamos de ver dos formas distintas de invariancia. El requisito de que las leyes de la naturaleza no varíen si cambiamos de orientación y las definimos mirando en una dirección diferente es lo que se denomina invariancia rotacional. El requisito de que las leyes no varíen si nos movemos de un lugar a otro es lo que se llama invariancia traslacional. Estos requisitos aparentemente triviales revelaron su asombrosa potencia en manos de Emmy Noether, a quien Albert Einstein describió como la mujer más importante en toda la historia de las matemáticas. En 1918 Noether publicó un teorema que puso de manifiesto una conexión profunda entre la invariancia y la conservación de determinadas cantidades físicas. Más adelante, volveremos a hablar sobre las leyes de conservación en la física, pero por ahora nos limitaremos a exponer el profundo descubrimiento de Noether. Cuando las leyes de la naturaleza permanecen invariables independientemente de la dirección en la que miremos, la cantidad que se conserva es el momento angular. En el caso de la invariancia traslacional, la cantidad que se conserva se denomina momento lineal. ¿Por qué habría de ser importante esto? Saquemos un interesante hecho físico de nuestra chistera metafórica y expliquémoslo.

La Luna se aleja 4 centímetros de la Tierra cada año. ¿Por qué? Imagina que la Luna permaneciese estacionaria sobre la superficie de la Tierra mientras ésta rota. El agua de los océanos que se encontrasen directamente bajo la Luna se elevaría un poco hacia ella, porque la gravedad lunar está tirando de ella, y la Tierra daría una vuelta completa sobre sí misma en un día, bajo esta protuberancia. Esta es la causa de las mareas. La fricción existente entre el agua y la superficie terrestre hace que la velocidad de rotación de la Tierra se ralentice. El efecto es muy pequeño, pero puede medirse: el día terrestre se está alargando progresivamente dos milésimas de segundo cada cien años. Para medir la velocidad de rotación, los físicos utilizan el momento angular, por lo que podemos decir que el momento angular de la Tierra está disminuyendo con el paso del tiempo. Noether nos dice que, debido a que el mundo tiene el mismo aspecto en todas las direcciones (para ser más precisos, las leyes de la naturaleza son invariantes bajo rotación), el momento angular se conserva, lo que significa que la cantidad total de rotación no debe variar. ¿Qué sucede entonces con el momento angular que la Tierra pierde debido a la fricción de las mareas? La respuesta es que se transfiere a la Luna, que se acelera en su órbita alrededor de la Tierra para compensar por la ralentización de la rotación terrestre. Esto hace que se aleje ligeramente de la Tierra. Dicho de otro modo, para garantizar que el momento angular total del sistema compuesto por la Tierra y la Luna se conserva, esta última debe desplazarse a una órbita más alejada de la Tierra para compensar por el hecho de que la velocidad de rotación de la Tierra está disminuyendo. Es un efecto extraordinario y muy real. La Luna es grande y, con cada año que pasa, se está alejando de la Tierra para conservar el momento angular. Al novelista italiano Ítalo Calvino esto le pareció tan maravilloso que escribió un cuento corto, titulado «La distancia de la Luna», en el que imaginó una época remota en la que nuestros antepasados podían hacerse a la mar cada noche en barcas, acercarse a la Luna cuando esta se ponía y trepar a su superficie usando escaleras. La Luna se fue alejando con los años y llegó una noche en la que los amantes de la Luna tuvieron que elegir entre quedar atrapados para siempre en ella o volver a la Tierra. Este sorprendente y, gracias a Calvino, extrañamente romántico fenómeno tiene su explicación en el abstracto concepto de invariancia y en la profunda conexión entre esta y la conservación de cantidades físicas.

Es difícil exagerar la importancia de la idea de invariancia en la ciencia moderna. En el núcleo de la física está el deseo de crear un marco intelectual universal en el que las leyes no sean nunca objeto de debate. Como físicos, buscamos descubrir las propiedades invariantes del universo porque, como bien sabía Noether, nos conducen a revelaciones reales y tangibles. Sin embargo, esta no es en absoluto una tarea fácil, porque la simplicidad y la belleza subyacentes de la naturaleza están normalmente ocultas.

En ninguna área de la ciencia es esto más cierto que en la moderna física de partículas. La física de partículas consiste en el estudio del mundo subatómico, es decir, en la búsqueda de los constituyentes fundamentales del universo y de las fuerzas de la naturaleza que los mantienen unidos. Ya nos hemos topado con una de las fuerzas fundamentales, el electromagnetismo. Entenderlo nos ha conducido a una explicación de la naturaleza de la luz que nos ha dado impulso en el camino hacia la relatividad. En el mundo subatómico se dejan sentir otras dos fuerzas de la naturaleza. La fuerza nuclear fuerte hace que el núcleo permanezca unido en el centro del átomo, y la fuerza nuclear débil permite que las estrellas brillen y es la responsable de ciertos tipos de desintegración nuclear. Por ejemplo, la utilización de la datación por radiocarbono para calcular la antigüedad de los objetos se basa en la fuerza nuclear débil. La cuarta fuerza es la gravedad, probablemente la que nos resulta más familiar, pero también, con mucha diferencia, la más débil. La mejor teoría de la gravedad de la que disponemos hoy en día sigue siendo la teoría de la relatividad general de Einstein, que, como veremos en el capítulo final, es una teoría del espacio y del tiempo. Estas cuatro fuerzas actúan entre solo doce partículas fundamentales para dar lugar a todo lo que existe en el mundo visible, incluidos el Sol, la Luna, las estrellas, todos los planetas del sistema solar y, de hecho, nuestros propios cuerpos. Todo esto constituye una asombrosa simplificación de lo que, a primera vista, se muestra como un universo casi infinitamente complicado.

Mira por la ventana. Quizá veas los reflejos deformados de una ciudad, cuando la luz vespertina se dispersa al incidir sobre láminas de acero y cristal, o ganado blanquinegro pastando en campos perfectamente vallados. Ya sea urbano o rural, lo más asombroso es que, desde prácticamente cualquier ventana del mundo, se observa en el paisaje la huella de la intervención humana. Nuestra civilización ha llegado a todos los lugares, y aun así la física del siglo XXI nos dice que, en esencia, todo se reduce a un baile matemático en el que participan un puñado de partículas subatómicas, orquestado por tan solo cuatro fuerzas de la naturaleza durante más de 13.700 millones de años. La complejidad de los cerebros humanos y los productos de la intensa síntesis entre conciencia y refinada habilidad que podemos observar desde nuestra ventana enmascaran la simplicidad y elegancia subyacentes en la naturaleza. La tarea del científico es encontrar las propiedades que actúan como piedra de Rosetta y nos permiten descifrar el lenguaje de la naturaleza y revelar su belleza.

La herramienta que nos permite buscar estas propiedades de la naturaleza y sacar provecho de ellas son las matemáticas. En sí misma, esta es una frase que da lugar a preguntas profundas, y se han escrito libros enteros para intentar encontrar motivos plausibles por los que habría de ser así. Citando de nuevo a Eugene Wigner: «El milagro de la idoneidad del lenguaje de las matemáticas para la formulación de las leyes de la física es un regalo maravilloso que ni comprendemos ni merecemos». Es posible que nunca lleguemos a entender el verdadero carácter de la relación entre las matemáticas y la naturaleza, pero la historia nos ha enseñado que las matemáticas nos permiten organizar nuestro pensamiento de una manera que resulta ser una guía fiable hacia un conocimiento más profundo.

Como nos hemos esforzado en recalcar, para continuar en esta senda, los físicos escriben ecuaciones que no hacen más que expresar relaciones entre distintas «cosas» del mundo real. Un ejemplo de una ecuación es velocidad = distancia/tiempo, que hemos visto en el capítulo anterior cuando hablábamos de los relojes de luz: con símbolos, $v = x/t$, donde v es la velocidad, x la distancia recorrida y t el tiempo necesario para recorrer dicha distancia x. Es muy sencillo: recuerda que, si recorres 100 kilómetros en una hora, te habrás movido a una velocidad de 100 kilómetros por hora. Las ecuaciones más interesantes serán aquellas capaces de proporcionar una descripción de la naturaleza con la que todo el mundo esté de acuerdo. Es decir, en ellas solo deberíamos encontrar cantidades invariantes. Así, todos podríamos estar de acuerdo en lo que estamos midiendo, con independencia del lugar desde el que miremos al universo. El sentido común nos dice que la distancia entre dos puntos en el espacio debería ser una de esas cantidades invariantes, y antes de Einstein lo era. Pero ya hemos visto en el capítulo anterior que no lo es. Recuerda: el sentido común no siempre es de fiar. De una forma similar, el paso del tiempo se ha convertido en algo subjetivo que varía dependiendo de la velocidad con la que los relojes se mueven entre sí. Einstein ha alterado el orden de las cosas de forma que ya ni siquiera podemos basarnos en la distancia y el tiempo para construir una representación fiable del universo. Por tanto, desde el punto de vista de un físico que busca las leyes fundamentales de la naturaleza, la ecuación $v = x/t$ no es muy útil, porque no expresa una relación entre cantidades invariantes. Al minar el valor del espacio y el tiempo, hemos socavado los cimientos mismos de la física. ¿Qué podemos hacer ahora?

Una posibilidad es tratar de restablecer el orden a partir de una conjetura. Conjetura es una forma elegante de decir «hipótesis» y los científicos las proponen continuamente. No se dan premios a la teoría subyacente más brillante; una hipótesis bien fundamentada y efectiva también servirá, siempre que concuerde con los experimentos. Nuestra conjetura es radical: el espacio y el tiempo pueden combinarse en una única entidad, que llamaremos «espacio-tiempo», en la que las distancias son invariantes. Es una afirmación atrevida, cuyo significado irá quedando claro a medida que avancemos. Si te paras a pensarlo, quizá te parezca menos osada que al principio. Si hemos de dar por perdidas las antiguas certezas de las distancias espaciales absolutas e invariables y del imperturbable paso con el que el gran reloj celestial marcaba los años, quizá lo único que podamos hacer sea buscar algún tipo de unificación de esos dos conceptos aparentemente tan distintos. Por lo tanto, nuestra tarea inmediata es la de buscar una nueva medida de la distancia en el espacio-tiempo que no varíe en función de cómo nos movamos unos respecto a otros. Tendremos que avanzar con cuidado, para entender bien cómo funciona la síntesis del espacio-tiempo. Pero ¿qué significa exactamente buscar una distancia en el espacio-tiempo?

Supongamos que me levanto a las 7 a. m. y termino de desayunar a las 8 a. m. Las siguientes afirmaciones son ciertas, pues son consecuencia de los experimentos: (1)

Mido la distancia espacial entre mi cama y la cocina y es de 10 metros, pero alguien que pase volando a gran velocidad mediría una distancia diferente; (2) Mi reloj indica que he tardado una hora en desayunar, pero, para el observador que pase a toda velocidad, la duración será diferente. Nuestra conjetura es que la distancia en el espacio-tiempo entre cuando me levanto de la cama y cuando termino de desayunar es algo en lo que todos podemos estar de acuerdo, es decir, es invariante. La existencia de este consenso es crucial, porque queremos construir un conjunto de leyes utilizando únicamente objetos de este tipo. Evidentemente, solo estamos suponiendo que las cosas son así, aún no hemos probado nada. Ni siquiera hemos decidido cómo calcular distancias en el espacio-tiempo. Pero, para seguir avanzando, primero tenemos que explicar el significado de la segunda de nuestras tres palabras clave, la causalidad.

El de causalidad es otro concepto en apariencia obvio cuya aplicación tiene profundas consecuencias. Es sencillamente el requisito según el cual la importancia de la causa y el efecto es tal que su orden no puede invertirse. Tu madre te dio a luz, y no existe representación consistente del espacio-tiempo en la que fuese posible que tú hubieses nacido antes que ella. Construir una teoría del universo en la que pudieses haber nacido antes sería absurdo y llevaría a contradicciones. Cuando se expone así, es difícil presentar argumentos en contra del requisito de causalidad.

No obstante, conviene tener en cuenta que los humanos somos capaces de ignorarlo a diario. Por ejemplo, pensemos en las profecías. Figuras como la de Nostradamus son idolatradas, incluso hoy en día, por haber sido supuestamente capaces de prever, en sueños o en un estado místico similar al trance, acontecimientos que sucederían en el futuro. En otras palabras, acontecimientos que sucedieron siglos después de la muerte de Nostradamus fueron visibles mientras estuvo vivo, al menos para él. Nostradamus murió en 1566, pero se le atribuye haber visto el Gran Incendio de Londres de 1666, la ascensión de Napoleón y de Hitler, los atentados del 11 de septiembre de 2001 en Estados Unidos y, nuestro favorito, el advenimiento del anticristo en Rusia en 1999. El anticristo aún no ha aparecido, pero puede que él/ella aún esté ascendiendo desde el infierno y llegue a tiempo de presentarse antes de que el libro se imprima, lo que nos obligaría a rectificar.

Dejando aparte entretenidas tonterías, necesitamos introducir varios términos importantes. La muerte de Nostradamus fue un «evento», como también lo fueron el nacimiento de Adolf Hitler y el Gran Incendio de Londres. Para que Nostradamus hubiese podido observar un evento como el Gran Incendio, que tuvo lugar tras su muerte, sería necesario que el orden de los dos eventos se invirtiese. Decirlo explícitamente es casi una tautología: Nostradamus murió antes del Gran Incendio, y por tanto no pudo haberlo visto. Para observarlo, el evento que es el Gran Incendio tendría que haberse podido ver antes que el evento que es la muerte de Nostradamus, y por lo tanto el orden de los eventos tendría que haberse invertido. Hay un matiz importante: Nostradamus pudo haber causado el Gran Incendio. Podríamos imaginar que hubiese dejado una suma de dinero en una cuenta bancaria para incitar a alguien a provocar un fuego en Pudding Lañe poco después de la medianoche del 2 de septiembre de 1666. Esto establecería una relación causal entre los eventos asociados con la vida y la muerte de Nostradamus y los eventos asociados con el Gran Fuego de Londres. Como veremos más adelante, el orden de los eventos conectados de este modo (eventos conectados causalmente) es de hecho el único que no puede invertirse. Causa y efecto son sagrados en el universo de Einstein.

Otros eventos se producen a una distancia suficiente, espacial y temporal, como para que no puedan tener ninguna influencia entre sí. Sorprendentemente, el orden de este tipo de eventos sí puede invertirse. La teoría de Einstein saca provecho del resquicio que permite que se altere el orden de los eventos siempre que ello no tenga ninguna incidencia en absoluto en el funcionamiento del universo. Más adelante explicaremos qué queremos decir con «una distancia suficiente». De momento, hemos introducido el concepto de causalidad como un axioma que utilizaremos para construir nuestra teoría del espacio-tiempo. Evidentemente, la capacidad de la teoría para predecir el resultado de los experimentos será su juez último. Por cierto, Nostradamus sí acertó con una de sus predicciones. Mientras sufría los efectos de un brote de gota particularmente agudo, le dijo a su secretario: «No me verás con vida al amanecer». A la mañana siguiente lo encontraron muerto en el suelo.

¿Qué tiene que ver la causalidad con el espacio-tiempo, y en particular con las distancias en el espacio-tiempo? Pronto descubriremos que obligar a que el universo sea causal impone restricciones en la estructura del espacio-tiempo, hasta tal punto que únicamente deja una opción posible. Solo existirá una manera de combinar el espacio y el tiempo para crear el espacio-tiempo que preserve el orden causal de las cosas. Cualquier otra forma violaría la causalidad y nos permitiría hacer cosas extraordinarias, como retroceder en el tiempo para impedir nuestro propio nacimiento o, en el caso de Nostradamus, quizá evitar un estilo de vida que le llevó a sufrir de gota.

Figura 3

Retomemos la tarea de desarrollar el concepto de distancia en el espacio-tiempo. Para ir calentando, de momento dejaremos a un lado el tiempo y reflexionaremos sobre la idea de distancia en el espacio tridimensional habitual, un concepto al que todos estamos acostumbrados. Supongamos que intentamos medir la distancia más corta entre dos ciudades en un mapa plano de la Tierra. Como sabe cualquiera que haya tomado un vuelo de largo recorrido y haya visto cómo avanzaba en el mapa que aparece en las pantallas de vídeo, la distancia más corta entre dos puntos de la superficie terrestre aparece como una curva. Esa línea es lo que se conoce como un gran círculo. La figura 3 representa un mapa de la Tierra sobre el que hay dibujada una línea que corresponde a la distancia más corta entre Manchester y Nueva York. Es fácil entender la forma de esta línea sobre un globo terráqueo, pero a primera vista sorprende ver que una línea curva represente la distancia más corta entre dos puntos. Esto se debe a que la superficie terrestre no es plana, sino curva. Para ser más específicos, la Tierra es una esfera. La naturaleza curva de la superficie terrestre es también la razón por la que, en algunos mapas planos, Groenlandia parece mucho más grande que Australia, cuando en realidad es mucho más pequeña. El mensaje es claro: las líneas rectas representan la distancia más corta entre dos puntos únicamente en un espacio plano. La geometría del espacio plano se conoce habitualmente como geometría euclidiana. Sin embargo, lo que Euclides no sabía en su época, y en realidad no se vio con claridad hasta el siglo XIX, era que su geometría del espacio plano es solo un ejemplo concreto de una familia entera de geometrías posibles, cada una de ellas matemáticamente consistente y algunas de las cuales se pueden utilizar para describir la naturaleza. Un muy buen ejemplo es la superficie de la Tierra, que es curva y por tanto se describe mediante una geometría no euclidiana. En particular, la distancia más corta entre dos puntos no es una línea recta euclidiana.

Existen otras propiedades euclidianas a las que estamos acostumbrados y que no se cumplen en la superficie terrestre. Por ejemplo, los ángulos interiores de un triángulo ya no suman 180 grados, y las líneas que son paralelas y tienen dirección norte-sur en el ecuador se cruzan en los polos. Si ya no se puede aplicar la geometría euclidiana, necesitamos encontrar la manera de calcular distancias en un espacio curvo como el de la superficie terrestre. Una forma de hacerlo sería medir las distancias directamente con un trozo de cuerda sobre un globo terráqueo. De esta manera, estaríamos teniendo debidamente en cuenta la curvatura de la Tierra. Un piloto de avión podría tender un pedazo de cuerda entre dos ciudades del globo, medir su longitud con una regla, y después simplemente multiplicar el resultado por la proporción entre el tamaño del globo y el de la Tierra. Pero puede que no tengamos un globo a mano, o que necesitemos desarrollar un programa informático de navegación para aviones. En cualquier caso, tenemos que conseguir algo mejor que un trozo de cuerda y encontrar una ecuación que nos diga la distancia entre dos puntos cualesquiera de la superficie terrestre a partir únicamente de sus longitudes y latitudes y de la forma y tamaño de la Tierra. No es tan difícil encontrar una ecuación así y, si sabes algo de matemáticas, puedes incluso intentarlo tú mismo. No necesitamos escribirla aquí, pero lo importante es que existe una ecuación, y que no se parece mucho a la geometría euclidiana de un tablero plano. No obstante, sí permite calcular la distancia más corta entre dos puntos en una esfera de una manera bastante similar a como el teorema de Pitágoras se utiliza para obtener la distancia más corta entre dos puntos (la hipotenusa) en un tablero, a partir de las distancias desde una esquina medidas a lo largo de los bordes de la mesa. Como las líneas rectas pertenecen al dominio de Euclides, introduciremos una nueva expresión para la distancia más corta entre dos puntos que es válida tanto para un espacio plano como para uno curvo. Esta línea se denomina geodésica: un gran círculo es una geodésica en la superficie terrestre y una línea recta lo es en un espacio plano. Hasta aquí las distancias en el espacio tridimensional. Ahora tenemos que decidir cómo medir distancias en el espacio-tiempo, para lo cual hemos de complicar las cosas e incorporar el tiempo a la combinación.

En la escena en la que nos levantábamos de la cama y desayunábamos en la cocina, ya hemos introducido los conceptos que vamos a necesitar ahora. No es incorrecto decir que la distancia espacial entre la cama y la cocina es de 10 metros. También podríamos decir, aunque suene algo extraño, que la distancia temporal entre cuando nos levantamos de la cama y cuando terminamos de desayunar es de una hora. No es así como solemos pensar en el tiempo, porque no estamos acostumbrados a describirlo con el lenguaje de la geometría. Preferiríamos decir: «Ha pasado una hora entre el momento en que me he levantado de la cama y cuando he terminado de desayunar». De la misma manera, normalmente no diríamos: «Han pasado 10 metros entre que me he levantado de la cama y me he sentado en la cocina». El espacio es el espacio y el tiempo es el tiempo, y nunca se han de entremezclar. Pero nos hemos impuesto la tarea de tratar de combinar el espacio y el tiempo entre sí, porque sospechamos que es la única manera de reconstruir las cosas para que encajen con lo que afirman Maxwell y Einstein. Sigamos adelante, pues, y veamos adónde nos conduce esto. Si no eres científico, esta puede ser la parte más complicada del libro hasta ahora, porque operaremos de una manera totalmente abstracta. La capacidad de pensamiento abstracto es lo que le confiere a la ciencia su potencia, pero quizá también su reputación de complicada, porque no es una facultad que necesitemos demasiado en nuestra vida diaria. Ya nos hemos encontrado con un difícil concepto abstracto en la forma de los campos eléctrico y magnético y, de hecho, comparado con eso, es probable que la abstracción necesaria para combinar el espacio y el tiempo no sea para tanto.

Lo que estamos haciendo implícitamente al hablar de la «distancia temporal» es tratar el tiempo como una dimensión adicional. Estamos acostumbrados a la expresión «3-D», por tridimensional, utilizada para referirse al hecho de que el espacio tiene tres dimensiones: arriba y abajo; izquierda y derecha; hacia delante y hacia atrás. Si intentamos añadir el tiempo al esquema, para poder definir distancias en el espacio-tiempo, estamos de hecho creando un espacio de cuatro dimensiones. Hemos de tener claro que la dimensión temporal se comporta de manera diferente a las dimensiones espaciales. En el espacio tenemos completa libertad de movimientos, mientras que en el tiempo solo nos movemos en una dirección, y el tiempo nos parece completamente distinto del espacio. Pero eso no tiene por qué ser un obstáculo insalvable. Pensar en el tiempo como «solo una dimensión más» es el salto abstracto que hemos de dar. El truco, aunque pueda sonar muy confuso, es imaginar cómo te sentirías si fueses una criatura que solo pudieses moverte hacia delante y hacia atrás, o a izquierda o derecha y que nunca hubieses experimentado arriba y abajo, porque vivieses en un mundo plano. Si alguien te pidiese que imaginases una tercera dimensión, tu mente plana sería incapaz de hacerlo. Pero, si tuvieses inclinaciones matemáticas, podrías aceptar la posibilidad gustosamente y, en cualquier caso, siempre podrías seguir los razonamientos matemáticos aunque no pudieses representar en tu cabeza la misteriosa dimensión adicional. A medida que nuestra historia vaya avanzando, debería ser más fácil pensar en el tiempo como «solo una dimensión más». Si hay algo que intentamos enseñar a nuestros alumnos cuando llegan a la Universidad de Manchester, dispuestos a aprender a ser físicos, es que todo el mundo se siente desconcertado y se bloquea. Muy poca gente entiende los conceptos difíciles la primera vez que se topa con ellos, y la manera de alcanzar una comprensión más profunda pasa por ir avanzando paso a paso. En palabras de Douglas Adams: « ¡Que no cunda el pánico!».

Prosigamos ahora en un tono más ligero dando cuenta de algo muy sencillo: las cosas suceden. Nos levantamos, preparamos el desayuno, nos lo comemos, etcétera. Denominaremos «evento espaciotemporal» a la ocurrencia de una cosa. Podemos describir unívocamente un evento en el espacio-tiempo mediante cuatro números: tres coordenadas espaciales, que señalan dónde ha sucedido, y una coordenada temporal, que indica cuándo ha sucedido. Las coordenadas espaciales se pueden especificar utilizando cualquier sistema tradicional de medida. Por ejemplo, longitud, latitud y altitud podrían servir si el evento se produce en las inmediaciones de la Tierra. Tus coordenadas cuando estás en la cama podrían ser 53° 28' 2,28" N, 2° 13' 50,52" O y 38 metros por encima del nivel del mar. La coordenada temporal se especifica mediante un reloj (como el tiempo no es universal, para evitar ambigüedades tendríamos que identificar qué reloj utilizamos) y podría ser 7 a. m. GMT[5] en el momento en que suena la alarma y te despiertas. Así pues, tenemos cuatro números que localizan unívocamente cualquier evento en el espacio-tiempo. Fíjate en que las coordenadas que hemos elegido no tienen nada de particular. De hecho, estas coordenadas en concreto se miden respecto a una línea que atraviesa Greenwich, en Londres, Inglaterra. Veinticinco países se pusieron de acuerdo en esta convención, que se acordó en octubre de 1884 con la única voz discordante de Santo Domingo (Francia se abstuvo). La idea de que no debería haber ninguna diferencia entre elegir unas coordenadas u otras es algo muy importante.

Tomemos el momento en el que me despierto en la cama como nuestro primer evento espaciotemporal. El segundo podría ser el evento que marca el final del desayuno. Hemos dicho que la distancia espacial entre los dos eventos es de 10 metros y que la distancia temporal es de 1 hora. Para evitar ambigüedades, tendríamos que decir algo como: «He medido la distancia entre mi cama y la mesa donde desayuno utilizando una cinta métrica que se extendía directamente desde la cama a la mesa» y: «He medido el intervalo temporal utilizando el reloj de la mesilla de noche y el que hay en la cocina». No olvides que ya sabemos que estas dos distancias, la espacial y la temporal, no son cosas sobre las que exista un acuerdo universal. Alguien que pasase en un avión por encima de tu casa diría que tu reloj avanza más despacio y que la distancia entre tu cama y la mesa se reduce. Nuestro objetivo es encontrar una distancia en el espacio-tiempo con la que todo el mundo esté de acuerdo. La pregunta del millón es, pues: «¿Cómo partimos de los 10 metros y la hora para construir una distancia invariante en el espacio-tiempo?». Tenemos que ir con pies de plomo y, como en el caso de las distancias sobre la superficie terrestre, no asumiremos una geometría euclidiana.

Si vamos a calcular distancias en el espacio-tiempo, hemos de resolver un problema urgente. Si la distancia espacial se mide en metros y la distancia temporal en segundos, ¿cómo podemos siquiera pensar en combinarlas? Es como sumar manzanas y peras, porque no son cantidades del mismo tipo. Sin embargo, podemos convertir distancias y tiempos, y viceversa, utilizando la ecuación que hemos visto antes, $v = x/t$. Con un poquito de álgebra, podemos escribir el tiempo como $t = x/v$, o la distancia como $x = vt$. Dicho de otra manera, la distancia y el tiempo pueden intercambiarse utilizando algo con dimensiones de velocidad. Introduzcamos, pues, una velocidad de conversión, que llamaremos *c*. Podremos entonces medir el tiempo en metros, siempre que multipliquemos cualquier intervalo temporal por nuestra velocidad de conversión. En este punto de nuestro razonamiento, *c* podría ser cualquier velocidad, ya que aún no nos hemos decidido por ningún valor en particular. De hecho, este truco de intercambiar tiempo y distancia es muy habitual en astronomía, donde la distancia a las estrellas y a las galaxias se suele medir en años luz, que es la distancia que la luz recorre en un año. No nos parece tan extraño porque estamos acostumbrados, pero en realidad se trata de una distancia medida en años, que es una unidad de tiempo. En el caso de la astronomía, la velocidad de conversión es la velocidad de la luz.

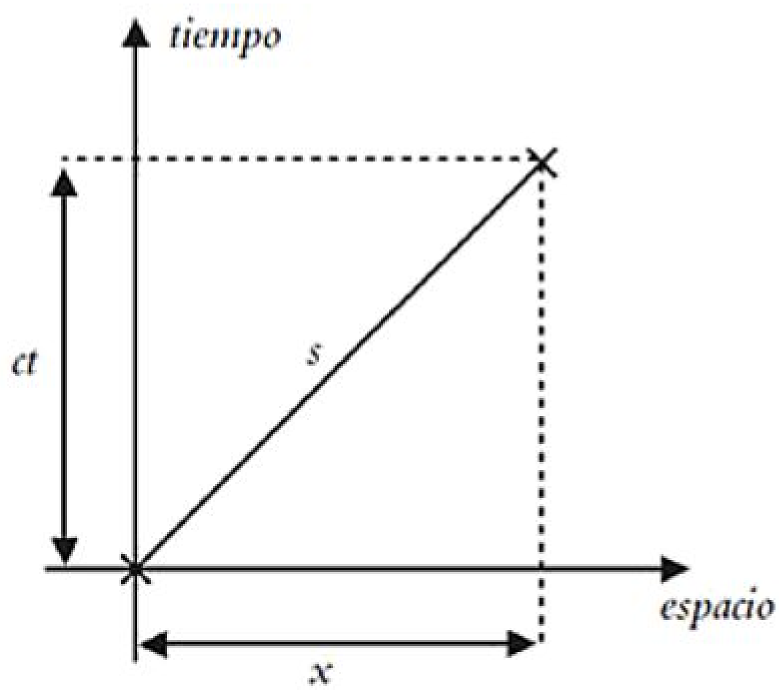

Figura 4

Hemos avanzado: nuestros intervalos espaciales y temporales ya tienen las mismas dimensiones. Por ejemplo, ambos podrían venir dados en metros, o millas, o años luz, o lo que fuese. La figura 4 representa dos eventos en el espacio-tiempo, marcados con pequeñas cruces. Lo fundamental es que queremos encontrar una regla para calcular la distancia entre los dos eventos en el espacio-tiempo. Viendo la figura, queremos saber la longitud de la hipotenusa, dadas las de los otros dos lados. Para ser algo más precisos, denominaremos x a la longitud de la base del triángulo, mientras que la altura será ct. Eso significa que los dos eventos están a una distancia x en el espacio y a una distancia ct en el tiempo. Nuestro objetivo, por tanto, es responder a la pregunta: « ¿Cuánto mide la hipotenusa, s, en función de x y ct?». Retomando nuestro ejemplo anterior, x = 10 metros es la distancia espacial desde la cama a la mesa de la cocina y t = 1 hora es la distancia temporal. Hasta ahora, como c es arbitraria, ct puede tomar cualquier valor y no parece que hayamos avanzado mucho. Aun así, prosigamos.

Tenemos que decidir cómo vamos a medir la longitud de la hipotenusa, la distancia entre dos eventos en el espacio-tiempo. ¿Deberíamos optar por el espacio euclidiano, en cuyo caso podríamos aplicar el teorema de Pitágoras, o por algo más complicado? Quizá nuestro espacio debería ser curvo, como la superficie terrestre, o tener otra forma más complicada. De hecho, podríamos imaginar infinitas maneras de calcular distancias. Seguiremos el procedimiento que suelen emplear los físicos y propondremos una hipótesis. Para ello, aplicaremos un principio muy útil e importante, conocido como la navaja de Ockham, en honor del pensador inglés Guillermo de Ockham, que vivió a principios del siglo XIV. Exponer la idea que contiene es fácil, pero trasladarla a la vida cotidiana es mucho más difícil. Se podría resumir como: «No compliquemos las cosas más de lo necesario». Ockham lo expresó como: «La pluralidad no se debe postular sin necesidad», que suscita una pregunta: ¿por qué no siguió su propia regla a la hora de construir frases? Se presente como se presente, el principio de la navaja de Ockham tiene mucha fuerza, es incluso brutal, si se aplica a los razonamientos sobre el mundo natural. En realidad, dice que se debe probar primero con la hipótesis más sencilla, y solo si esta fracasa se debe ir aumentando la complejidad poco a poco hasta que la hipótesis encaje con la evidencia experimental. En nuestro caso, la manera más sencilla de construir una distancia pasa por asumir que al menos la parte espacial de nuestro espacio-tiempo debería ser euclidiana; en otras palabras, el espacio es plano. Esto significa que la manera habitual de calcular la distancia en el espacio entre los objetos que se encuentran en la habitación donde estamos leyendo este libro se transpone intacta a nuestro nuevo esquema. ¿Podría haber algo más sencillo? La pregunta, entonces, es cómo deberíamos incluir el tiempo. Otra suposición que simplifica nuestra tarea es la de que nuestro espacio-tiempo no varía y es igual en cualquier lugar. Son suposiciones importantes. De hecho, Einstein decidió en un momento dado relajarlas, y hacerlo le permitió contemplar la alucinante posibilidad de que la presencia de materia y energía pudiese alterar constantemente el espacio-tiempo. Eso le condujo a la teoría de la relatividad general, que, a día de hoy, sigue siendo la mejor teoría de la gravedad de que disponemos. Llegaremos a la relatividad general en el capítulo final, pero de momento podemos ignorar estas complicaciones. Una vez que nos dejamos guiar por Ockham y aplicamos estas dos suposiciones simplificadoras, nos quedan únicamente dos posibles maneras de calcular distancias en el espacio-tiempo. La longitud de la hipotenusa debe ser

$$s^2 = (ct)^2 + x^2,$$

o bien

$$s^2 = (ct)^2 - x^2.$$

No existe otra opción. Aunque no lo hemos demostrado, nuestra suposición de que el espacio-tiempo no debe variar y debe ser igual en cualquier lugar nos lleva a estas dos únicas posibilidades, y hemos de elegir entre el signo positivo y el negativo. Evidentemente, con demostración o sin ella, podemos ser pragmáticos y ver qué sucede cuando nos probamos cada una de ellas para ver cómo nos quedan.

Cambiar el signo implica que las matemáticas dejan de ser una extensión de la ya conocida ecuación de Pitágoras. Nuestra tarea consiste en dilucidar si deberíamos quedarnos con la versión de Pitágoras, con signo positivo, o pasar a la versión de la ecuación con signo negativo. Quizá a primera vista parezca raro darle vueltas a esta idea. ¿Qué motivo podría haber para siquiera plantearse usar la ecuación de Pitágoras con signo negativo? Pero esa no es la mejor manera de pensar. La fórmula para calcular distancias sobre una esfera tampoco se parece nada a la de Pitágoras, así que lo único que estamos haciendo es barajar la posibilidad de que el espacio-tiempo no sea plano, en el sentido euclidiano del término. De hecho, puesto que la versión con signo negativo es la única opción, aparte de la que tiene signo positivo (teniendo en cuenta los supuestos de los que partimos), no existe un motivo lógico por el que debamos descartarla a estas alturas. Por tanto, deberíamos seguir con ella y explorar sus consecuencias. Si ninguna de las dos versiones, positiva o negativa, nos sirve y no conseguimos construir una medida viable de la distancia en el espacio-tiempo, tendremos que volver a empezar.

Estamos a punto de embarcarnos en un razonamiento muy elegante, pero quizá también delicado. Cumpliremos nuestra promesa de no usar nada más complicado que el teorema de Pitágoras, pero puede que tengas que leerlo más de una vez para entenderlo. Merecerá la pena, porque si lo sigues con detenimiento puede que experimentes una sensación que el biólogo Edward O. Wilson describe como el hechizo jónico. Proviene de la obra de Tales de Mileto, a quien Aristóteles, dos siglos después, atribuye el mérito de haber puesto los cimientos de las ciencias físicas, en Jonia en el siglo VI antes de Cristo. Esta expresión poética describe la creencia de que la complejidad del mundo puede explicarse mediante un número reducido de sencillas leyes naturales porque, en esencia, el mundo es ordenado y sencillo (lo que nos hace pensar en el ensayo de Wigner). La tarea del científico es la de aislarse de la complejidad que vemos a nuestro alrededor para mostrar esa simplicidad subyacente. Cuando el proceso tiene éxito, y revela la simplicidad y unidad del mundo, experimentamos el hechizo jónico. Imagina por un momento que cae en la palma de tu mano un copo de nieve. Es una estructura elegante y bella, de una simetría cristalina irregular. No hay dos copos iguales y, a primera vista, este hecho parece hacer imposible una explicación sencilla. La ciencia nos ha permitido saber que la aparente complejidad de los copos de nieve oculta una exquisita simplicidad subyacente; cada copo resulta de la ordenación de miles de millones de moléculas de agua, H_2O. Un copo no es más que eso, y sin embargo, cuando esas moléculas de agua se unen en la atmósfera de nuestro planeta en una fría noche de invierno, emerge una abrumadora complejidad de estructura y forma.

Para zanjar la cuestión del signo positivo o negativo, hemos de dirigir nuestra mirada hacia la causalidad. Supongamos primero que la de Pitágoras es la ecuación correcta para las distancias en el espacio-tiempo; es decir, que $s^2 = (ct)^2 + x^2$. Volvamos una vez más a nuestros dos eventos: despertarse en la cama a las 7 a. m. y terminar de desayunar en la cocina a las 8 a. m. Haremos algo que quizá te dé escalofríos al recordar las clases de matemáticas del colegio y cómo mirabas por la ventana los campos de fútbol, inmaculados y sugerentes bajo la luz de la tarde primaveral: llamaremos *O* al evento del despertar y *A* al del final del desayuno. Lo hacemos únicamente por brevedad, sin ninguna intención de volver a vestir pantalones cortos y cubrirnos de polvo de tiza.

Sabemos que la distancia espacial entre *O* y *A* es $x = 10$ metros, y que la distancia temporal entre los dos eventos es $t = 1$ hora, si soy yo quien las mido. Aún no hemos decidido cuál es el valor de *c*, pero cuando lo hagamos conoceremos *ct* y podremos entonces utilizar la ecuación para la distancia para calcular *s*, la separación entre los eventos *O* y *A* en el espacio-tiempo. Nuestra hipótesis es que, aunque *x* y *t* serán diferentes cuando los mida alguien que pase en un avión a una velocidad próxima a la de la luz, la distancia *s* será la misma. Dicho de otro modo, *x* y *t* pueden variar, y lo harán, pero de tal manera que *s* nunca cambiará. Aun a riesgo de resultar demasiado insistentes, queremos recordarte que nuestro objetivo siempre es erigir las leyes de la física utilizando objetos invariantes en el espacio-tiempo, y la distancia *s* es uno de ellos. Por si acaso suena demasiado abstracto, lo repetiremos de nuevo utilizando un lenguaje matemático menos rebuscado: las reglas de la naturaleza deben expresar relaciones entre cosas reales, y esas cosas viven en el espacio-tiempo. Algo que vive en el espacio-tiempo es similar a un objeto que está en una habitación. El espacio-tiempo (o la habitación) es el escenario donde esa cosa vive. La naturaleza de las cosas reales no es una cuestión de opinión, y en ese sentido decimos que es invariante. Un ejemplo tridimensional de algo que no es invariante podría ser la sombra titilante de un objeto que está en una habitación donde arde un fuego que lo ilumina.

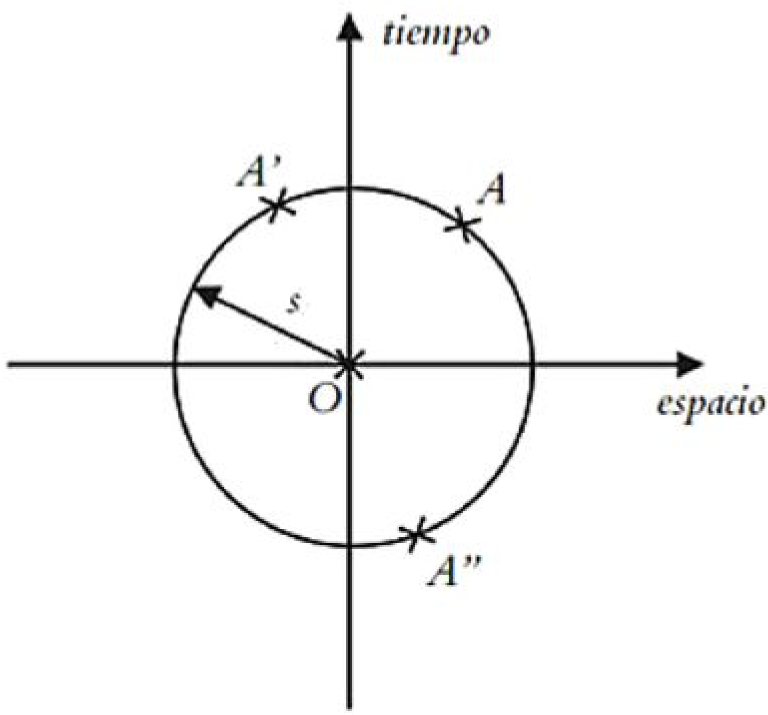

Figura 5

Es evidente que la sombra varía dependiendo de cómo arda y de dónde se encuentre el fuego, pero en ningún caso nos cabe la duda de que la proyecta un objeto real e invariable. Utilizando el espacio-tiempo, nuestro propósito es elevar la física por encima de las sombras y encontrar las relaciones entre objetos reales.

El hecho de que dos observadores diferentes puedan no estar de acuerdo sobre los valores de *x* y *t*, siempre que *s* sea la misma, tiene una consecuencia muy importante, que es muy fácil visualizar. La figura 5 representa un círculo centrado en *O*, el evento del despertar, con radio *s*. Como, de momento, estamos usando la forma pitagórica de la ecuación de la distancia, todos los puntos que están sobre la circunferencia del círculo se encuentran a la misma distancia *s* respecto a *O*. Esto resulta evidente: la distancia *s* es el radio del círculo. Los puntos en el exterior del círculo están más alejados de *O*, mientras que los puntos en su interior estás más próximos a *O*. Pero nuestra hipótesis es que *s* es la distancia en el espacio-tiempo entre los eventos *O* y *A*. En otras palabras, el evento *A* podría estar en cualquier punto de la circunferencia del círculo y encontrarse a una distancia espaciotemporal *s* de *O*. ¿En qué punto del círculo debería encontrarse el evento *A*? Eso depende de quién esté midiendo *x* y *t*. Sabemos exactamente cuál es ese punto para mí, que estoy en la casa, ya que *x* = 10 metros y *t* = 1 hora. Eso es lo que hemos representado en el diagrama marcado con la etiqueta *A*. Para una persona que sobrevolase la casa en un cohete a alta velocidad, la distancia espacial *x* y la distancia temporal *t* cambiarían, pero, si *s* ha de ser la misma, el evento seguirá estando en algún punto del círculo. Por lo tanto, observadores diferentes obtendrán distintas posiciones en el espacio y en el tiempo por separado para el mismo evento, pero siempre sujetas a la restricción de que únicamente desplazamos el punto alrededor del círculo. Hemos marcado dos posibles posiciones como *A*' y *A*''. Con la posición *A*' no sucede nada especialmente interesante, pero fíjate en la posición *A*''. Aquí sí que sucede algo espectacular: la distancia temporal entre *A*'' y *O* es negativa. En otras palabras, *A*'' sucedió antes que *O*. Se encuentra ahora en el pasado de *O*. ¡Este es un mundo en el que terminas de desayunar antes de despertarte! Algo así es una clara violación de nuestro apreciado axioma de la causalidad.

Por cierto, las imágenes como las que se muestran en las figuras 4 y 5 se llaman «diagramas espaciotemporales» y suelen servirnos para entender qué es lo que sucede. En realidad, son muy sencillos. Las cruces en un diagrama espaciotemporal denotan eventos; desde el evento se puede trazar verticalmente una recta hasta la línea marcada como «espacio» (el eje espacial) para calcular la distancia espacial entre el evento y *O*. Análogamente, una recta horizontal desde el evento hasta la línea marcada como «tiempo» (el eje temporal) nos permite conocer la diferencia temporal entre el evento y *O*. Podemos interpretar el área que existe por encima del eje espacial como el futuro de *O* (porque *t* es positivo para cualquier evento en esa región) y el área por debajo como el pasado (porque *t* es en ese caso negativo). El problema con el que nos hemos encontrado es que hemos construido una definición de la distancia espaciotemporal *s* entre los eventos *O* y *A* que permite que este último se encuentre tanto en el pasado como en el futuro de *O*, dependiendo de cómo se mueva la persona que observa los eventos. Dicho de otra forma, hemos descubierto que el requisito de causalidad está estrechamente relacionado con la manera en que definimos la distancia en el espacio-tiempo, y que la sencilla definición pitagórica con el signo positivo no nos sirve.

Nos encontramos frente a lo que el biólogo inglés Thomas Henry Huxley célebremente definió como «la gran tragedia de la ciencia, el asesinato de una bella hipótesis por un hecho horrible». Una vez, William Wilberforce le preguntó a Huxley, conocido como el bulldog de Darwin por su encendida defensa de la evolución, si, cuando decía que descendía del mono, era por parte de su abuelo o de su abuela. Se dice que Huxley respondió que no se avergonzaría de tener un mono como antepasado, pero sí le daría vergüenza que lo relacionasen con un hombre que utilizaba sus grandes dones para ocultar la verdad. La trágica verdad en nuestro caso es que debemos rechazar la hipótesis más sencilla si queremos preservar la causalidad, y pasar a algo un poco más complicado.

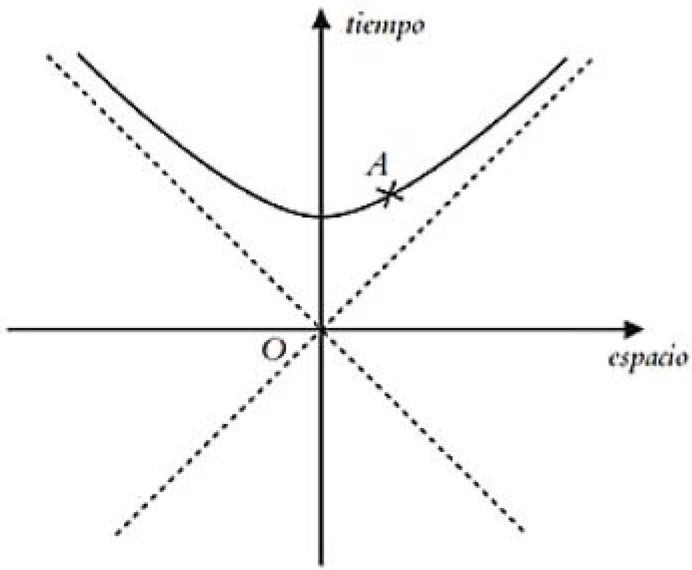

Figura 6

Nuestra siguiente hipótesis, la única que nos queda, es que la distancia entre puntos en el espacio-tiempo se calcula utilizando $s^2 = (ct)^2 - x^2$. *A* diferencia de la versión con el signo positivo, este es un mundo en el que la geometría euclidiana no es válida, como sucede con la geometría de la superficie terrestre. Los matemáticos tienen un nombre para un espacio en el que la distancia entre dos puntos se rige por esta ecuación: espacio hiperbólico. Los físicos tienen un nombre distinto. Lo llaman espacio-tiempo de Minkowski. El lector puede tomar este hecho como un indicio de que vamos por el buen camino. Nuestra máxima prioridad debe ser dilucidar si el espacio-tiempo de Minkowski viola las exigencias de la causalidad.

Para responder a esta pregunta debemos, una vez más, fijarnos en las líneas que se encuentran a una distancia espaciotemporal constante de *O*. Es decir, queremos estudiar el equivalente a los círculos en el espacio-tiempo euclidiano. El signo negativo es el que supone una gran diferencia. En la figura 6 se muestran los mismos eventos de siempre, *O* y *A*, junto con la línea de puntos que se encuentran a la misma distancia espaciotemporal *s* respecto a *O*. Es de crucial importancia el hecho de que los puntos ya no forman un círculo, sino que se encuentran sobre una curva que los matemáticos denominan hipérbola. En términos matemáticos, todos los puntos de la curva satisfacen nuestra ecuación para la distancia (esto es, s^2 =

$(ct)^2 - x^2$). Fíjate en que la curva tiende hacia las líneas de puntos que forman ángulos de 45 grados con los ejes. Ahora, la situación desde el punto de vista de los observadores que van en un cohete es completamente diferente respecto a la versión con signo positivo, porque el evento *A* siempre se encuentra en el futuro del evento *O*. Podemos desplazar *A* a un lado o a otro, pero nunca hacia el pasado de *O*. En otras palabras, todo el mundo está de acuerdo en que nos despertamos antes de terminar de desayunar. Podemos suspirar aliviados: en el espacio-tiempo de Minkowski no se viola la causalidad.

Conviene repetirlo, porque es una de las ideas más importantes del libro. Si optamos por definir la distancia espaciotemporal entre dos eventos *O* y *A* utilizando la ecuación de Pitágoras pero con un signo negativo, entonces, independientemente de cómo vea los eventos cualquier otra persona, *A* nunca entra en el pasado de *O*; solo se mueve a lo largo de la hipérbola. Eso significa que si, según un observador, el evento *A* está en el futuro de *O*, cualquier otro observador también verá que *A* se encuentra en el futuro de *O*. Como la hipérbola nunca entra en el pasado de *O*, todo el mundo está de acuerdo en que uno toma el desayuno después de despertarse.

Acabamos de completar un razonamiento delicado. Desde luego, no significa que acertásemos con nuestra hipótesis original de que debía existir una distancia «invariante» en el espacio-tiempo en la que todos los observadores pudiesen coincidir. Lo que sí significa, sin embargo, es que nuestra hipótesis ha pasado una prueba importante: ha cumplido con el requisito de causalidad. Pero no hemos acabado, porque no nos limitamos a juguetear con las matemáticas. Somos físicos y estamos tratando de construir una teoría que describa cómo funciona el mundo. La prueba definitiva y decisiva de nuestra teoría será si es o no capaz de ofrecer predicciones que concuerden con los experimentos, y aún no estamos preparados para hacer una predicción, porque no conocemos el valor de la velocidad de conversión, *c*. Si no tenemos un número, simplemente no podemos hacer las sumas.

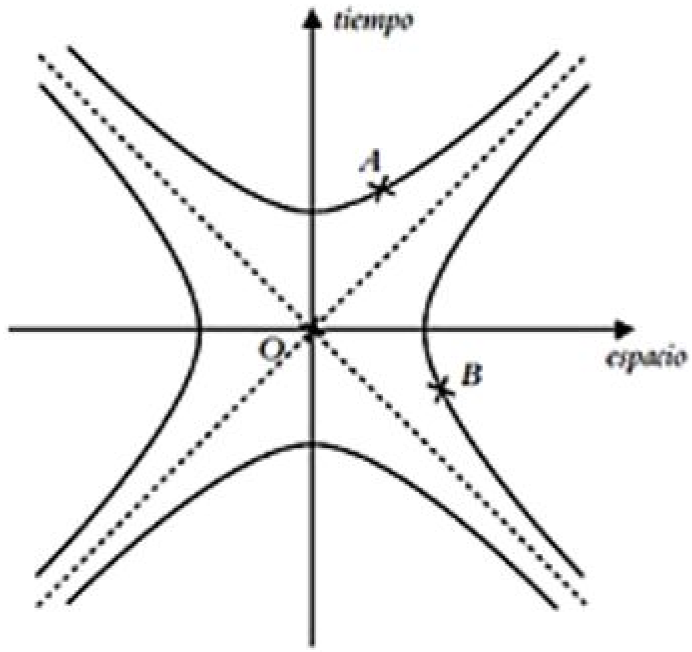

Figura 7

Recuerda, necesitábamos conocer *c* para tener alguna posibilidad de definir la distancia en el espacio-tiempo, porque teníamos que medir el espacio y el tiempo en las mismas dimensiones, pero de momento no tenemos ni idea de lo que representa realmente. ¿Es la velocidad de algo interesante? La clave para la respuesta se encuentra en una enigmática propiedad del espacio-tiempo de Minkowski que acabamos de construir. Esas líneas a 45 grados son importantes. En la figura 7 hemos trazado varias curvas más, cada una a una distancia espaciotemporal constante con respecto a *O*. Lo importante es que en realidad podemos dibujar cuatro tipos de curva. Una que se encuentre completamente en el futuro del evento *O*, otra que esté siempre en el pasado y dos más que estén a izquierda y derecha. Resultan un poco inquietantes, porque cruzan la línea horizontal, como hacían los círculos en la versión de la ecuación de Pitágoras con signo positivo. En aquel caso, eso nos condujo a descartar la hipótesis porque implicaba que se violaba la causalidad. ¿Sucede algo parecido con la versión de signo negativo? ¿Hemos fracasado? No, nos queda una salida. La figura 7 muestra un evento *B* que se encuentra en la región problemática. Está en el pasado de *O*, según la figura. Pero la hipérbola de distancia constante desde *O* para este evento corta al eje espacial, lo que implica que es posible que para algunos observadores *B* suceda en el futuro de *O*, mientras que para otros lo hará en su pasado. No lo olvides: todos los observadores deben medir la misma distancia espaciotemporal entre los eventos, incluso en el caso de que no midan las mismas distancias espacial y temporal por separado. Parece una quiebra de la causalidad, pero por suerte no es así, en absoluto.

¿Cómo podemos recomponer la causalidad en nuestra teoría del espacio-tiempo? Para responder a esta pregunta, necesitamos pensar con algo más de detenimiento sobre lo que entendemos por causalidad. En el razonamiento siguiente aparecerán cohetes espaciales y láseres, así que, si el razonamiento abstracto de las secciones anteriores te han dejado agotado, ahora te podrás relajar un poco. Pensemos de nuevo en el evento *O*: despertarse en la cama por la mañana. Para ser algo más precisos, el evento podría hacer referencia al momento en que empieza a sonar mi despertador. Poco antes, en un planeta en Alfa Centauri, el sistema estelar más cercano a la Tierra, situado a poco más de 4 años luz, despega una nave espacial en dirección a la Tierra. ¿Debería todo el mundo estar de acuerdo en que la nave ha comenzado su viaje antes de que yo me despertase? Desde el punto de vista de la causalidad, la cuestión depende fundamentalmente de si la información puede viajar a velocidad infinita o no. Si puede ir a velocidad infinita, la nave extraterrestre podría ser capaz de disparar un haz de láser que llegase a la Tierra en un instante y destruyese mi despertador, con el resultado de que me quedaría dormido y no llegaría a tiempo al desayuno. Perderme el desayuno sería el menor de mis problemas en una situación como esa, pero estamos haciendo un experimento mental, así que ignoraremos las consecuencias emocionales de que un láser extraterrestre volatilice mi despertador y seguiremos adelante. El disparo del láser de la nave ha hecho que me saltase el desayuno, y por tanto el orden de los eventos no puede alterarse sin violar nuestra doctrina de protección de la causalidad. Es fácil verlo, porque, si algún observador pudiese llegar a la conclusión de que la nave espacial ha despegado después de que yo me despertase, tendríamos una contradicción, porque no puedo quedarme dormido si ya me he despertado. Estamos obligados a aceptar que, si la información puede viajar a velocidades arbitrariamente altas, entonces nunca se puede permitir la alteración del orden temporal de dos eventos sin que ello viole la ley de causa y efecto. Pero nuestro razonamiento tiene un resquicio que permite que el orden de ciertos pares de eventos se intercambie, pero solo si se encuentran fuera de las líneas de 45 grados. La importancia de estas líneas empieza a ser patente.

Pensemos de nuevo en el incidente del láser alienígena que destruye mi despertador, pero ahora sujeto a un límite de velocidad cósmico. Es decir, no permitiremos que el rayo láser viaje infinitamente rápido desde la nave a nuestro despertador. Cubriéndonos por última vez con una fina capa de polvo de tiza, llamaremos al disparo del láser evento *B*, como se ilustra en la figura 7. Si la nave ha disparado el láser (evento *B*) muy poco antes de que el despertador empezase a sonar (evento *O*), desde una distancia enorme, no hay manera de que la nave pudiera impedir que me despertase, simplemente porque el láser no tiene tiempo suficiente para llegar desde la nave al reloj. Eso es lo que debe suceder si el láser no puede superar cierto límite de velocidad cósmico. Si esta es la situación, se dice que los eventos *O* y *B* están causalmente desconectados.

Como se ve en la figura, estamos suponiendo que *B* sucede justo antes que *O*, de forma que se encuentra en la región triangular a la derecha del diagrama, que es la zona «peligrosa» para la causalidad. Distintos observadores no estarán en general de acuerdo sobre si *B* sucede antes o después de *O*, porque sus distintos puntos de vista se corresponden con desplazar *B* a lo largo de la hipérbola, lo que puede hacer que cruce el eje espacial y pase del futuro al pasado. Esto es inevitable, pero causa y efecto seguirán intactos si el evento *B* no puede influir de ninguna manera sobre el evento *O*. Dicho de otra manera, ¿a quién le importa si *B* sucede en el pasado o en el futuro de *O* si eso no cambia nada, porque *B* y *O* no pueden influirse entre sí?

En el espacio-tiempo de Minkowski existen cuatro regiones diferenciadas, separadas por las líneas de 45 grados. Si queremos preservar la causalidad, cualquier evento que suceda en las regiones triangulares de la izquierda o de la derecha no ha de poder nunca enviar una señal capaz de llegar a *O*.

Para interpretar el significado de las líneas de separación, volvamos a nuestros diagramas espaciotemporales. El eje horizontal representa la distancia espacial y el eje vertical, la distancia temporal. Las líneas de 45 grados corresponden, por lo tanto, a eventos cuya distancia espacial respecto a *O* es igual a su distancia temporal (ct). ¿A qué velocidad debe viajar una señal proveniente de *O* si pretende influir sobre un evento que se encuentra exactamente sobre la línea de 45 grados? Si el evento está a 1 segundo en el futuro de *O*, la señal debe recorrer una distancia $c \times 1$ segundo. Si está a 2 segundos, deber recorrer $c \times 2$ segundos. En otras palabras, debe viajar a una velocidad c. Por lo tanto, para que una señal vaya de *B* a *O* debe viajar a una velocidad mayor que c. Y, a la inversa, es posible que eventos cualesquiera que se encuentren entre las líneas de 45 grados, pero en las regiones triangulares superior e inferior, se comuniquen entre ellos y con el evento *O* mediante señales que vayan a una velocidad menor que c.

Por fin hemos conseguido interpretar qué es la velocidad c: es el límite de velocidad cósmico. Nada puede ir más rápido que c porque, de ser así, se podría utilizar para transmitir información susceptible de violar el principio de causa y efecto. Fíjate también en que, si todos han de estar de acuerdo en medir la misma distancia espaciotemporal entre dos eventos cualesquiera, también han de estar de acuerdo en que el límite de velocidad cósmico es c, independientemente de cuál sea su estado de movimiento en el espacio-tiempo. Por lo tanto, la velocidad c posee una interesante propiedad adicional: independientemente de cómo se muevan dos observadores distintos, siempre medirán un mismo valor de c. La velocidad c está empezando a parecerse mucho a otra velocidad especial con la que nos hemos encontrado en este libro: la velocidad de la luz. Pero aún no hemos demostrado la conexión.

Nuestra conjetura original sigue viva y coleando. Hemos conseguido construir una teoría del espacio y el tiempo que parece capaz de reproducir la física con la que nos hemos encontrado en el capítulo anterior. Desde luego, la existencia de un límite de velocidad universal es prometedora, sobre todo si podemos interpretarlo como la velocidad de la luz. Tenemos también un espacio-tiempo en el que ni el espacio ni el tiempo son ya absolutos. Han sido sacrificados en favor del espacio-tiempo absoluto. Para convencernos de que hemos construido una posible descripción del mundo, veamos si conseguimos reproducir la ralentización de los relojes en movimiento que hemos visto en el capítulo 3.

Imagina que vuelves a estar a bordo del dichoso tren, sentado en un vagón y llevando un reloj de pulsera. Para ti, lo más cómodo es medir las distancias en relación con tu propia posición y los tiempos utilizando tu reloj. Tu viaje en tren dura dos horas, de estación a estación. Como no te levantas del asiento en ningún momento del viaje, has recorrido una distancia $x= 0$. Este es el principio que hemos establecido al comienzo del libro. No es posible dilucidar quién se está moviendo y quién no, y por lo tanto es perfectamente aceptable que tú, sentado en un tren, decidas que no te estás moviendo. En ese caso, el tiempo es lo único que pasa. Como tu viaje dura dos horas, desde tu punto de vista, solo has viajado en el tiempo. Por lo tanto, en el espacio-tiempo has viajado una distancia s, dada por $s = ct$, donde $t = 2$ horas (porque la distancia en el espacio que mides tú es $x = 0$). Todo esto es fácil de ver. Piensa ahora en tu viaje desde el punto de vista de tu amigo, que no está en el tren, sino en algún lugar sobre el suelo (no importa dónde se encuentre en concreto, solo que está en reposo respecto a la Tierra mientras tú vas a toda velocidad en el tren). Tu amigo preferiría medir los tiempos utilizando su propio reloj y las distancias respecto a sí mismo. Para simplificar un poco las cosas, supongamos que tu tren recorre una vía completamente recta. Si viajas durante 2 horas a una velocidad v = 100 kilómetros por hora, tu amigo ve que, al final del viaje, has recorrido una distancia $X = vT$. Usamos letras mayúsculas cuando nos referimos a las distancias y los tiempos que mide tu amigo, para distinguirlos de las cantidades correspondientes que mides tú (es decir, $x = 0$ y $t = 2$ horas). Por lo tanto, según tu amigo, has recorrido una distancia espaciotemporal s dada por $s^2 = (cT)^2 - (vT)^2$.

Esta es la parte crítica de todo el argumento: los dos tenéis que medir la misma distancia espaciotemporal para tu viaje. Según tus mediciones, no te has movido ($x = 0$) y tu viaje ha durado 2 horas ($t = 2$ horas), mientras que tu amigo dice que has recorrido una distancia de vT (donde $v = 100$ kilómetros por hora), en un tiempo T. Tenemos que igualar las correspondientes distancias espaciotemporales, y así: $(ct)^2 = (cT)^2 - (vT)^2$. Jugando con esta fórmula obtenemos $T = ct/\sqrt{(c^2 - v^2)}$. Así que, aunque nuestro reloj indica que el viaje ha durado 2 horas, según nuestro amigo ha sido algo más largo. El factor de aumento es igual a $c/\sqrt{(c^2 - v^2)} = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$, que es exactamente lo que hemos obtenido en el capítulo anterior, pero solo si interpretamos c como la velocidad de la luz.

¿Empiezas a sentir el hechizo jónico? Hemos deducido la misma fórmula que ha aparecido al pensar en relojes de luz y triángulos en el capítulo anterior. En este caso, lo que nos ha llevado a pensar en relojes de luz ha sido la brillante síntesis de Maxwell de los resultados experimentales de Faraday y otros, que ofrecía poderosos indicios de que la velocidad de la luz debía ser la misma para todos los observadores. Los trabajos experimentales de Michelson y Morley reforzaron esta conclusión, que Einstein asumió sin cuestionarla. En este capítulo hemos llegado exactamente a la misma conclusión, pero sin hacer referencia a la historia o a los experimentos. Ni siquiera hemos tenido que darle a la velocidad de la luz un papel especial. En cambio, hemos introducido el espacio-tiempo y, en consecuencia, hemos hecho hincapié en que debería existir una distancia invariante entre eventos. Además, hemos exigido que se respetasen la causa y el efecto. Hemos construido entonces la medida de la distancia más sencilla y, sorprendentemente, hemos llegado a la misma respuesta que Einstein. Este razonamiento es quizá uno de los más hermosos ejemplos de la irrazonable eficacia de las matemáticas en las ciencias físicas. Tales estaría tan hechizado que ya se estaría reclinando en un baño de leche de burra mientras se dejaba frotar por eunucos. Para que sus concubinas entrasen en el cuarto de baño portando vino e higos, todo lo que tenemos que hacer es demostrar que *c* debe ser la velocidad de la luz utilizando un argumento que sea completamente independiente del razonamiento histórico que hemos visto en el capítulo anterior. El clímax llegará en el capítulo siguiente, por ahora podemos tomarnos un descanso de las matemáticas, dejar a Tales a la expectativa, y disfrutar del hecho de haber conseguido revelar una forma completamente nueva de pensar sobre la teoría de Einstein. Parece que el espacio-tiempo realmente funciona, que la idea de un espacio y un tiempo unificados tiene sentido, exactamente como Minkowski había predicho.

¿Cómo hemos de imaginarnos el espacio-tiempo? El espacio-tiempo real tiene cuatro dimensiones, pero esta naturaleza tetradimensional supone un obstáculo para nuestra imaginación, porque los cerebros humanos no pueden imaginar directamente objetos en más de tres dimensiones. Además, el hecho de que una de estas dimensiones sea el tiempo suena realmente extraño. Una imagen que puede ayudar a hacerlo todo un poco menos esotérico es imaginar una motocicleta vagando entre las colinas de la campiña. Las carreteras se entrecruzan sobre el paisaje, lo que permite que la moto deambule de un lado a otro. El espacio-tiempo se parece a esa campiña ondulada. El equivalente del motorista cuando se dirige directamente hacia el norte sería un objeto que se mueve a través del espacio-tiempo solo en la dirección temporal. En otras palabras, el objeto estaría estacionario en el espacio. Evidentemente, afirmaciones como «estacionario en el espacio» son subjetivas, por lo que debemos entender que la identificación de «directamente hacia el norte» con «la dirección temporal» implica un punto de vista determinado, pero eso no es problema; basta con que lo tengamos siempre en cuenta. Ninguno de los caminos que se entrecruzan sobre el paisaje espaciotemporal puede formar un ángulo mayor de 45 grados con la dirección norte; los caminos que se dirigen justo hacia el este o hacia el oeste no están permitidos, porque para desplazarse por ellos nuestro «motorista» espaciotemporal tendría que superar el límite de velocidad cósmico en el espacio. Piénsalo así: si el motorista pudiese ir directamente hacia el este, entonces podría moverse a la velocidad que quisiese sin que transcurriese ningún tiempo, porque no recorrería ninguna distancia en dirección norte. Esto correspondería a una velocidad espacial infinita; iría de *a* a *b* instantáneamente. Los caminos se han trazado de forma que el motorista no pueda ir demasiado rápido ni hacia el este ni hacia el oeste.

La analogía se puede llevar todavía más lejos. Enseguida veremos que todo viaja a la misma velocidad por el espacio-tiempo. Es como si nuestro motorista tuviese un dispositivo que mantiene fijo el acelerador de su moto, de forma que siempre se mueve a la misma velocidad por el paisaje espaciotemporal. Aquí debemos ser un poco cuidadosos, porque cuando hablamos de un límite de velocidad en el espacio-tiempo, no es lo mismo que un límite de velocidad en el espacio. La velocidad espacial puede tener cualquier valor, siempre que no exceda el límite de velocidad cósmico; es decir, nuestro motorista puede tomar una carretera con rumbo prácticamente nordeste, y al hacerlo se estaría acercando lo máximo posible al límite de velocidad cósmico. En cambio, una carretera que se dirigiese aproximadamente hacia el norte no implicaría mucho movimiento hacia el este o el oeste, lo que significaría que el recorrido se hace a una velocidad bastante inferior al límite. La afirmación de que todo se mueve a la misma velocidad en el espacio-tiempo parece bastante profunda, y quizá resulte algo desconcertante. Significa que mientras lees este libro sentado, te desplazas por el paisaje espaciotemporal a la misma velocidad exactamente que el resto del universo. Visto así, el movimiento a través del espacio no es más que una sombra de otro movimiento más universal, a través del espacio-tiempo. En un sentido muy real, como ahora te demostraremos, eres exactamente igual que el motorista con el acelerador fijo. Mientras lees este libro, te estás moviendo a través del paisaje espaciotemporal con el acelerador fijo. Como estás sentado, tu recorrido sigue exclusivamente la carretera que va hacia el norte. Si miras tu reloj, verás cómo va pasando la distancia temporal. Esto suena muy raro, así que vamos a repasarlo con detenimiento.

¿Por qué todas las cosas se mueven a la misma velocidad a través del espacio-tiempo? Piensa de nuevo en el motorista e imagina que, según el reloj que lleva en su muñeca, transcurre un segundo. En ese tiempo, habrá recorrido una cierta distancia en el espacio-tiempo. Pero la magnitud de esa distancia será la misma para todo el mundo, porque las distancias espaciotemporales son universales y no son objeto de discusión. Eso significa que podemos preguntarle al motorista qué distancia cree que ha recorrido sobre el paisaje espaciotemporal y la respuesta que nos dé será la correcta. El motorista puede elegir calcular las distancias espaciotemporales respecto a sí mismo, y desde su punto de vista no se habrá movido en el espacio-tiempo. Es exactamente como la persona que viaja en el avión en el capítulo 1, que no se levanta del asiento y que por tanto afirma que no se ha movido. Puede que se haya desplazado respecto a otra persona (por ejemplo, respecto a alguien que vea pasar el avión desde el suelo), pero eso no es lo importante. Por lo tanto, desde el punto de vista de nuestro motorista, él no se ha movido en el espacio aunque haya pasado un segundo. Así, puede utilizar la ecuación para la distancia espaciotemporal, $s^2 = (ct)^2 - x^2$, con $x = 0$ (porque no se ha movido en el espacio) y $t = 1$ segundo, para calcular cuál ha sido realmente la magnitud de su desplazamiento espaciotemporal. La respuesta es una distancia igual a c multiplicada por 1 segundo. El motorista nos dice, pues, que ha recorrido una distancia de c (multiplicada por 1 segundo) por cada segundo que transcurre según su reloj, que es simplemente otra manera de decir que su velocidad a través del espacio-tiempo es igual a c. Si has seguido de cerca el razonamiento, podrías objetar que el transcurso de un segundo se ha medido en el reloj del motorista, y que alguien que se esté moviendo respecto a él medirá un tiempo diferente. Es cierto, pero el reloj del motorista tiene algo de especial, porque él no se mueve respecto a sí mismo (algo bastante evidente). Por tanto, podemos sustituir $x = 0$ en la ecuación para la distancia, de forma que el tiempo que transcurre en su reloj nos permite medir directamente la distancia espaciotemporal, s. Este es un bonito resultado: el tiempo que pasa en el reloj del motorista es igual a la distancia espaciotemporal recorrida dividida por *c*. En cierto sentido, su reloj es un aparato para medir distancias en el espacio-tiempo. Como todo el mundo mide la misma distancia espaciotemporal y también el mismo valor de *c*, sin darse cuenta, el motorista ha utilizado su reloj para medir algo cuyo valor será el mismo para todos los observadores. La velocidad espaciotemporal *c* que deduce es también por lo tanto una cantidad que no depende de quién la mida.

Así, la velocidad espaciotemporal es una magnitud universal, en la que todo el mundo coincide. Esta nueva forma de pensar sobre cómo se mueven las cosas a través del espacio-tiempo nos puede servir para tener una perspectiva diferente sobre la razón por la que los relojes en movimiento se retrasan. Según esta forma espaciotemporal de pensar, un reloj en movimiento dedica parte de su velocidad espaciotemporal, que es fija, a su movimiento espacial, lo que le deja una cantidad menor para su movimiento a través del tiempo. Dicho de otro modo, un reloj en movimiento no se desplaza tan rápido a través del tiempo como uno que esté estacionario, lo que equivale a decir que en él el tiempo transcurre más despacio. En cambio, un reloj que esté en reposo se mueve a velocidad *c* en la dirección temporal, sin ningún desplazamiento espacial. Por tanto, marca el tiempo lo más rápido posible.

Dotados del espacio-tiempo, ya estamos listos para enfrentarnos a uno de los maravillosos rompecabezas de la relatividad especial: la paradoja de los gemelos. Previamente, hemos visto cómo la teoría de Einstein nos permite contemplar la posibilidad de viajar a lugares remotos del universo. A velocidades muy próximas a la de la luz, nos hemos imaginado viajando a la galaxia de Andrómeda en el tiempo de una vida humana, por mucho que la luz tarde casi 3 millones de años en hacer ese recorrido. Aquí nos topamos con una paradoja que antes nos ha pasado desapercibida. Imagina dos gemelas, una de las cuales se entrena para ser astronauta y se embarca en la primera misión humana hacia Andrómeda, mientras que su hermana se queda en la Tierra. La gemela astronauta se desplaza a una gran velocidad respecto a la Tierra, y por lo tanto su vida se ralentiza respecto a la de su hermana gemela que sigue aquí. Pero hemos dedicado una parte importante del libro a argumentar que no existe el movimiento absoluto. Dicho de otra manera, la respuesta a la pregunta « ¿quién se está moviendo?» es «quien tú elijas». Cualquiera puede decidir que él está quieto y es la otra persona la que se mueve por el universo a toda velocidad. Lo mismo sucede para la gemela astronauta, que bien puede decir que ella está completamente quieta en su cohete espacial, viendo cómo la Tierra se aleja a toda velocidad. Para ella, por lo tanto, es la gemela que está en la Tierra la que envejece más despacio. ¿Quién tiene razón? ¿Es posible realmente que cada una de las gemelas envejezca más despacio que la otra? Tiene que ser así, es lo que dice la teoría. Aún no hemos llegado a la paradoja, porque todos los problemas que tengas para creer que cada gemela ve cómo la otra envejece más despacio no son reales, sino que se deben al hecho de que sigues aferrándote a la idea del tiempo universal. Pero ya hemos visto que el tiempo no es universal, lo que significa que no hay contradicción. Esta es la aparente paradoja: ¿qué sucede si la gemela astronauta vuelve a la Tierra en algún momento futuro y se encuentra con su hermana? Evidentemente, no es posible que cada una de ellas sea más joven que la otra. ¿Qué está pasando? ¿Realmente una de ellas es más vieja que la otra? Si es así, ¿cuál?

La respuesta la encontraremos en nuestra forma de entender el espacio-tiempo. En la figura 8 vemos las trayectorias espaciotemporales que han seguido las gemelas, medidas con relojes y reglas en reposo respecto a la Tierra. La trayectoria de la gemela que permanece en nuestro planeta solo sigue el eje temporal. En otras palabras, consume prácticamente toda la velocidad espaciotemporal que le corresponde en su desplazamiento temporal. Su gemela astronauta, por su parte, se aleja a una velocidad próxima a la de la luz. Volviendo a la analogía del motorista, eso significa que sale disparada en una dirección cercana al nordeste, utilizando casi toda su velocidad espaciotemporal para aproximarse todo lo posible al límite de velocidad cósmico en su recorrido espacial. En el diagrama espaciotemporal que se muestra en la figura 8, esto significa que se mueve próxima a la línea de 45 grados. Sin embargo, en algún momento tendrá que dar la vuelta y volver a la Tierra. Según la figura, suponemos que vuelve hacia aquí también a una velocidad próxima a la de la luz, pero esta vez en una dirección aproximadamente noroeste. Queda claro que las gemelas siguen recorridos diferentes en el espacio-tiempo, aunque empiecen y acaben en el mismo punto.

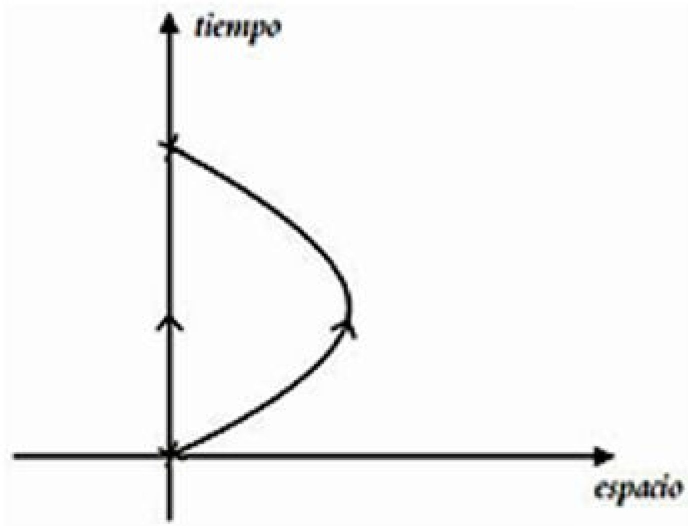

Figura 8

Igual que sucede con las distancias espaciales, las longitudes de dos recorridos diferentes en el espacio-tiempo pueden ser distintas. Insistimos: aunque todo el mundo debe medir la misma longitud para cada recorrido espaciotemporal en particular, las longitudes de recorridos diferentes no tienen por qué coincidir. En realidad, esto no es muy distinto de decir que la distancia de Chamonix a Courmayeur depende de si atraviesas el túnel del Mont Blanc o haces el trayecto a pie subiendo a los Alpes. Obviamente, subir a una montaña implica que recorres una distancia mayor que si pasas por el túnel que la atraviesa. En el ejemplo del motorista que se movía por el espacio-tiempo, hemos visto que el tiempo que medía su reloj nos ofrecía una manera directa de medir la distancia espaciotemporal que recorría: solo teníamos que multiplicar el tiempo transcurrido por *c* para obtener la distancia espaciotemporal. Podemos darle la vuelta a este razonamiento y decir que, si conocemos la distancia espaciotemporal que ha recorrido cada una de las gemelas, podemos calcular el tiempo que transcurre para cada una de ellas. Es decir, podemos imaginar que cada gemela es una viajera espaciotemporal, y que sus respectivos relojes miden la distancia que recorren a través del espacio-tiempo.

Aquí está la idea clave. Fíjate de nuevo en la fórmula de la distancia espaciotemporal, $s^2 = (ct)^2 - x^2$. Esta es mayor si podemos seguir un camino para el que $x = 0$. Cualquier otro recorrido debe ser más corto, porque tendremos que restar la contribución de x^2, que siempre es positiva. Pero la gemela que permanece en la Tierra se desplaza a lo largo de la dirección temporal, con x próxima a cero, por lo que su recorrido ha de ser el más largo posible. En realidad, esto no es más que otra manera de decir lo que ya sabemos: que la gemela que se queda en la Tierra se mueve a través del tiempo lo más rápido posible, y por tanto es la que más envejece.

Hasta ahora, para nuestra explicación hemos tomado el punto de vista de la gemela que permanece en la Tierra. Para quedarnos completamente satisfechos y aceptar que no hay paradoja, deberíamos ver las cosas también desde el punto de vista de la gemela astronauta. Para ella, su hermana es la que se mueve, mientras que ella se desplaza por su propio eje temporal. Parece que volvemos a encontrarnos con la paradoja: como la gemela astronauta está en reposo respecto a su nave espacial, da la impresión de que debería moverse a la máxima velocidad temporal y por tanto envejecer más que su hermana. Pero aquí llegamos a un punto muy sutil. La ecuación de la distancia no se aplica si utilizamos los relojes y las reglas de la gemela astronauta para medir tiempos y distancias. Más precisamente, deja de funcionar cuando la gemela astronauta sufre la aceleración que hace que su nave dé media vuelta. ¿Por qué deja de funcionar? Los argumentos que hemos ofrecido cuando la hemos obtenido parecían bastante sólidos, pero si uno utiliza un sistema acelerado de relojes y reglas para realizar medidas, como tendría que hacer la gemela astronauta, entonces la suposición de que el espacio-tiempo no varía y es el mismo en cualquier lugar, que nos ha servido para deducir la ecuación de la distancia, es errónea. Durante el tiempo que dura la aceleración, la gemela astronauta sentirá un tirón hacia atrás en su asiento, algo muy parecido a lo que sientes cuando pisas el acelerador de un coche. Para empezar, eso distingue inmediatamente una dirección especial en el espacio: la de la aceleración. La ecuación para la distancia debe tener en cuenta la existencia de esa fuerza, y aquí es donde está la grieta en nuestro razonamiento. Es demasiado complicado para que entremos en los detalles matemáticos, pero el resultado es que, cuando la nave enciende sus propulsores para dar media vuelta, la gemela que está en la Tierra envejece más rápido que su hermana astronauta y eso compensa con creces el hecho de que envejezca más despacio durante las fases de la expedición en las que no se produce aceleración. La paradoja no es tal.

No podemos resistirnos a la tentación de poner números, porque el efecto puede ser llamativo. Los viajes espaciales les resultan más cómodos a quienes van en la nave si se activan los propulsores de forma que se mantenga una aceleración constante de «un *g*». Eso significa que los viajeros espaciales sienten su propio peso dentro del cohete. Imaginemos un viaje de 10 años con esa aceleración, seguidos por otros 10 años desacelerando al mismo ritmo, al término de los cuales la nave da media vuelta para dirigirse hacia la Tierra, acelerando durante 10 años más y desacelerando durante los últimos 10 años de su recorrido hasta acabar de nuevo en nuestro planeta. En total, los viajeros habrán permanecido 40 años en la nave. La pregunta es: ¿cuántos años han transcurrido en la Tierra? Nos limitaremos a poner aquí el resultado, porque los cálculos superan (solo un poco) el nivel de este libro. El resultado es que en la Tierra habrán pasado nada menos que ¡59.000 años!

Esperamos que el lector nos haya seguido en este formidable viaje hacia el mundo del espacio-tiempo. Ahora estamos preparados para dirigirnos directamente hacia $E = mc^2$. Provistos con el espacio-tiempo y de nuestra definición invariante de distancia, nos planteamos una pregunta sencilla pero muy importante: ¿existen otras cantidades invariantes que también describen las propiedades de los objetos reales en el mundo real? Obviamente, las distancias no son lo único importante.

Los objetos tienen masa, pueden ser duros o blandos, calientes o fríos, sólidos, líquidos o gaseosos. Puesto que todos los objetos viven en el espacio-tiempo, ¿es posible describir todo lo que existe en el mundo mediante magnitudes invariantes? En el capítulo siguiente descubriremos que sí lo es, y eso tiene profundas consecuencias, pues este es el camino que nos conduce directamente hasta $E = mc^2$.

Capítulo 5
¿Por qué $E = mc^2$?

En el capítulo anterior hemos visto que combinar el espacio y el tiempo para dar lugar al espacio-tiempo es una muy buena idea. Una de las ideas clave de toda nuestra investigación era la de que las distancias espaciotemporales son invariantes, lo que significa que existe un consenso a lo largo y ancho de todo el espacio-tiempo respecto a las longitudes de los recorridos espaciotemporales. Podríamos incluso considerarla una de las características definitorias del espacio-tiempo. Hemos sido capaces de redescubrir la teoría de Einstein, pero solo bajo la condición de interpretar el límite de velocidad cósmico, c, como la velocidad de la luz. Aún no hemos demostrado que c tenga de hecho algo que ver con la velocidad de la luz, pero en este capítulo profundizaremos mucho más en lo que significa c. Sin embargo, en cierto sentido ya hemos empezado a desmitificar la velocidad de la luz. Puesto que la velocidad de la luz aparece en $E = mc^2$, a menudo parece como si la propia luz fuese muy importante para la estructura del universo. Pero si miramos la situación desde el punto de vista espaciotemporal, vemos que no lo es tanto. Sutilmente, se restablece la democracia, en el sentido de que todas las cosas se mueven por el espacio-tiempo a la misma velocidad, c, incluido tú mismo, el planeta Tierra, el Sol y las galaxias lejanas. Lo único que sucede es que la luz emplea toda su velocidad espaciotemporal en desplazarse a través del espacio, y, al hacerlo, viaja a la velocidad que marca el límite de velocidad cósmico: la aparente particularidad de la luz es una creación de nuestra tendencia humana a pensar en el tiempo y el espacio como entidades distintas. De hecho, existe un motivo por el que la luz se ve obligada a comportarse así, que está estrechamente relacionado con nuestro objetivo de comprender $E = mc^2$.

Estamos a punto de dejar al descubierto las dos piezas restantes para llegar a $E = mc^2$. La primera de ellas no debería sorprenderte: solo nos van a interesar los vectores en las cuatro dimensiones del espacio-tiempo.

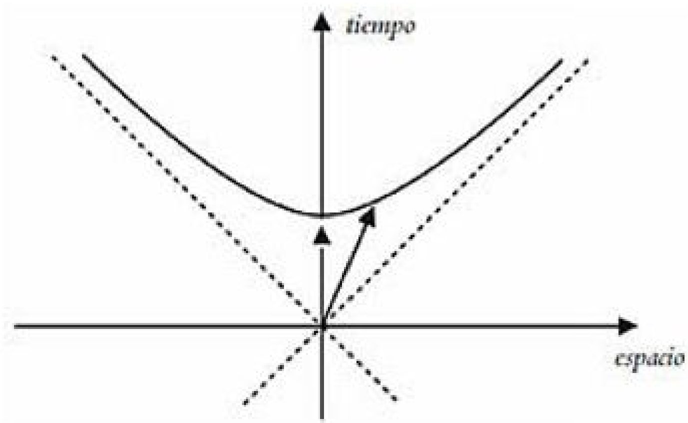

Figura 9

Eso es fácil de decir, pero se trata de un concepto extraño: de la misma manera que un vector puede estar dirigido hacia el «norte», ahora cabe la posibilidad de que apunte «en la dirección temporal». Como suele ser habitual cuando hablamos del espacio-tiempo, no es algo que seamos capaces de visualizar mentalmente, pero eso es problema nuestro, no de la naturaleza. La analogía del paisaje espaciotemporal que hemos empleado en el capítulo anterior puede ayudarte a construir una representación mental (al menos, de un espacio-tiempo simplificado, con una sola dimensión espacial). Los vectores tetra dimensionales vienen descritos por cuatro números. El vector arquetípico es el que conecta dos puntos del espacio-tiempo. En la figura 9 se pueden ver dos ejemplos. Por conveniencia, hemos hecho que uno de ellos apunte exactamente en la dirección temporal y que ambos partan del mismo punto. En general, deberías pensar que siempre existe una flecha que une dos puntos cualesquiera del espacio-tiempo. Los vectores como estos no son objetos totalmente abstractos. El hecho de que te acuestes a las 10 de la noche y te despiertes a las 8 de la mañana define una flecha que une ambos eventos en el espacio-tiempo; tiene una longitud de «10 horas multiplicadas por *c*» y señala enteramente en la dirección temporal. De hecho, a lo largo del libro ya hemos usado vectores espaciotemporales, aunque sin emplear esa terminología hasta ahora. Por ejemplo, hemos visto un vector muy importante cuando hablábamos del intrépido motorista, que viajaba por el accidentado paisaje espaciotemporal con el acelerador de su moto fijo. Hemos llegado a la conclusión de que ese motorista siempre se mueve a través del espacio-tiempo a una velocidad *c*, y lo único que puede elegir es la dirección en la que apunta su moto (aunque ni siquiera ahí su libertad es completa, porque no puede formar un ángulo mayor de 45 grados respecto al norte). Podemos representar este movimiento mediante un vector de longitud fija, *c*, que señala en la dirección en la que viaja por el paisaje espaciotemporal. Ese vector tiene un nombre: es el vector velocidad espaciotemporal. Si queremos emplear la terminología correctamente, diríamos que el vector velocidad siempre tiene longitud *c* y que solo puede apuntar dentro del cono de luz futuro. Cono de luz es una manera elegante de referirse al área contenida entre las dos líneas a 45 grados del norte que tanta importancia tienen para preservar la causalidad. Podemos describir completamente cualquier vector en el espacio-tiempo si especificamos en qué medida apunta en la dirección temporal y cuánto lo hace en la dirección espacial.

A estas alturas, ya somos conscientes de que las distancias temporales y espaciales entre eventos son diferentes para observadores que se mueven los unos respecto a los otros, pero deben variar de tal forma que la distancia espaciotemporal siga siendo la misma. Debido a la extraña geometría de Minkowski, esto implica que la punta del vector puede moverse a lo largo de una hipérbola situada en el cono de luz futuro. Si queremos ser mucho más concretos, si los dos eventos son «acostarse a las 10 de la noche» y «despertarse a las 8 de la mañana», para un observador que esté en la cama, el vector distancia espaciotemporal apunta hacia arriba según su eje temporal, como se puede ver en la figura 9, y su longitud viene dada simplemente por el tiempo transcurrido en su reloj (10 horas) multiplicado por *c*. Alguien que pase volando a gran velocidad podría interpretar que la que se mueve es la persona que está en la cama. En ese caso, debería añadir un poco de movimiento espacial cuando viese a la persona en la cama, lo que haría que la punta del vector se alejase de su eje temporal. Como la longitud de la flecha no puede cambiar, debe permanecer sobre la hipérbola. En la figura 9 también está representada esta segunda flecha, inclinada. Como puedes ver, la proporción del vector que apunta en la dirección temporal ha aumentado, lo que significa que el observador en movimiento llega a la conclusión de que ha transcurrido más tiempo entre los dos eventos (es decir, en su reloj han pasado más de 10 horas). Esta es otra manera más de representar el extraño efecto de la dilatación del tiempo.

Hasta aquí, de momento al menos, los vectores (enseguida recurriremos de nuevo al vector velocidad espaciotemporal). Dedicaremos los siguientes párrafos a la segunda pieza fundamental del rompecabezas que es $E = mc^2$. Imagina que eres un físico que intenta entender cómo funciona el universo. Te manejas bien con los vectores, y de vez en cuando los incorporas a las ecuaciones que escribes. Supón que alguien, quizá un colega, te dice que existe un vector muy especial que tiene la propiedad de que nunca cambia, independientemente de lo que le suceda a la parte del universo a la que se refiere. Tu primera reacción puede ser mostrar desinterés: si nada cambia, es poco probable que ese vector pueda representar la esencia del asunto en cuestión. Quizá tu colega conseguiría despertar tu interés si te dijese que ese único vector especial se construye al reunir un montón de vectores, cada uno asociado con una parte distinta de la cosa que estás intentando entender. Las diversas partes de la cosa pueden sacudirse y, al hacerlo, cada uno de los vectores individuales puede variar, pero siempre de tal manera que todos los vectores se suman para dar el mismo vector especial inmutable. Por cierto, sumar vectores es fácil, enseguida lo veremos.

Para demostrar lo útil que puede ser esta idea de vectores inmutables, pensemos en una tarea bien sencilla. Queremos entender lo que sucede cuando dos bolas de billar chocan frontalmente. Un ejemplo así no es que tenga precisamente una importancia extraordinaria, pero los físicos suelen elegir ejemplos bastante ordinarios, como este, no porque solo sean capaces de estudiar fenómenos tan sencillos, o porque les guste el billar, sino porque a menudo es más fácil entender los conceptos por primera vez a través de ejemplos sencillos.

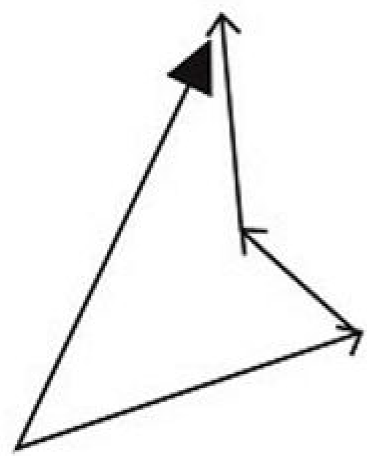

Figura 10

Volvamos al billar: tu colega te explica que deberías asociar un vector a cada bola, que debería apuntar en la dirección de su movimiento. Lo que pretendemos es que, al sumar los dos vectores (uno por cada bola) obtengamos el vector especial inmutable. Eso significa que, pase lo que pase en la colisión, podemos tener la certeza de que los dos vectores asociados a las bolas tras el choque se combinarán para dar lugar precisamente al mismo vector que se formaba a partir de las dos bolas antes de la colisión. Esta puede ser una idea muy importante. La existencia del vector especial impone una severa restricción sobre los posibles resultados de la colisión. Nos impresionaría especialmente la afirmación de nuestro colega en el sentido de que «la conservación de estos vectores» tiene lugar en cualquier sistema de objetos en todo el universo, desde el choque de las bolas de billar a la explosión de una estrella. Probablemente no te sorprenda saber que los físicos no van por ahí llamándolos vectores especiales, sino que hablan del vector momento lineal, y la conservación de los vectores se conoce más habitualmente como conservación del momento lineal.

Hemos dejado un par de puntos pendientes: ¿cuál es la longitud de las flechas del momento lineal y cómo hemos de sumarlas, exactamente? Sumarlas no es difícil: la regla es colocar todas las flechas que queramos añadir una a continuación de la otra. El resultado es una flecha que une el principio de la primera de las flechas de la cadena con el final de la última flecha. La figura 10 muestra un ejemplo de lo anterior con tres flechas elegidas arbitrariamente. La flecha grande es la suma de las pequeñas. La longitud del vector momento lineal es algo que podemos determinar de manera experimental, y así fue como se llegó a él históricamente. El concepto tiene más de mil años de antigüedad porque es útil. A grandes rasgos, expresa la diferencia entre que te golpee una pelota de tenis o un tren expreso cuando ambos van a 100 kilómetros por hora. Como ya hemos visto, está estrechamente relacionado con la velocidad y, como el ejemplo anterior ilustra a la perfección, también debería tener alguna relación con la masa. Antes de Einstein, la longitud del vector momento lineal venía dada simplemente por el producto de la masa y la velocidad. Como ya hemos dicho, apunta en la dirección del movimiento. Por otro lado, la manera moderna de entender el momento lineal como una magnitud que se conserva tiene su origen en el trabajo de Emmy Noether, como ya hemos visto antes. Más adelante descubrimos la conexión profunda entre la ley de la conservación del momento lineal y la invariancia traslacional en el espacio. Expresado con símbolos, el tamaño del momento de una partícula de masa m que se mueve a una velocidad v puede escribirse como $p = mv$, donde p es el símbolo que se utiliza habitualmente para el momento lineal.

Hasta ahora lo cierto es que no hemos hablado de lo que es la masa en realidad, así que antes de continuar tendremos que ser algo más precisos. Una idea intuitiva de la masa podría ser que es una medida de la cantidad de materia que contiene un objeto. Por ejemplo, dos bolsas de azúcar tienen el doble de masa que una sola bolsa. Si quisiésemos, podríamos medir todas las masas en función de la de una bolsa de azúcar estándar, utilizando una balanza tradicional. Así es como se solían comprar los alimentos en las tiendas. Si quisieses comprar un kilo de patatas, colocarías las patatas en un brazo de la balanza y una bolsa de un kilo de azúcar en el otro, y todo el mundo aceptaría que habías comprado la cantidad correcta de patatas.

Obviamente, hay muchos tipos diferentes de «materia», por lo que «cantidad de materia» es una expresión tremendamente imprecisa. Esta es una definición mejor: podemos saber cuál es la masa si medimos el peso. Es decir, las cosas más pesadas tienen más masa. ¿Es así de sencillo? Pues sí y no. Aquí en la Tierra, podemos determinar la masa de un objeto pesándolo, y eso es lo que hacen las básculas que tenemos en el baño. Todos estamos acostumbrados a «pesar» en kilogramos y gramos (o libras y onzas). Pero los científicos no estarían de acuerdo. La confusión surge porque la masa y el peso son proporcionales entre sí cuando se miden cerca de la superficie terrestre. Podrías plantearte qué pasaría si llevases la báscula del baño a la Luna. Lo que sucedería es que allí pesarías unas seis veces menos que en la Tierra. Realmente pesas menos en la Luna, aunque tu masa no haya cambiado. Lo que ha cambiado es la tasa de conversión entre masa y peso, aunque el doble de masa siempre tendrá el doble de peso, se mida donde se mida (decimos que el peso es proporcional a la masa).

Otra forma de definir la masa surge al darnos cuenta de que cuesta más empujar o tirar de las cosas más masivas. Esta característica de la naturaleza quedó plasmada matemáticamente en la segunda ecuación más famosa de la física (tras $E = mc^2$, por supuesto): $F = ma$, publicada por primera vez por Isaac Newton en 1687, en sus *Principia mathematica*. La ley de Newton simplemente dice que, si empujas algo con una fuerza F, esa cosa empieza a acelerarse con una aceleración a. La m se refiere a la masa, y por tanto puedes determinar experimentalmente la masa de un objeto midiendo cuánta fuerza necesitas aplicar sobre él para producir una determinada aceleración. Esta es una definición tan buena como cualquier otra, así que de momento nos quedaremos con ella. Aunque, si tienes un espíritu crítico, es posible que te preocupe cómo deberíamos definir exactamente «fuerza». Es algo importante, pero no lo veremos ahora. Supondremos que sabemos cómo medir la cantidad de empuje o tirón, también conocida como fuerza.

Hemos dado un buen rodeo y, aunque realmente no hemos dicho qué es la masa en un sentido fundamental, sí hemos dado una definición «de manual». En el capítulo

7 expondremos una visión más profunda del propio origen de la masa, pero de momento simplemente supondremos que «está ahí», como una propiedad inherente a las cosas. Lo importante aquí es que vamos a suponer que la masa es una propiedad intrínseca de un objeto. Es decir, que tiene que existir una cantidad en el espacio-tiempo, igual para todos los observadores, llamada masa. Debería por tanto ser una de nuestras cantidades invariantes. Aún no hemos expuesto ningún argumento para convencer al lector de que esta cantidad debería ser necesariamente la misma que la masa de la ecuación de Newton, pero, como con muchas de nuestras hipótesis, comprobaremos si es válida o no una vez que hayamos extraído las pertinentes consecuencias. Volvamos ahora a las bolas de billar.

Si las dos bolas chocan frontalmente y tienen la misma velocidad y la misma masa, sus vectores momento lineal tienen la misma longitud pero direcciones opuestas, por lo que, si los sumamos, se anulan por completo. Tras la colisión, la ley de conservación del momento lineal predice que, pase lo que pase con las partículas, deben salir con velocidades iguales y en direcciones opuestas. De no ser así, el momento lineal neto tras la colisión no se anularía. La ley de conservación del momento lineal, como ya hemos dicho, no se limita a las bolas de billar, sino que se cumple en cualquier lugar del universo, y ahí radica su importancia. El retroceso de un cañón tras disparar una bala o la dispersión de partículas en todas las direcciones tras una explosión satisfacen la conservación del momento lineal. De hecho, el caso del cañón merece un poco más de atención.

Antes de que se dispare el cañón, el momento neto es cero y la bala está en reposo en el interior del tambor, que a su vez está también inmóvil en lo alto de un castillo. Cuando se dispara el cañón, la bala sale despedida a gran velocidad, mientras que el propio cañón, por fortuna para los soldados que lo dispararon desde el castillo, aunque recula un poco, se queda prácticamente donde estaba. El momento lineal de la bala de cañón viene dado por su vector momento lineal, una flecha cuya longitud es igual a la masa de la bala multiplicada por su velocidad, y cuya dirección indica hacia dónde vuela al alejarse del cañón. La conservación del momento lineal nos dice que el propio cañón debe recular con una flecha del momento lineal de longitud exactamente igual y dirección opuesta a la asociada a la bala. Pero, como el cañón es mucho más pesado que la bala, retrocede a una velocidad mucho menor. Cuanto más pese el cañón, menor será la velocidad con la que recule. Por lo tanto, las cosas grandes y lentas pueden tener el mismo momento que las pequeñas y rápidas. Por supuesto, tanto el cañón como la bala van perdiendo velocidad (y, por consiguiente, también pierden momento lineal), y el momento de la bala también varía debido al efecto de la gravedad. Sin embargo, esto no significa que no se cumpla la conservación del momento lineal. Si pudiésemos tener en cuenta el momento que reciben las moléculas de aire que chocan con la bala y las moléculas del interior de los rodamientos del cañón, junto con el hecho de que el momento lineal de la propia Tierra cambia ligeramente al interactuar con la bola a través de la gravedad, llegaríamos a la conclusión de que el momento lineal total en su conjunto se conserva. Normalmente, los físicos no pueden hacer un seguimiento de adónde se va todo el momento cuando han de tener en cuenta aspectos como el rozamiento y la resistencia del aire, y en consecuencia la ley de conservación del momento lineal solo suele aplicarse cuando las influencias externas no son importantes. Esto limita ligeramente su alcance, pero no debería restarle ninguna importancia como ley fundamental de la física. Dicho lo cual, veamos si podemos terminar nuestra partida de billar, que ya está durando demasiado.

Para simplificar las cosas, imaginemos que las fuerzas de rozamiento desaparecen por completo, de manera que solo nos tenemos que preocupar de las bolas de billar que chocan. La ley de conservación del momento lineal que acabamos de descubrir es muy útil, pero no es la panacea. De hecho, es imposible calcular la velocidad de las bolas de billar tras su colisión sabiendo únicamente que el momento lineal se conserva y conociendo las masas y las velocidades de las bolas antes del choque. Para poder calcularla, necesitamos recurrir a otra ley de conservación muy importante.

Hemos introducido la idea de que los objetos en movimiento se pueden describir mediante un vector momento lineal, y que la suma de todos los momentos lineales permanece siempre constante. Es esencial que quede claro que la importancia del momento lineal para los físicos radica precisamente en que se conserva. Si no te gusta la expresión «momento lineal», piensa que sería mucho peor tener que decir «esa flecha que se conserva». Las magnitudes que se conservan son, como estamos empezando a descubrir, bastante habituales y extremadamente útiles en física. Por lo general, cuantas más leyes de conservación tengas a tu disposición a la hora de enfrentarte a un problema, más fácil te será encontrar una solución. Una ley de conservación destaca por encima del resto, debido a su gran utilidad. Los ingenieros, los físicos y los químicos la fueron dejando al descubierto muy lentamente a lo largo de los siglos XVII, XVIII y XIX. Nos referimos a la ley de conservación de la energía.

En primer lugar, el concepto de energía es más fácil de asimilar que el de momento lineal. Como sucede con el momento, los objetos pueden tener energía, pero, a diferencia del momento, la energía no tiene dirección. Se parece más a la temperatura, en cuanto a que basta para especificarla un único número. Pero ¿qué es la «energía»? ¿Cómo la definimos? ¿Qué es lo que mide? En este sentido, con el momento lineal lo teníamos más fácil: una flecha que señala en la dirección del movimiento y cuya longitud es igual al producto de la masa por la velocidad. La energía es más difícil de precisar, porque puede presentarse de muy diversas formas, pero la conclusión es bastante clara: pase lo que pase, la suma total de toda la energía en cualquier proceso debe permanecer invariable, independientemente de cómo cambien las cosas. Una vez más, Noether nos brindó la explicación fundamental: la conservación de la energía es una consecuencia de que las leyes de la física no cambian con el tiempo. Esta afirmación no implica que las cosas no sucedan, lo cual sería obviamente ridículo, sino que significa que, si las leyes de Maxwell son válidas hoy, también habrán de serlo mañana. Puedes sustituir «las leyes de Maxwell» con cualquier otra ley física fundamental, como por ejemplo los postulados de Einstein.

No obstante, como ocurrió con la conservación del momento lineal, la conservación de la energía se descubrió por medios experimentales. Para esbozar su historia hemos de seguir los meandros de la revolución industrial. Fue fruto del trabajo de muchos experimentalistas prácticos que, en su búsqueda de la Jerusalén industrial, se encontraron con una inmensa variedad de fenómenos mecánicos y químicos, de hombres como el desafortunado conde Rumford de Baviera (nacido como Benjamin Thompson en Massachusetts en 1753), cuyo trabajo consistía en fabricar cañones para el duque de Baviera. Un día, mientras estaba trabajando, se dio cuenta de que el metal del cañón y el del taladro que utilizaba para perforarlo se ponían al rojo vivo, y supuso correctamente que el rozamiento estaba haciendo que el movimiento de rotación del taladro se transformase en calor. Es lo contrario de lo que sucede en un motor de vapor, en el que el calor se transforma en el movimiento de rotación de las ruedas del tren. Resultaba natural asociar una magnitud común con el calor y con el movimiento de rotación, ya que, aunque aparentemente diferentes, ambos parecían intercambiables. Esta magnitud es la energía. Rumford tiene fama de desgraciado porque se casó con la viuda de otro gran científico, Antoine Lavoisier, después de que este fuese decapitado durante la Revolución francesa, creyendo, equivocadamente, que haría por él lo que había hecho antes por Lavoisier: obedecerle y tomar notas sumisamente, como buena esposa del siglo XVIII. Resultó que solo había sido sumisa bajo el yugo de la voluntad de hierro de Lavoisier. En su fascinante libro *La búsqueda del cero absoluto*, Kurt Mendelssohn cuenta cómo vivió «un infierno en vida» (el libro es de 1966, lo que explica esta curiosa expresión). La idea clave es que la energía siempre se conserva, y eso es lo que hace que sea interesante.

Si le pides a cualquiera por la calle que te explique qué es la energía, obtendrás una respuesta sensata o bien una sarta de disparates propios de la nueva era. El amplio uso de la palabra «energía» es la razón por la que tiene asociados una gran variedad de significados. Debe quedar claro que la energía tiene una definición realmente muy precisa, y no puede utilizarse para explicar las líneas ley,[6] la curación con cristales, la vida después de la muerte o la reencarnación. Una persona sensata respondería que la energía se puede almacenar en una batería esperando en suspensión hasta que alguien «cierre el circuito» y puede ser también una medida de la cantidad de movimiento, según la cual los objetos más rápidos tendrían más energía que los más lentos. La energía almacenada en el mar o en el viento es un ejemplo muy representativo. O quizá te diría que las cosas calientes tienen más energía que las frías. Un volante de inercia gigante en una central eléctrica puede almacenar energía y liberarla después en la red eléctrica para satisfacer la demanda de una población ávida de energía. También se puede liberar la energía almacenada en el núcleo de un átomo para generar energía nuclear. Estas son tan solo algunas de las formas en que nos podemos encontrar la energía en nuestra vida diaria. Los científicos son capaces de cuantificarlas todas y utilizarlas para que cuadren las cuentas y asegurarse de que el efecto neto de cualquier proceso es tal que la energía total permanece constante.

Para ver la conservación de la energía en acción en un sistema sencillo, volvamos por última vez al choque de las bolas de billar. Antes de la colisión, cada bola tiene una energía debida a su movimiento. Los físicos la llaman energía cinética. El diccionario de la Real Academia Española define «cinética» como: «perteneciente o relativa al movimiento», por lo que ese nombre tiene sentido. Antes hemos supuesto que las bolas se movían a la misma velocidad y tenían masas iguales. Tras el impacto, saldrían despedidas a velocidades iguales, pero en direcciones opuestas. Eso es lo que nos dice la conservación del momento lineal. Un estudio más detallado nos permite saber que la velocidad de salida es un poco menor que la que llevaban antes del impacto. La razón es que parte de la energía inicial se ha disipado en la colisión. La disipación más evidente se produce mediante la emisión de sonido. Al chocar, las bolas agitan las moléculas del aire que las rodea, y esta perturbación llega a nuestros oídos. Por lo tanto, parte de la energía inicial se escapa, lo que hace que la cantidad que queda en las bolas sea algo menor. Para nuestros fines, en realidad no necesitamos saber cómo cuantificar la energía en todas sus diferentes manifestaciones, aunque la fórmula para la energía cinética sí que nos será útil más adelante. Cualquiera que haya tenido contacto con la ciencia en el instituto la llevará grabada a fuego en su cabeza: energía cinética = ½mv^2. Lo más importante es darse cuenta de que la energía se puede cuantificar mediante un único número y que, si hacemos las cuentas con cuidado, la energía total del sistema permanece siempre constante.

Retomemos el hilo principal de nuestro razonamiento. Hemos introducido el momento lineal como ejemplo de una magnitud descrita mediante una flecha y cuya utilidad, como sucede también con la energía, radica en el hecho de que se conserva. Todo eso está muy bien, pero podemos entrever cómo se cierne sobre nosotros un enorme dilema. El momento lineal es una flecha que vive únicamente en las tres dimensiones de nuestra vida cotidiana. Por lo general, una flecha de momento lineal puede apuntar hacia arriba, hacia abajo, hacia el sudeste o en cualquier otra dirección del espacio. Esto es así porque los objetos pueden moverse en cualquier dirección espacial, y el momento lineal refleja la dirección del movimiento. Pero la idea fundamental del capítulo anterior era poner de manifiesto que nuestra tendencia a separar el espacio y el tiempo nos llevaba a engaño. Necesitamos flechas que apunten en las cuatro dimensiones del espacio-tiempo, pues de lo contrario nunca seremos capaces de construir ecuaciones fundamentales que respeten los postulados de Einstein. Insistimos: las ecuaciones fundamentales deberían construirse con objetos que vivan en el espacio-tiempo, y no en el espacio o en el tiempo por separado, porque los objetos como estos últimos dependen del observador. Recuerda que ni la longitud espacial de un objeto ni el intervalo temporal entre dos eventos son cantidades cuyo valor sea independiente del observador. A eso es a lo que nos referimos cuando decimos que son subjetivas. De forma análoga, el momento lineal es una flecha que apunta en una dirección únicamente espacial. Ese sesgo en contra del tiempo siembra las semillas de su destrucción. ¿Anuncia el espacio-tiempo la quiebra de esta ley, una de las más fundamentales de la física? Es cierto que la estructura espaciotemporal que acabamos de descubrir siembra las semillas de la destrucción, pero también indica cómo hemos de proceder: tenemos que encontrar una magnitud invariante que ocupe el lugar del antiguo momento lineal tridimensional. Este es un punto clave de nuestra historia: existe una magnitud así.

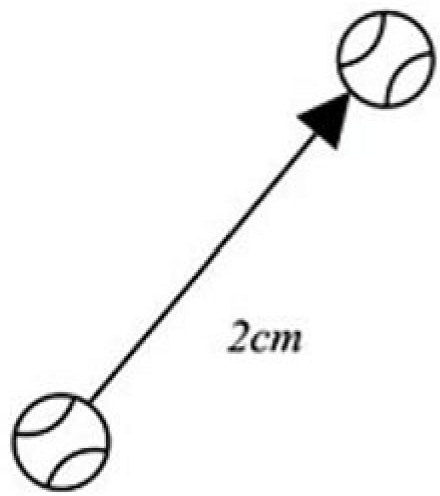

Figura 11

Fijémonos con más detenimiento en el vector momento lineal tridimensional. La figura 11 representa una flecha en el espacio. Podría ser la magnitud del desplazamiento de una pelota al rodar sobre una mesa.[7] Para ser más precisos, supongamos que a mediodía la pelota se encuentra en un extremo de la flecha y que 2 segundos más tarde está en el otro extremo. Si la pelota se mueve 1 centímetro cada segundo, la longitud de la flecha será de 2 centímetros. Es fácil calcular el vector momento lineal. Se trata de una flecha que apunta exactamente en la misma dirección que la flecha de la figura 11, pero cuya longitud es igual a la velocidad de nuestra bola (en este caso, 1 centímetro por segundo) multiplicada por su masa, que podemos suponer que es de 10 gramos. Un físico diría que el vector momento lineal de la bola tiene una longitud de 10 gramos por centímetro partido por segundo (que, en forma abreviada, escribiría como 10 g · cm/s). De nuevo, será preferible que seamos un poco más abstractos y utilicemos símbolos en lugar de limitarnos a unos valores determinados de la masa y la velocidad. Evidentemente, no tenemos ninguna intención de convertirnos en nuestros profesores de matemáticas del colegio, pero… si Δx representa la longitud de la flecha, Δt es el intervalo temporal y m es la masa de la bola (en nuestro ejemplo, $\Delta x = 2$ centímetros, $\Delta t = 2$ segundos y $m = 10$ gramos), entonces la longitud del vector momento lineal es igual a $m\Delta x/\Delta t$. En física se suele utilizar el símbolo griego Δ («delta») para representar una «variación». Así, Δt hace referencia a la variación del tiempo, o intervalo temporal entre dos eventos, y Δx a la longitud de un objeto, en este caso la distancia espacial entre las mediciones inicial y final de la posición de la bola.

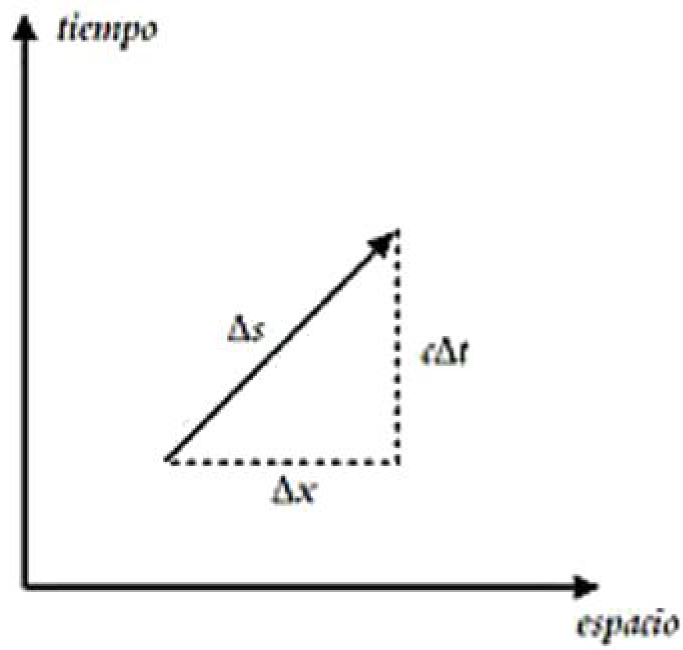

Figura 12

Hemos conseguido construir el vector momento lineal de una bola en el espacio tridimensional, aunque no es algo muy emocionante que digamos. Ahora vamos a atrevernos a dar el paso de construir el vector momento lineal en el espacio-tiempo, y lo haremos de una manera completamente análoga al caso tridimensional. La única restricción es que solo utilizaremos objetos universales en el espacio-tiempo.

De nuevo, partiremos de una flecha, que en esta ocasión apunta en una dirección en el espacio-tiempo tetradimensional, como se muestra en la figura 12. Uno de sus extremos especifica dónde se encuentra nuestra bola en un instante y el otro indica dónde está en otro instante posterior. La longitud de la flecha debe calcularse mediante la fórmula de Minkowski para la distancia espaciotemporal, y por tanto viene dada por $(\Delta s)^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta x)^2$. Recuerda que Δs es la única longitud que es igual para cualquier observador (cosa que desde luego no sucede con Δx y Δt por separado) y, como tal, es la medida que debemos utilizar para la distancia, ocupando así el lugar que Δx tiene en la definición del momento lineal tridimensional. Pero ¿qué será lo que ocupe el lugar del intervalo temporal, Δt? (Recuerda que estamos intentando encontrar un sustituto tetradimensional para $m\Delta x/\Delta t$).Aquí está la clave: no podemos utilizar Δt porque no es una invariante espaciotemporal. No todos los observadores miden los mismos intervalos temporales, como ya hemos dicho una y otra vez, y por tanto debemos evitar utilizarlos en nuestra búsqueda del momento lineal tetradimensional. ¿Qué opciones tenemos? ¿Por qué magnitud podríamos dividir la longitud de la flecha para calcular la velocidad de la bola a través del espacio-tiempo?

Queremos construir algo que suponga una mejora respecto al antiguo momento lineal tridimensional. Cuando tratemos con objetos que se muevan a velocidades pequeñas respecto a la de la luz, el nuevo momento lineal habrá de ser, al menos aproximadamente, equivalente al antiguo. Para que esto suceda, debemos dividir la longitud espaciotemporal de nuestra flecha, Δs, por alguna magnitud que sea del mismo tipo que un intervalo temporal. De lo contrario, el nuevo momento lineal tetradimensional sería algo completamente diferente del antiguo momento tridimensional. Los intervalos temporales se pueden medir en segundos, por lo que también nos gustaría encontrar algo que pueda medirse en segundos. Si partimos de nuestras cantidades invariantes en el espacio-tiempo, la velocidad de la luz, c, y la distancia, Δs, solo existe una combinación viable: el número que se obtiene al dividir la longitud de la flecha (Δs) entre la velocidad c. Dicho de otra forma, si Δs se mide en metros y la velocidad c se mide en metros por segundo, $\Delta s/c$ se mide en segundos. Este debe ser el número entre el que hemos de dividir la longitud de nuestra flecha, ya que es la única cosa invariante de la que disponemos que se mide en las unidades apropiadas. Procedamos, pues, a dividir Δs entre el tiempo definido por $\Delta s/c$. El resultado es simplemente c (por la misma razón por la que 1 dividido entre ½ es igual a 2). En otras palabras, el análogo tetradimensional de la velocidad en nuestra fórmula tridimensional para el momento lineal es el límite de velocidad universal, c.

No es sorprendente que esto te resulte familiar. Todo lo que hemos hecho es calcular la velocidad espaciotemporal de un objeto (una bola, en nuestro ejemplo), obteniendo como resultado c. Hemos llegado exactamente a la misma conclusión en el capítulo anterior cuando hemos estudiado el movimiento del motorista por el paisaje espaciotemporal. En este capítulo, hemos hecho bastante más que eso, porque también hemos dado con un vector velocidad espaciotemporal susceptible de ser utilizado en una nueva definición de nuestro momento lineal tetradimensional. La velocidad de un objeto que se desplaza a través del espacio-tiempo siempre tiene longitud c y señala en la dirección espaciotemporal en la que el objeto se mueve.

Para completar la construcción de la nueva flecha para el momento lineal tetradimensional, todo lo que nos queda por hacer es multiplicar el vector velocidad espaciotemporal por la masa m. Por lo tanto, la flecha que proponemos siempre tendrá una longitud igual a mc y apuntará en la dirección en la que el objeto viaja por el espacio-tiempo. En una primera impresión, esta nueva flecha de momento lineal es aburrida, porque su longitud espaciotemporal siempre es la misma. Parece que no empezamos muy bien, pero no dejemos que esto nos detenga. Aún está por ver si el vector momento lineal espaciotemporal que acabamos de construir tiene alguna relación con el antiguo momento lineal tridimensional e, incluso, si nos será de alguna utilidad en este nuevo mundo espaciotemporal.

Para profundizar un poco más, ahora vamos a echar un vistazo a las componentes de nuestro nuevo vector momento lineal espaciotemporal que apuntan en las direcciones espacial y temporal. Para hacerlo, es absolutamente inevitable recurrir a las matemáticas. No nos queda más remedio que pedir disculpas al lector poco avezado en el uso de las matemáticas y prometerle que iremos muy despacio. Recuerda, siempre cabe la opción de pasar por encima de las ecuaciones hasta llegar al final de la historia. Las matemáticas hacen que el razonamiento sea más convincente, pero es perfectamente posible seguir leyendo sin detenerse en los detalles. Asimismo, nos vemos obligados a pedir disculpas al lector que maneje con soltura las matemáticas por dedicarle tanto tiempo a este asunto. En Manchester tenemos un dicho: «No se puede tener todo». Puede que este refrán sea más difícil de entender que las matemáticas.

Recuerda que habíamos obtenido una expresión para la longitud del vector momento lineal en el espacio tridimensional, $m\Delta x/\Delta t$. Acabamos de argumentar por qué hemos de reemplazar Δx por Δs y Δt por $\Delta s/c$ para formar el vector momento lineal tetradimensional, cuya longitud, que no parece muy interesante, es mc. Permítenos dedicarle un párrafo más y escribir la expresión completa del sustituto de Δt, $\Delta s/c$, que es $\sqrt{(c\Delta r)^2 - (\Delta x)^2}/c$. Parece enrevesado, pero con un poco de manipulación matemática podemos reescribirla de una forma más sencilla: es equivalente a $\Delta t/\gamma$, donde $\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$. Para llegar hasta ahí, hemos aprovechado que $v = \Delta x/\Delta t$ es la velocidad del objeto. γ no es otra que la magnitud que ya nos hemos encontrado en el capítulo 3, que cuantifica en qué medida se ralentiza el tiempo para alguien que ve cómo el reloj pasa volando a una cierta velocidad.

Estamos ya muy cerca de nuestro objetivo. Hemos desarrollado este razonamiento matemático para poder determinar cuál es la proporción exacta en la que el vector momento lineal señala por separado en las direcciones espacial y temporal. Antes, repasemos el tratamiento que le hemos dado al vector momento lineal en el espacio tridimensional. La figura 11 nos ha ayudado a hacernos una idea. El vector momento lineal tridimensional señala exactamente en la misma dirección que la flecha de la figura 11, porque lo hace en la dirección en que se mueve la bola. La única diferencia es que, para obtener su longitud, hemos de multiplicar la velocidad por la masa de la bola y dividirla por el intervalo de tiempo. La situación en el caso tetradimensional es completamente análoga. Aquí, el vector momento lineal apunta en la dirección espaciotemporal en la que se mueve la bola, que es la de la flecha de la figura 12. De nuevo, para obtener el momento, necesitamos redimensionar la longitud de la flecha, pero esta vez tenemos que multiplicarla por la masa y dividirla por la magnitud invariante $\Delta s/c$ (que, como hemos visto en el párrafo anterior, es igual a $\Delta t/\gamma$). Si te fijas en la flecha de la figura 12, verás que si queremos cambiar su longitud sin variar la dirección en la que señala, tenemos que modificar en la misma proporción la componente que apunta en la dirección x (Δx) y la que lo hace en la dirección temporal ($c\Delta t$). De esta forma, la longitud de la parte del vector momento lineal que apunta en dirección espacial es simplemente Δx multiplicada por m y dividida por $\Delta t/\gamma$, lo que puede escribirse como $\gamma m\Delta x/\Delta t$. Si tenemos en cuenta que $v = \Delta x/\Delta t$ es la velocidad espacial del objeto, llegamos al resultado siguiente: la parte del vector momento lineal espaciotemporal que apunta en la dirección espacial tiene una longitud de γmv.

Esto es realmente interesante (el vector momento lineal en el espacio-tiempo que hemos construido no tiene nada de aburrido). Si la velocidad de nuestro objeto, v, es mucho menor que la de la luz, c, entonces γ dista muy poco de la unidad. En ese caso, recuperamos el momento antiguo, dado por el producto de la masa por la velocidad: $p = mv$. Esto es muy alentador, así que nos incita a proseguir. De hecho, lo que hemos conseguido va mucho más allá de traducir el antiguo momento al nuevo marco tetradimensional. Por una parte, tenemos una fórmula que cabe suponer más precisa, ya que γ solo es exactamente igual a uno cuando la velocidad es nula.

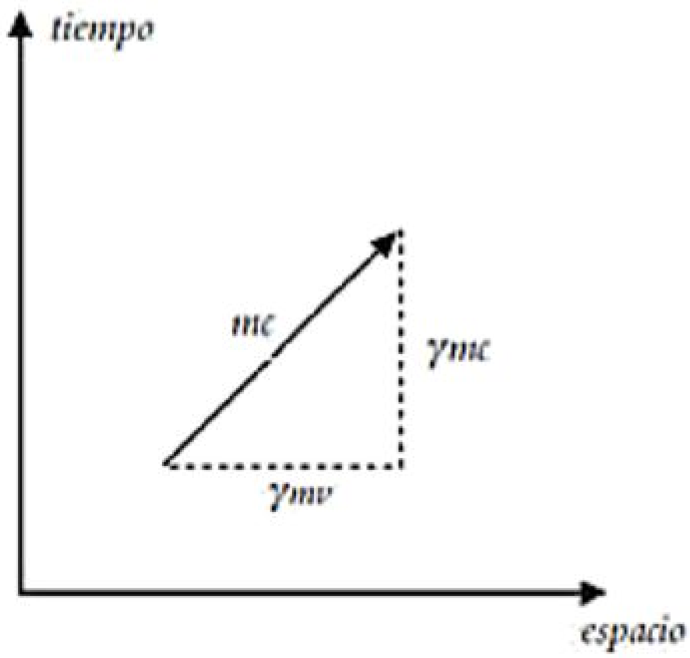

Figura 13

Más interesante que el hecho de haber modificado $p = mv$ es lo que sucede cuando nos fijamos en la parte del vector momento lineal que apunta en la dirección temporal. Después de todo el trabajo que hemos hecho, no nos costará calcularla. El resultado aparece en la figura 13. La parte del nuevo vector momento lineal que señala en la dirección temporal tiene una longitud igual a $c\Delta t$ multiplicada por m y dividida de nuevo por $\Delta t/\gamma$, lo que es equivalente a γmc.

Recuerda que el momento lineal nos interesa porque se conserva. Nuestro objetivo ha sido encontrar un nuevo momento lineal tetradimensional que se conserve en el espacio-tiempo. Podemos imaginarnos un montón de vectores momento lineal en el espacio-tiempo, cada uno apuntando en una dirección, que representen, por ejemplo, los momentos lineales de varias partículas a punto de chocar entre sí. Tras la colisión, habrá un nuevo conjunto de vectores momento lineal, que señalarán en direcciones distintas. Pero la ley de conservación del momento lineal nos dice que la suma total de todas las nuevas flechas debe ser exactamente igual a la suma total de las flechas originales. Esto a su vez significa que la suma total de las partes de las flechas que señalan en la dirección espacial se debe conservar, igual que la suma de las partes que apuntan en la dirección temporal. Por lo tanto, si sumamos los valores de γmv para cada partícula, el total debería ser el mismo antes y después de la colisión. Lo mismo sucede para las partes temporales, pero en este caso lo que se conserva ahora es la suma total de los valores de γmc. Parece que tenemos dos nuevas leyes de la física: γmv y γmc son cantidades que se conservan. Pero ¿a qué corresponden estas dos cosas en particular? A primera vista, no hay mucho con lo que poder entusiasmarse. Si las velocidades son bajas, γ es muy cercano a la unidad y γmv se convierte prácticamente en mv. Recuperamos así la antigua ley de conservación del momento lineal. Esto es tranquilizador, porque confiábamos en llegar a algo que los físicos de la época victoriana pudiesen reconocer. Desde luego, Brunel y los otros grandes ingenieros del siglo XIX se las apañaron a la perfección sin el espacio-tiempo, por lo que nuestra nueva definición del momento lineal tenía que conducirnos a resultados prácticamente iguales a los que se obtuvieron durante la revolución industrial, siempre que las cosas no se moviesen a velocidades demasiado cercanas a la de la luz. Al fin y al cabo, el puente colgante de Clifton no se hundió súbitamente cuando a Einstein se le ocurrió la relatividad.

¿Qué podemos decir respecto a la conservación de γmc? Como c es una constante universal cuyo valor es el mismo para todos, la conservación de γmc equivale a la conservación de la masa. Esto no parece muy sorprendente y concuerda con nuestra intuición, aunque es interesante que haya aparecido como por arte de magia. Por ejemplo, parece querer decir que después de quemar carbón en un fuego, la masa de las cenizas (más la de la materia que se ha escapado por la chimenea) debería ser igual a la del carbón antes de que el fuego se encendiese. El hecho de que γ no sea exactamente igual a uno no parece preocupante, y podríamos caer en la tentación de seguir adelante sin más, satisfechos por haber conseguido ya mucho. Hemos definido el momento lineal de manera que tuviese sentido en el espacio-tiempo y, como resultado, hemos deducido unas correcciones (habitualmente minúsculas) respecto a la definición decimonónica del momento lineal, a la vez que deducíamos la ley de conservación de la masa. ¿Qué más podríamos pedir?

Hemos tardado mucho en llegar hasta este punto, pero nuestra historia aún nos reserva una sorpresa final. Vamos a fijarnos con más detenimiento en la parte del vector momento lineal que señala en la dirección temporal, y al hacerlo descubriremos, casi milagrosamente, la ecuación más famosa de Einstein. El colofón se aproxima. Tales de Mileto se reclina en su baño, preparándose para el hechizo definitivo. Si has llegado hasta aquí, es muy probable que al leer esta frase sientas que estás haciendo complicados malabarismos mentales. No es baladí, porque has aprendido gran parte de lo que se espera que un físico profesional sepa sobre los vectores tetra dimensionales y el espacio-tiempo de Minkowski. Ya estamos listos para el gran momento.

Hemos demostrado que γmc debería conservarse. Debemos dejar claro lo que esto significa. Imagina una partida de billar relativista, en la que cada bola tiene su propio valor de γmc. Súmalos todos. El valor total, sea cual sea, no varía. Juguemos ahora a lo que en principio parece un juego sin ningún sentido. Si γmc se conserva, también lo hace γmc^2, porque c no es más que una constante. Enseguida verás el porqué de lo anterior. Ahora bien, γ no es exactamente igual a uno y, para velocidades pequeñas, se puede sustituir aproximadamente por la expresión $\gamma = 1 + ½(v^2/c^2)$.

v/c	γ	$1 + \frac{1}{2}(v^2/c^2)$
0,01	1,00005	1,00005
0,1	1,00504	1,00500
0,2	1,02062	1,02000
0,5	1,15470	1,12500

Tabla 5.1

Con una calculadora, puedes comprobar tú mismo que esta expresión funciona bastante bien para velocidades pequeñas respecto a *c*.[8] Si no tienes una calculadora a mano, esperamos que la tabla de la página siguiente te convenza. Fíjate en que la expresión aproximada (con la que hemos calculado los números de la tercera columna) es de hecho muy precisa incluso para velocidades de hasta una décima parte de la velocidad de la luz ($v/c = 0,1$), es decir, de unos 30 millones de kilómetros por segundo, normalmente inalcanzables.

Teniendo en cuenta esta simplificación, γmc^2 es aproximadamente igual a $mc^2 + ½mv^2$. Ahora ya somos capaces de apreciar la profunda importancia de las consecuencias de lo que hemos estado haciendo. Para velocidades pequeñas en comparación con *c*, hemos demostrado que la magnitud $mc^2 + ½mv^2$ se conserva. Para ser más precisos, lo que se conserva es la magnitud γmc^2, pero, en este punto, la primera ecuación es mucho más reveladora. ¿Por qué? Porque, como ya hemos visto, el producto $½mv^2$ es la energía cinética con la que nos hemos encontrado en el ejemplo del choque de las bolas de billar, que mide la cantidad de energía que tiene un objeto de masa *m* por el hecho de moverse a una velocidad *v*. Hemos descubierto que existe una cosa que se conserva que es igual a algo (mc^2) más la energía cinética. Parece razonable referirse a ese «algo que se conserva» como la energía, pero ahora consta de dos partes. Una es $½mv^2$ y la otra es mc^2. No dejes que te confunda el hecho de que lo hayamos multiplicado todo por *c*. Solo lo hemos hecho para que el resultado final incluyese el término $½mv^2$ en lugar de $½mv^2/c^2$, ya que la primera expresión es lo que los científicos desde hace siglos han denominado energía cinética. Si quieres, puedes darle a $½mv^2/c^2$ el nombre de «masa cinética» o cualquier otro que se te ocurra. Eso es lo de menos (incluso aunque lleve asociada la carga de la palabra «energía»). Lo importante es que es la «componente temporal del vector momento lineal en el espacio-tiempo», y que se conserva. Hay que reconocer que la ecuación «la componente temporal del vector momento lineal en el espacio-tiempo es igual a *mc*» no tiene tanto gancho como $E = mc^2$, pero la física es la misma.

Sorprendentemente, hemos demostrado que la conservación del momento lineal en el espacio-tiempo no solo conduce a una versión nueva y mejorada de la conservación del momento lineal en tres dimensiones, sino también a una revisión de la ley de conservación de la energía. Acabamos de ver que, si tenemos un sistema de partículas agitándose, al sumar la energía cinética de todas las partículas junto con las masas de cada una de ellas multiplicadas por c al cuadrado, obtenemos algo que no varía. En la época victoriana habría bastado con la afirmación de que la suma de la energía cinética no variaba, y también con decir que tampoco lo hacía la suma total de las masas (multiplicar por c al cuadrado carece de importancia cuando aquello de lo que hablamos no varía). Nuestra nueva ley es coherente con esa situación, pero va mucho más allá. Resulta que no hay nada que impida que parte de la masa se convierta en energía cinética y viceversa, siempre que la suma de ambas cosas se conserve. Hemos descubierto que la masa y la energía son potencialmente intercambiables y que la cantidad de energía que podemos extraer de una masa m en reposo (en ese caso, γ es igual a uno) viene dada por la ecuación $E = mc^2$.

Nuestro amigo Tales de Mileto puede por fin experimentar el hechizo en todo su esplendor. Sale de su bañera, la leche de burra goteando sobre el suelo, y da la bienvenida a sus concubinas.

Resumiendo: queríamos encontrar un objeto en el espacio-tiempo que hiciese las veces del momento lineal en el espacio tridimensional, porque el momento lineal es una cantidad que se conserva, y por tanto útil. Hemos conseguido encontrarlo, construyéndolo únicamente a partir de cosas que son iguales para todos los observadores, como la distancia espaciotemporal, el límite de velocidad universal y la masa. El vector momento lineal en el espacio-tiempo ha resultado ser muy interesante. Fijándonos en la parte que señala en la dirección espacial, hemos vuelto a descubrir la antigua ley de conservación del momento lineal, con un ajuste para los objetos que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz. Pero el verdadero hallazgo se ha producido cuando nos hemos fijado en la parte del vector que apunta en la dirección temporal, que nos ha ofrecido una versión completamente nueva de la ley de conservación de la energía. En ella aparece la antigua energía cinética, $\frac{1}{2}mv^2$, pero también figura una parte completamente nueva: mc^2. Así, incluso si un objeto está en reposo, tiene una energía asociada, que viene dada por la famosa ecuación de Einstein: $E = mc^2$.

¿Qué significa todo esto? Hemos demostrado que la energía es una magnitud interesante porque se conserva: «Puedes aumentar la energía por aquí siempre que la disminuyas por allí». Más aún, hemos demostrado que la propia masa de un objeto constituye una fuente potencial de energía. Podemos imaginar que tomamos un pedazo de materia, por ejemplo un kilogramo de «algo» (sea lo que sea) y «hacemos algo con ello» de forma que después ya no tengamos ese kilogramo de materia. No queremos decir con esto que hayamos machacado el kilogramo de materia hasta hacerlo pedazos, sino que ha desaparecido. De hecho, podemos imaginar una situación extrema en la que se consume toda la masa inicial. En su lugar debería crearse el equivalente de un kilogramo en energía (más la energía que hayamos empleado en «hacer algo con ello»). Esta energía podría tomar la forma de masa (por ejemplo, se podrían crear unos pocos cientos de gramos de «materia» nueva), y el resto existiría bajo la forma de energía cinética: la nueva materia se movería a toda velocidad. Evidentemente, todo esto nos lo acabamos de inventar, era una situación imaginaria. La idea que conviene resaltar es que es algo que la teoría de Einstein permite. Antes de Einstein, nadie había soñado que la masa pudiese destruirse y convertirse en energía, porque la masa y la energía parecían entidades completamente inconexas. Después de Einstein, todo el mundo tuvo que aceptar que son manifestaciones diferentes del mismo tipo de cosa. Esto es así porque hemos descubierto que la energía, la masa y el momento lineal deben combinarse en un solo objeto en el espacio-tiempo al que nos hemos venido refiriendo como vector momento lineal espaciotemporal. En realidad, entre los físicos el nombre más habitual es cuadrimomento. Igual que hemos visto que no deberíamos pensar en el espacio y el tiempo como entidades separadas, hemos descubierto que la energía y el momento lineal no son más que sombras de un objeto más fundamental, el cuadrimomento. La fuerte inclinación de nuestra intuición a separar el espacio y el tiempo es la que nos lleva a pensar en ellos como entidades distintas e inconexas. Lo verdaderamente importante es que la naturaleza sí que aprovecha la oportunidad: es posible convertir masa en energía. Si no fuese así, ni siquiera existiríamos.

Antes de desentrañar esta rotunda afirmación, puede que sea conveniente explicar un poco mejor lo que queremos decir con «destruido». En este contexto, «destrucción» no se refiere a lo que sucede cuando un valioso jarrón cae al suelo y se hace añicos. Tras una destrucción de ese tipo, apesadumbrado, podrías barrer los pedazos, pesarlos, y comprobar que no se ha producido un cambio significativo en la masa. Cuando decimos que el jarrón se ha destruido, lo que queremos decir es que, tras el acto de la destrucción, hay menos átomos que antes, y que, por lo tanto, la masa es menor. Quizá te parezca algo nuevo y discutible. La idea de que la materia está formada por pequeñas piezas y que podemos trocearlas y reordenarlas está muy arraigada, y se remonta al menos a Demócrito, en la antigua Grecia. La teoría de Einstein le da un vuelco a esa manera de ver el mundo para conducirnos a uno en el que la materia es más ambigua, y puede aparecer y desaparecer, dejando de existir. De hecho, actualmente, ese ciclo de destrucción y creación tiene lugar a diario en los aceleradores de partículas. Más adelante volveremos sobre esto.

Y ahora el gran colofón. Por desgracia, se nos han acabado las cosas que Tales podría hacer en buena compañía, pero esto va a ser realmente maravilloso. Queremos completar la identificación de *c* con la velocidad de la luz. Hemos venido insistiendo en que lo fundamental de la manera espaciotemporal de pensar sobre las cosas es que *c* es un límite de velocidad cósmico universal, no el hecho de que sea la velocidad de la luz. En el capítulo anterior hemos logrado identificar *c* como la velocidad de la luz, pero solo tras haberla comparado con los resultados que hemos obtenido en el capítulo 3. Ahora podemos hacerlo sin necesidad de recurrir a ideas ajenas al marco espaciotemporal. Trataremos de encontrar una interpretación alternativa de la c que aparece en $E = mc^2$, distinta de la del límite de velocidad cósmico.

La solución se encuentra en otra característica extraña y oculta de la ecuación de Einstein para la masa y la energía. Para seguir investigando, necesitamos olvidar las aproximaciones que hemos hecho antes y escribir las expresiones exactas de las partes espacial y temporal del cuadrimomento. La energía de un objeto, que es la parte temporal del cuadrimomento (multiplicada por c), es igual a γmc^2, y el momento lineal, que es la parte espacial, es γmv. Ahora nos plantearemos una pregunta que en principio puede parecer muy extraña: ¿qué pasa si un objeto tiene masa nula? Un vistazo rápido podría sugerir que, si la masa es cero, el objeto tendría energía nula y momento nulo, en cuyo caso nunca influiría sobre ningún otro objeto, y sería como si no existiese. Pero no es así, gracias a una sutileza matemática. El detalle tiene que ver con γ. Recuerda que $\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$. Si el objeto se mueve a la velocidad de la luz, el factor γ se hace infinito, porque tenemos que dividir uno entre cero (la raíz cuadrada de cero es cero). Así que, para el caso muy particular en que la masa es cero y la velocidad es c, tenemos una situación extraña. En las expresiones matemáticas del momento lineal y de la energía, acabamos teniendo infinito multiplicado por cero, lo cual es una indeterminación matemática. Dicho de otro modo, las ecuaciones tal y como las conocemos no son útiles pero, lo que es muy importante, no podemos concluir que, para partículas sin masa, la energía y el momento lineal son necesariamente nulos. Sí podemos, no obstante, preguntarnos qué sucede con la proporción entre el momento y la energía. Dividiendo $E = \gamma mc^2$ entre $p = \gamma mv$ obtenemos $E/p = c^2/v$, lo que, para el caso especial en que $v = c$, resulta en la ecuación $E = cp$, que sí tiene sentido. Por lo tanto, la conclusión es que es posible que tanto la energía como el momento lineal sean distintos de cero incluso para un objeto cuya masa sea nula, pero solo si se mueve a la velocidad c. Así, la teoría de Einstein contempla la posibilidad de que existan partículas sin masa. Es aquí donde los experimentos nos son útiles. Gracias a ellos sabemos que la luz está compuesta por partículas llamadas fotones, cuya masa, hasta donde sabemos, es nula. Por consiguiente, deben moverse a la velocidad de la luz. Esto es importante: ¿qué haríamos si en el futuro un experimento demuestra que los fotones en realidad poseen una masa minúscula? Por suerte, ya puedes contestar a esa pregunta. La respuesta es que no haríamos nada, salvo volver al segundo postulado de Einstein en el capítulo 3 y sustituirlo por la afirmación de que «la velocidad de las partículas sin masa es una constante universal». Evidentemente, los nuevos datos experimentales no alterarían el valor de c, pero sí harían que ya no pudiésemos identificarla con la velocidad a la que viaja la luz.

Esto es algo muy profundo. La c en $E = mc^2$ tiene algo que ver con la luz debido únicamente al hecho experimental de que resulta que las partículas de luz no tienen masa. Históricamente, esto tuvo una importancia extraordinaria, porque permitió que los experimentalistas, como Faraday, y los teóricos, como Maxwell, tuviesen acceso directo a un fenómeno que se desplazaba a una velocidad que coincide con el límite universal: las ondas electromagnéticas. Este hecho fue tan importante para el desarrollo de las ideas de Einstein, que es posible que, de no ser por esta coincidencia, no hubiese descubierto la relatividad. Nunca lo sabremos. Puede que «coincidencia» sea la palabra apropiada, porque, como veremos en el capítulo 7, no existe una razón fundamental que obligue a que la masa del fotón sea nula. Lo que es más, existe un mecanismo, conocido como mecanismo de Higgs, que quizá podría, en un universo diferente, haber hecho que el fotón tuviese una masa no nula. Sería más correcto interpretar la c en $E = mc^2$ como la velocidad de las partículas sin masa, que están estrictamente obligadas a moverse por el universo a esta velocidad. Desde un punto de vista espaciotemporal, c se introdujo para que pudiésemos definir la manera de calcular distancias en la dirección temporal. Por lo tanto, está integrada en el propio tejido del espacio-tiempo.

Como habrás visto, la energía asociada a una masa determinada incluye un factor de la velocidad de la luz al cuadrado. Puesto que la velocidad de la luz es tan enorme en comparación con las velocidades ordinarias y cotidianas (la v en $\frac{1}{2}mv^2$), no te sorprenderá saber que la energía acumulada dentro de masas incluso muy pequeñas es descomunal. Aún no podemos decir que hayamos demostrado que se puede tener acceso directo a esta energía. Pero, si lo lográsemos, tendríamos ante nosotros, literalmente, una fuente de energía enorme. Podemos incluso dar una cifra, ya que disponemos de las fórmulas necesarias. Sabemos que la energía cinética de una partícula de masa m que se mueve a una velocidad v es aproximadamente igual a $\frac{1}{2}mv^2$, y que la energía almacenada en su masa es igual a mc^2 (supondremos que v es mucho más pequeña que c, pues de lo contrario tendríamos que utilizar la fórmula γmc^2, que es más complicada). Pongamos números para hacernos una mejor idea de lo que significan en realidad estas ecuaciones.

Una bombilla normal irradia 100 julios de energía por segundo. Un julio es la unidad de energía, llamada así en honor de James Joule, una de las grandes figuras de Manchester cuyo ímpetu intelectual impulsó la revolución industrial. Cien julios por segundo son 100 vatios, llamados así en memoria del ingeniero escocés James Watt. El siglo XIX fue una época de fantásticos avances científicos, que ahora conmemoramos cada vez que medimos magnitudes cotidianas. Si una ciudad tiene 100.000 habitantes, parece razonable estimar que necesita un suministro de corriente eléctrica de alrededor de 100 millones de vatios (100 megavatios). Incluso para generar solo 100 julios se necesita una buena cantidad de esfuerzo mecánico. Es aproximadamente igual a la energía cinética de una pelota de tenis que se mueve a unos 215 kilómetros por hora, la velocidad a la que saca un tenista profesional. Puedes hacer los cálculos tú mismo. La masa de una pelota de tenis es de unos 57 gramos (o 0,057 kilogramos) y 215 kilómetros por hora equivalen aproximadamente a 60 metros por segundo. Si introducimos estos números en $\frac{1}{2}mv^2$, obtenemos una energía cinética igual a $\frac{1}{2} \times 0{,}057 \times 60 \times 60$ julios. Se puede definir un julio como la energía cinética de una masa de 2 kilogramos que se mueve 1 metro por segundo. Compruébalo tú mismo. Haría falta un aluvión constante de pelotas de tenis (una por segundo) para alimentar una sola bombilla eléctrica. En realidad, las pelotas deberían ir todavía más rápido, o llegar con mayor frecuencia, porque tendríamos que extraerles la energía cinética, convertirla en energía eléctrica (mediante un generador) y transferírsela a la bombilla. Queda claro que sería muy costoso alimentar una bombilla de esta manera.

¿Con cuánta masa podríamos realizar el mismo trabajo si supiésemos cómo aplicar la teoría de Einstein para convertirla completamente en energía? La respuesta es que la masa debería ser igual a la energía dividida por la velocidad de la luz al cuadrado: 100 julios divididos dos veces entre 300 millones de metros por segundo. El resultado es 0,000000000001 gramos o, expresado en palabras, una millonésima de millonésima (una billonésima) de un gramo. A ese ritmo, bastaría con que destruyésemos únicamente 1 microgramo de material por segundo para alimentar a una ciudad. En un siglo hay aproximadamente 3.000 millones de segundos, por lo que solo necesitaríamos 3 kilogramos de material para mantener la ciudad en funcionamiento durante cien años. Una cosa está clara: la cantidad potencial de energía acumulada en la materia es de una magnitud muy diferente de cualquier otra cosa de las que experimentamos a diario, y si pudiésemos liberarla resolveríamos todos los problemas energéticos de la Tierra.

Antes de seguir adelante, comentaremos una última cuestión. A nosotros, aquí en la Tierra, la cantidad de energía acumulada en la masa nos parece completamente astronómica. Aunque resulta tentador, nos equivocaríamos por completo si pensásemos que esto se debe a que la velocidad de la luz es un número muy grande. Lo que sucede es que $\frac{1}{2}mv^2$ es muy pequeño en comparación con mc^2 porque las velocidades a las que estamos acostumbrados son mucho menores que el límite de velocidad cósmico. La razón de que nuestra existencia se desarrolle a unas energías relativamente bajas tiene que ver en última instancia con las intensidades de las fuerzas de la naturaleza, en particular con la intensidad relativamente baja de las fuerzas electromagnética y gravitatoria. Lo estudiaremos con más detalle en el capítulo 7, cuando nos adentremos en el mundo de la física de partículas.

Después de Einstein, los seres humanos tardaron medio siglo en encontrar la manera de extraer cantidades importantes de energía de la masa que compone la materia. Hoy en día, la destrucción de la masa se emplea en las centrales nucleares. Por su parte, la naturaleza lleva miles de millones de años sacando provecho de $E = mc^2$. En un sentido muy real, es la semilla de la vida, porque sin ella el Sol no brillaría y la Tierra estaría para siempre sumida en la oscuridad.

Capítulo 6
¿Y por qué debería importarnos?
Sobre átomos, ratoneras y la energía de las estrellas

Hemos visto cómo la famosa ecuación de Einstein nos obliga a repensar nuestra forma de entender la masa. Nos hemos dado cuenta de que la masa no es únicamente una medida de la cantidad de materia de que consta un objeto, sino que es también una medida de la energía latente acumulada en la propia materia. También hemos visto que, si somos capaces de liberarla, dispondríamos de una fuente de energía extraordinaria. Pasaremos parte de este capítulo explorando las maneras en que puede liberarse la energía almacenada en forma de masa. Pero antes de pasar a cosas más prácticas, nos gustaría dedicar algo más de tiempo a hablar de la ecuación que acabamos de descubrir, $E = mc^2 + ½mv^2$, con más detenimiento.

Recuerda que esta versión de $E = \gamma mc^2$ es tan solo una aproximación, aunque bastante buena para velocidades de hasta el 20 por ciento de la velocidad de la luz. Escribirla de esta manera pone de manifiesto la separación entre la energía debida a la masa y la energía cinética. Recuerda asimismo que podemos construir un vector en el espacio-tiempo cuya longitud en la dirección espacial representa una magnitud que se conserva, que, para velocidades pequeñas en comparación con la de la luz, se reduce a la antigua ley de conservación del momento lineal. Igual que se conserva la longitud del nuevo vector momento lineal espaciotemporal en la dirección espacial, también se conserva su longitud en la dirección temporal, que es igual a $mc^2 + ½mv^2$. Hemos reconocido $½mv^2$ como la expresión de una magnitud que los científicos conocen desde hace mucho tiempo, la energía cinética, y por tanto identificamos la magnitud conservada con la energía. Es muy importante el hecho de que no nos hemos propuesto encontrar la conservación de la energía, sino que ha aparecido por sorpresa mientras tratábamos de encontrar una versión espaciotemporal de la ley de conservación del momento lineal.

Imagina un cubo lleno de ratoneras ya armadas, que almacenan energía en sus muelles. Sabemos que los muelles en tensión acumulan energía porque cuando la trampa salta suena un golpe fuerte (que es energía liberada en forma de sonido) y la trampa puede salir por los aires (energía convertida en energía cinética). Imagina ahora que una de las trampas salta y provoca que lo hagan también las demás. Se oye un enorme estruendo cuando la energía almacenada en los muelles se libera y las ratoneras se cierran con un chasquido. Lo que es más, puesto que todas las trampas estaban inicialmente en reposo, la energía total debe ser igual a mc^2, donde m es la masa total del cubo de trampas preparadas. Después tenemos un montón de trampas ya disparadas y la energía que se ha liberado. Para que la energía total antes y después sea la misma, la masa del cubo con las ratoneras armadas ha de ser mayor que cuando las ratoneras se han disparado. Veamos otro ejemplo, esta vez relacionado con la contribución a la masa debida a la energía cinética. Una caja llena de gas caliente tiene una masa mayor que una caja idéntica que contenga la misma cantidad de gas a una temperatura más baja. La temperatura da una medida de la velocidad a la que las moléculas se agitan dentro de la caja: cuanto más caliente está el gas, más rápido se mueven las partículas que lo componen. Puesto que se mueven más rápido, tienen una mayor energía cinética (es decir, el resultado de sumar los valores de $½mv^2$ para todas las moléculas es mayor para el gas caliente) y, por lo tanto, la caja tiene una masa mayor. Esta lógica se aplica a todo lo que almacena energía. Una batería nueva tiene más masa que una usada, un termo con café caliente tiene más masa que uno frío, un pastel de carne y patata recién hecho, comprado durante el descanso del partido en el campo del Oldham Athletic una lluviosa tarde de sábado tiene más masa que el mismo pastel, intacto, al final del partido.

Como vemos, la conversión de masa en energía no es un proceso tan insólito. Sucede continuamente. Cuando descansas junto a un fuego crepitante estás absorbiendo calor proveniente de las brasas ardientes, lo que hace que disminuya la energía del carbón. A la mañana siguiente, cuando el fuego se ha extinguido, podrías recoger con diligencia toda la ceniza y pesarla en una balanza de una precisión inalcanzable, e incluso en el caso de que, milagrosamente, consiguieses aglutinar todos los átomos de ceniza, comprobarías que esta pesa menos que el carbón original. La diferencia sería igual a la cantidad de energía liberada dividida por la velocidad de la luz al cuadrado, como predice $E = mc^2$; es decir, según $m = E/c^2$. Es muy fácil calcular lo minúscula que sería la variación de la masa para un fuego como el que encenderías para calentar tu casa al anochecer. Si el fuego genera 1.000 vatios de potencia durante 8 horas, la producción total de energía es igual a 1.000 vatios × (8 × 60 × 60) julios (porque tenemos que utilizar segundos, en lugar de horas, para que el resultado venga dado en julios), lo que equivale a algo menos de 30 millones de julios. La pérdida de masa correspondiente debe ser, por lo tanto, igual a 30 millones de julios divididos entre la velocidad de la luz al cuadrado, lo que equivale a menos de una millonésima de gramo. Esta minúscula reducción de la masa es consecuencia directa de la conservación de la energía. Antes de encender el fuego, la energía total del carbón es igual a su masa total multiplicada por la velocidad de la luz al cuadrado. Al arder, el fuego desprende energía. Finalmente, el fuego se extingue y solo queda la ceniza. Según la ley de conservación de la energía, la energía total de la ceniza debe ser menor que la del carbón en una magnitud igual a la energía que se ha invertido en calentar la habitación. La energía de la ceniza es igual a su masa multiplicada por la velocidad de la luz al cuadrado, y debe ser más ligera que el carbón original en la proporción que acabamos de calcular.

El proceso de convertir masa en energía, y viceversa, es, por lo tanto, absolutamente fundamental en el funcionamiento de la naturaleza, es un fenómeno cotidiano. Para que cualquier cosa suceda en el universo, deben producirse trasvases continuos entre la masa y la energía. ¿Cómo es posible que alguien consiguiese explicar cualquier cosa relacionada con la energía antes de que tuviésemos conocimiento de lo que parece ser uno de los elementos básicos del funcionamiento de la naturaleza? Merece la pena recordar que Einstein escribió por primera vez la ecuación $E = mc^2$ en 1905, en un mundo que distaba mucho de ser primitivo. El primer tren interurbano de pasajeros, propulsado por locomotoras de vapor alimentadas a base de carbón, se había inaugurado en 1830 entre Liverpool y Manchester. Los transatlánticos de vapor llevaban casi setenta años surcando el Atlántico, y la era del carbón había llegado a su apogeo, con la inminente botadura de buques propulsados por modernos sistemas de turbinas de vapor, como el *Mauritania* y el *Titanic*. No cabe duda de que en la Inglaterra victoriana sabían cómo quemar carbón de forma eficiente y con resultados espectaculares, pero ¿cómo pensaban los científicos de la época sobre la física de la combustión antes de Einstein? Un ingeniero del siglo XIX habría dicho que el carbón contiene una energía latente (similar a la energía acumulada en un montón de ratoneras en miniatura) y que las reacciones químicas que se producen durante su combustión hacen que las ratoneras salten, liberando la energía. Esta representación es útil, y permite hacer cálculos con la precisión necesaria para diseñar máquinas tan magníficas como un transatlántico o una locomotora de vapor. La visión posterior a Einstein no sustituye dicha representación, sino que la complementa. Es decir, ahora entendemos que la energía latente está indisociablemente ligada al concepto de masa. Cuanta más energía latente contiene un objeto, mayor es su masa. Antes de Einstein, a los científicos no se les habría ocurrido imaginar que existía un vínculo entre la masa y la energía, porque no había nada que les indicase que era así. La visión que tenían de la naturaleza era lo suficientemente precisa como para permitirles explicar el mundo que observaban y resolver los problemas a los que se enfrentaban, porque las variaciones en la masa eran tan minúsculas que no necesitaban saber que estas se producían.

Esta es otra idea importante sobre el funcionamiento de la ciencia: cada nuevo nivel de comprensión da lugar a una representación del mundo más precisa. Nunca podemos llegar a afirmar que la visión actual es correcta, puesto que uno de los pilares de la ciencia es que en su seno no tienen cabida las verdades absolutas. El acervo científico en cualquier momento determinado de la historia, incluido el actual, es simplemente el conjunto de teorías y representaciones del mundo que aún no se ha demostrado que sean erróneas.

Los ejemplos que acabamos de ver implican variaciones de la masa proporcionalmente muy pequeñas, pero es evidente que la cantidad de energía liberada en cada caso puede ser muy importante. Un fuego nos calienta y un pastel recién hecho es mucho más sabroso que uno frío. En el caso de la combustión del carbón, la energía almacenada es al principio energía química. Las moléculas que componen el carbón se reorganizan y se convierten en ceniza como resultado de la reacción química en cadena que da comienzo cuando se enciende una cerilla. A medida que los enlaces entre las moléculas van rompiéndose y volviéndose a formar, y los átomos se recombinan entre sí para dar lugar a nuevas moléculas, se libera energía y la masa disminuye. La energía química tiene su origen en la estructura de los átomos. El ejemplo más sencillo es un solo átomo de hidrógeno, compuesto por un único electrón que orbita alrededor de un solo protón. Es lo suficientemente sencillo como para que los físicos hayan podido aplicar la física cuántica para calcular cómo ha de variar la masa del átomo con el movimiento orbital del electrón. Existe un límite inferior para la masa del átomo de hidrógeno, un valor en extremo minúsculo de 0,00000000000000000000000000000000002 kilogramos menos que la suma de las masas de un electrón y un protón cuando están muy alejados el uno del otro. No obstante, esa diferencia, si se transforma en energía, es muy relevante. Puedes preguntarle a cualquier químico o experimentar su efecto tú mismo si te sientas junto a ese hermoso fuego de carbón.

Los físicos de partículas son tan vagos como cualquiera, y no les gusta escribir números muy pequeños con montones de ceros y cifras decimales, por lo que normalmente no utilizan el kilogramo como unidad de masa. En su lugar emplean una unidad denominada electronvoltio, que en realidad sirve para medir energías. Un electronvoltio es la cantidad de energía que adquiere un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de un voltio. Parece algo enrevesado, y corremos el riesgo de volver a acabar cubiertos de polvo de tiza. En palabras más sencillas: si tienes una batería de 9 voltios y construyes con ella un pequeño acelerador de partículas, podrás proporcionarle 9 electronvoltios de energía a un electrón. El electronvoltio se convierte en masa dividiéndolo por c^2 (recuerda que $E = mc^2$). Utilizando este vocabulario, más apropiado, el límite inferior para la masa del átomo de hidrógeno es de 13,6 eV/c^2 menos que las masas del protón (938.272,013 eV/c^2) y del electrón (510,998 eV/c^2) juntas (1 eV es la abreviatura para una energía de 1 electronvoltio). Fíjate en que, al mantener un factor de c^2 «en las unidades», es fácil calcular la energía almacenada en un protón en reposo. Puesto que la energía se obtiene multiplicando la masa por c^2, ambos factores se cancelan entre sí y la energía es simplemente 938.272,013 eV.

Fíjate también en que la masa de un átomo de hidrógeno es menor, no mayor, que la suma de sus componentes. Es como si el átomo almacenase algún tipo de energía negativa. En este contexto, la energía negativa no tiene nada de extraño: «Energía negativa almacenada» significa simplemente que descomponer el átomo cuesta un esfuerzo, que suele denominarse «energía de enlace». El siguiente valor mínimo de la masa del átomo de hidrógeno es de 10,2 eV/c^2, menos que la suma de las masas de sus componentes.[9] El enigmático nombre de la teoría cuántica, sujeta con frecuencia a interpretaciones erróneas, proviene precisamente del hecho de que masas como estas toman valores discretos («cuantizados»). Por ejemplo, no existe un átomo de hidrógeno que tenga una masa 2 eV/c^2 mayor que el límite inferior. Este es todo el misterio de la palabra «cuántico». Las distintas masas corresponden de hecho a distintas órbitas de los electrones alrededor del núcleo atómico, que en el caso del hidrógeno está compuesto por un solo protón.

Dicho lo cual, hemos de ser muy cuidadosos al imaginarnos las órbitas de los electrones, porque en realidad no son como las de los planetas alrededor del Sol. En términos generales, en el átomo con la masa más pequeña de todas, el electrón se encuentra más próximo al protón que en el átomo cuya masa tiene el valor justo por encima del mínimo. El átomo de hidrógeno en el que el electrón está lo más cerca posible del protón, y cuya masa es la menor de todas las posibles, se dice que se encuentra en su «estado fundamental». Si se le proporciona la cantidad de energía apropiada, el electrón saltará a la siguiente órbita disponible y el átomo se volverá un poco más pesado, sencillamente porque se le ha añadido una pequeña cantidad de energía. En ese sentido, suministrar energía a un átomo es como tensar el muelle de una ratonera.

Todo esto nos lleva a plantearnos la siguiente pregunta: ¿cómo es que conocemos con tanto detalle el comportamiento de los átomos de hidrógeno? Desde luego, no será porque nos dedicamos a medir esas minúsculas diferencias de masa con básculas, ¿verdad? En el núcleo de la teoría cuántica se encuentra la denominada ecuación de ondas de Schrödinger, que podemos utilizar para predecir el valor de las masas. Dice la leyenda que Schrödinger descubrió la ecuación, una de las más importantes de la física moderna, durante una estancia en los Alpes con su amante en las Navidades de 1925. Lo que los libros de texto no suelen contar es cómo le explicó la situación a su mujer. Cabe suponer que su amante disfrutó de los frutos de su trabajo tanto como generaciones enteras de estudiantes de física que se saben su ecuación de memoria. El cálculo no es demasiado complicado para un átomo tan simple como el del hidrógeno, y ha hecho acto de presencia en innumerables hojas de exámenes universitarios desde entonces. Pero el hecho de que se puedan realizar los cálculos matemáticos tiene poco valor si no disponemos de las evidencias experimentales que los corroboren. Por suerte, es relativamente sencillo observar las consecuencias de la naturaleza cuántica de la estructura atómica. En la teoría cuántica existe una regla general que dice aproximadamente así: si se deja a su suerte, algo más pesado se transformará en algo más ligero, siempre que dicha transformación sea posible. No es tan difícil de entender: si el objeto se deja a su suerte, no es posible que se convierta en algo más pesado, puesto que no se le suministra energía, mientras que siempre cabe la posibilidad de que desprenda energía y se vuelva más ligero. Evidentemente, la tercera opción es que no haga nada y siga igual, cosa que a veces sucede. En el caso del átomo de hidrógeno, esto significa que la versión más pesada en algún momento se desprenderá de parte de su masa. Al hacerlo, emite una única partícula de luz, el fotón con el que nos hemos topado antes. Por ejemplo, un átomo de hidrógeno en el segundo estado menos pesado en un momento dado se transformará espontáneamente en un átomo en el estado menos pesado, debido a una variación en la órbita del electrón. El exceso de energía se expulsa mediante la emisión de un fotón.[10] También puede darse el proceso inverso. Un fotón que se encuentre en las proximidades del átomo puede ser absorbido por este, que saltará entonces a un estado de mayor masa, porque la energía absorbida hace que el electrón pase a una órbita más alta.

Quizá la forma más habitual de suministrar energía a los átomos sea calentándolos, lo que provoca que los electrones salten a órbitas más altas para después volver a saltar hacia abajo, emitiendo fotones al hacerlo (esta es la base física de las farolas de vapor de sodio). La energía que transportan estos fotones es igual a la diferencia de energía entre las órbitas, y, si fuésemos capaces de detectarlos, nos permitirían asomarnos directamente a la estructura de la materia. Por suerte, estamos detectándolos continuamente, porque nuestros ojos no son ni más ni menos que detectores de fotones, cuya energía se registra en forma de colores. El azul celeste de un mar tropical salpicado de islas, el amarillo jaspeado de las estrellas de Van Gogh y el color rojo que el hierro le da a tu sangre son el resultado de la medición directa que tus ojos realizan de la estructura cuantizada de la materia. La búsqueda del origen de los colores que emiten los gases calientes fue una de las razones que llevaron al descubrimiento de la teoría cuántica a principios del siglo XX. El nombre que hemos dado al gas del que están rellenos los globos de las fiestas de cumpleaños es nuestra manera de honrar los años que innumerables científicos dedicaron diligentemente a la cuidadosa observación de la luz emitida por casi cualquier sustancia. «Helio» proviene del término griego «helios», que significa «sol», porque la primera vez que se observó la traza de este átomo, por el astrónomo francés Pierre Janssen en 1868, fue en la luz proveniente de un eclipse solar. Así fue como se descubrió el helio en nuestra estrella antes de hacerlo en la Tierra. Hoy en día, para tratar de encontrar indicios de vida en mundos remotos, los astrónomos buscan la traza característica del oxígeno en la luz estelar que atraviesa las atmósferas de los planetas que se cruzan en su trayectoria desde las estrellas hasta nosotros. La espectroscopia, que es como se denomina esta rama de la ciencia, es una potente herramienta para la exploración del universo, tanto dentro como fuera de nuestro planeta.

Todos los átomos de la naturaleza poseen una torre de energías (o masas) característica, que depende de dónde se encuentran los electrones y, puesto que, salvo en el caso del hidrógeno, todos los átomos tienen más de un electrón, la luz que emiten cubre todos los colores del arco iris y va más allá, motivo por el que, en última instancia, nuestro mundo es tan colorido. La química es, a grandes rasgos, la parte de la ciencia que estudia lo que sucede cuando montones de átomos se aproximan entre sí (pero no demasiado). A medida que dos átomos de hidrógeno se acercan el uno al otro, los protones se repelen, puesto que ambos tienen carga positiva, pero la atracción entre el electrón de cada átomo y el protón del otro se sobrepone a esa repulsión. El resultado es que existe una configuración óptima en la que se forma un enlace entre ambos átomos, que forman una molécula de hidrógeno. Los átomos están ligados en el mismo sentido en que lo está el electrón que orbita alrededor del núcleo de un solo átomo de hidrógeno. El hecho de que estén ligados significa simplemente que es necesario «hacer un esfuerzo» para separarlos, que no es sino una manera imprecisa de decir que hace falta suministrar cierta cantidad de energía. Si necesitamos suministrar energía simplemente para romper la molécula, esta debe tener una masa menor que los dos átomos de hidrógeno originales, igual que la masa del átomo de hidrógeno es menor que la suma de las masas de sus componentes. En ambos casos, la energía de enlace se debe a la fuerza electromagnética de la que hemos hablado al principio del libro.

Como sabe cualquiera que haya tenido un profesor de química distraído en el instituto y haya pasado por un laboratorio de química con una caja de cerillas, las reacciones químicas a veces dan lugar a la producción de energía. Un fuego de carbón es un ejemplo perfecto y controlado; un pequeño impulso en forma de cerilla encendida hace que se libere energía de forma constante y durante horas. Mucho más espectacular es la explosión de un cartucho de dinamita, que libera una cantidad de energía similar que el fuego, pero lo hace mucho más rápido. La energía no proviene de la cerilla que prende el fuego o el cartucho, sino que está almacenada en los materiales que arden. La conclusión es que, si se libera alguna cantidad de energía, la masa total de los productos de la reacción ha de ser menor, en todos los casos, que la masa inicial.

Un último ejemplo puede servir para ilustrar la idea de la liberación de energía a través de reacciones químicas. Imagina que estamos en una habitación llena de moléculas de hidrógeno y de oxígeno. Deberíamos poder respirar perfectamente y, a primera vista, cabría pensar que es un lugar seguro y agradable, ya que para separar los dos átomos que componen una molécula de hidrógeno hace falta energía. Esto parece indicar que el hidrógeno molecular debería ser una sustancia estable. Sin embargo, se puede descomponer mediante una reacción química que genera una impresionante cantidad de energía: tan impresionante, de hecho, que el hidrógeno gaseoso es muy peligroso. Es altamente inflamable en contacto con el aire, pues un pequeño chispazo basta para desencadenar el desastre. Gracias al vocabulario que acabamos de aprender, podemos analizar el proceso con algo más de detalle. Supón que mezclamos un gas de moléculas de hidrógeno (dos átomos de hidrógeno ligados) con uno de moléculas de oxígeno (dos átomos de oxígeno ligados). Es muy posible que te ponga nervioso saber que la masa conjunta de dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno es mayor que la de dos moléculas de agua juntas, cada una de las cuales está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. En otras palabras, la masa de los cuatro átomos de hidrógeno y los dos átomos de oxígeno que al principio formaban parte de sendas moléculas es mayor que la de las dos moléculas de H_2O. El exceso de masa es de aproximadamente 6 eV/c^2. Las moléculas de hidrógeno y de oxígeno preferirán por lo tanto reorganizarse para formar dos moléculas de agua. La única diferencia será la configuración de los átomos (y sus correspondientes electrones). A primera vista, la energía que libera cada molécula es minúscula, pero en una habitación caben del orden de 10^{26} moléculas,[11] lo que se traduce en alrededor de 10 millones de julios de energía, más que suficientes para, como efecto colateral, reorganizar las moléculas que constituyen tu propio cuerpo. Por suerte, si tenemos cuidado evitaremos acabar carbonizados porque, aunque la masa de los productos finales es menor que la de los iniciales, es necesario algo de esfuerzo para colocarlos, a ellos y a sus electrones, en la configuración adecuada. Es parecido a tirar un autobús por un precipicio: hace falta empujar un poco para que empiece a caer, pero una vez que está en movimiento ya no hay forma de pararlo. Dicho lo cual, sería muy poco aconsejable encender una cerilla, cosa que proporcionaría energía más que suficiente para desencadenar el proceso de reorganización molecular que daría lugar a la producción de agua.

La liberación de energía química al reordenar átomos o de energía gravitatoria al reordenar objetos pesados (como, por ejemplo, enormes cantidades de agua en las centrales hidroeléctricas) es uno de los medios por los que nuestra civilización genera energía útil. También estamos desarrollando la capacidad de aprovechar los abundantes recursos en forma de energía cinética que la naturaleza pone a nuestra disposición. Cuando sopla el viento, acelera las moléculas de aire, y podemos convertir esa energía cinética descontrolada en energía útil si colocamos una turbina en su trayectoria. Las moléculas chocan con las palas de la turbina, lo que hace que pierdan velocidad al transmitir su energía cinética a la turbina, que empieza a rotar (por cierto, este es otro ejemplo de conservación del momento lineal). De esta forma, la energía cinética del viento se transforma en energía rotatoria de la turbina, que a su vez puede utilizarse para alimentar un generador. La manera de aprovechar la energía del mar es muy similar, con la salvedad de que, en este caso, la energía cinética que se transforma en energía útil es la de las moléculas de agua. Desde un punto de vista relativista, todas las formas de energía contribuyen a la masa. Imagina una caja gigante llena de pájaros volando. Podrías colocar la caja sobre una balanza y pesarla, lo que te permitiría inferir la masa total de los pájaros y la caja. Como los pájaros están volando, poseen energía cinética y, por consiguiente, la caja pesará un poquito más que si todos los pájaros estuviesen durmiendo.

La energía liberada mediante reacciones químicas ha sido la principal fuente de energía para nuestra civilización desde la época prehistórica. La cantidad de energía que puede liberarse a partir de una determinada cantidad de carbón, petróleo o hidrógeno viene determinada, al nivel más fundamental, por la intensidad de la fuerza electromagnética, ya que es esta fuerza la que fija la intensidad de los enlaces entre átomos y moléculas que se rompen y se recomponen en las reacciones químicas. Sin embargo, en la naturaleza existe otra fuerza con el potencial de proporcionar una cantidad mucho mayor de energía para una determinada cantidad de combustible, sencillamente porque es mucho más intensa.

En las profundidades del átomo se encuentra su núcleo, un conjunto de protones y neutrones que se mantienen unidos gracias al pegamento de la fuerza nuclear fuerte. Al estar pegados entre sí, cuesta un esfuerzo separar un núcleo, igual que los átomos que forman una molécula, y su masa es, por lo tanto, menor que la suma de las masas de los protones y neutrones individuales que lo componen. Trazando una analogía perfecta con lo que sucede en las reacciones químicas, podemos preguntarnos si es posible hacer que los núcleos interactúen entre sí de tal manera que esa diferencia de masa pueda emitirse en forma de energía útil. Romper los enlaces químicos y liberar la energía almacenada en los átomos puede ser tan sencillo como encender una cerilla, pero liberar la energía acumulada en un núcleo atómico es algo muy diferente. Suele ser complicado acceder a ella, para lo cual hacen falta normalmente ingeniosos aparatos. Aunque no siempre es así: en ocasiones, la energía nuclear se libera de forma natural y espontánea, con consecuencias inesperadas y extremadamente importantes para el planeta Tierra.

El uranio, un elemento pesado, tiene 92 protones y, en la más estable de sus formas que existen en la naturaleza, 146 neutrones. Esta variedad tiene una vida media de 4.500 millones de años, lo que significa que en ese tiempo la mitad de los átomos de un pedazo de uranio se habrán dividido espontáneamente y habrán dado lugar a elementos más ligeros (el más pesado de los cuales es el plomo), liberando energía en el proceso. En términos de $E = mc^2$, diremos que el núcleo de uranio se divide en dos núcleos más pequeños, cuya masa conjunta es algo menor que la del núcleo original. Esta pérdida de masa es la que se manifiesta como energía nuclear. El proceso por el cual un núcleo pesado se divide en dos más ligeros se denomina fisión nuclear. Junto con la forma del uranio que contiene 146 neutrones, también existe en la naturaleza otra menos habitual que consta de 143 neutrones, que se divide en una forma distinta del plomo, con una vida media de 704 millones de años. Estos elementos se pueden utilizar para medir con precisión la edad de rocas casi tan antiguas como la propia Tierra, que tiene unos 4.500 millones de años.

La técnica es de una hermosa sencillez. Existe un mineral llamado circonio cuya estructura cristalina, de forma natural, contiene uranio pero no plomo. Por lo tanto, se puede suponer que todo el plomo presente en el mineral proviene de la desintegración radiactiva del uranio, lo que permite medir con gran precisión la edad de la formación del circonio, con tan solo contar el número de núcleos de plomo que existen, conociendo la velocidad de desintegración del uranio. El calor que se genera durante la división del uranio también es muy importante para mantener la temperatura terrestre, y está detrás de la fuerza que mueve las placas tectónicas y da lugar a la creación de nuevas montañas. Sin este impulso, alimentado con energía nuclear, la tierra se desmoronaría en el mar como resultado de la erosión natural. No diremos más sobre la fisión nuclear. Ha llegado el momento de adentrarnos en el núcleo atómico y aprender un poco más sobre la energía que almacena y sobre el otro proceso importante que, de producirse, puede propiciar que se libere: la fusión nuclear.

Imaginemos dos protones (sin electrones a su alrededor esta vez, para eliminar la posibilidad de que se unan en una molécula de hidrógeno). Si los dejásemos a su suerte, saldrían disparados en direcciones opuestas, ya que ambos tienen una carga eléctrica positiva. Así pues, podríamos pensar que no tiene sentido acercar los protones entre sí. No obstante, supongamos que lo hiciésemos y veamos qué sucedería. Una forma de hacerlo sería lanzar un protón contra el otro a gran velocidad. La fuerza de repulsión entre los protones aumenta a medida que estos se acercan entre sí. De hecho, su intensidad se duplica cada vez que la distancia se reduce a la mitad. Parece, por tanto, que nuestros protones siempre estarían abocados a salir despedidos. Sin duda, eso sería lo que sucedería si la repulsión eléctrica fuese la única fuerza de la naturaleza. Pero esta debe competir con las fuerzas nucleares, fuerte y débil. Cuando los protones están tan cerca que casi se tocan sucede algo extraordinario (como los protones no son bolas macizas, podemos incluso imaginar que se superponen). No ocurre siempre, pero a veces, al acercar dos protones así, uno de ellos se transforma de manera espontánea en un neutrón y el exceso de carga eléctrica positiva (el neutrón, como su propio nombre indica, es eléctricamente neutro) se desprende en forma de una partícula llamada positrón. Los positrones son exactamente iguales que los electrones, salvo por el hecho de que tienen carga positiva. También se emite una partícula denominada neutrino. Comparados con el protón y el neutrón, cuyas masas son muy parecidas, el electrón y el neutrino son muy ligeros y se alejan rápidamente, dejando atrás al protón y al neutrón. Conocemos muy bien los detalles de este proceso de transmutación gracias a la teoría de las interacciones débiles, desarrollada por los físicos de partículas en la segunda mitad del siglo XX. En el capítulo siguiente veremos cómo funciona. Lo único que necesitas saber de momento es que el proceso puede suceder, y sucede. Al no existir entre ellos repulsión eléctrica, el protón y el neutrón pueden aproximarse bajo el influjo de la fuerza nuclear fuerte. Ligados de esta forma, un protón y un neutrón dan lugar a lo que se denomina un deuterón, y el proceso por el que un protón se transforma en un neutrón con la emisión de un positrón (o viceversa, con la emisión de un electrón, cosa que también es posible) se conoce como desintegración beta.

¿Cómo encaja todo esto con nuestra idea de energía? Los dos protones originales tienen cada uno una masa de 938,3 MeV/c^2. 1 MeV es igual a 1 millón de eV (la

«M» significa «mega», o «millón»). La conversión entre MeV/c^2 y kilogramos es bastante fácil: 938,3 MeV/c^2 corresponden a una masa de $1{,}673 \times 10^{-27}$ kilogramos.[12] Los dos protones originales tienen una masa conjunta de 1.876,6 MeV/c^2. El deuterón tiene una masa de 1.875,6 MeV/c^2, y el positrón y el neutrino se llevan la 1 MeV restante. De esta, alrededor de la mitad se invierte en crear el positrón, ya que su masa es aproximadamente ½ MeV/c^2 (los neutrinos casi no tienen masa). Por lo tanto, cuando dos protones se transforman en un deuterón, una parte relativamente minúscula (alrededor de 1/40 de un 1 por ciento) de la masa total se destruye y se transforma en la energía cinética del positrón y del neutrino.

Juntar dos protones para crear un deuterón es una manera de liberar la energía asociada a la fuerza nuclear fuerte, y constituye un ejemplo de fusión nuclear. El término «fusión» se utiliza para describir cualquier proceso que libere energía como resultado de la unión de dos o más núcleos. A diferencia de la energía que se libera en una reacción química, que se debe a la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear fuerte genera una enorme energía de enlace nuclear. Compara, por ejemplo, el ½ MeV que se libera cuando se forma un deuterón con los 6 eV liberados en la explosión del hidrógeno y el oxígeno. Conviene recordar lo siguiente: la energía que se libera en una reacción nuclear es normalmente un millón de veces mayor que la correspondiente a una reacción química. El motivo por el que la fusión no está presente en absoluto en nuestra experiencia cotidiana aquí en la Tierra es que, como la fuerza nuclear fuerte únicamente opera a distancias cortas, solo entra en acción cuando los componentes están muy cerca unos de otros y decae enseguida para distancias muy superiores a un femtómetro (que es aproximadamente el tamaño del protón). Pero no es fácil acercar protones a esa distancia, debido a su repulsión electromagnética. Una forma de conseguirlo requiere que los protones se muevan a velocidades extremadamente altas, lo que a su vez implica temperaturas muy elevadas, ya que la temperatura es básicamente una medida de la velocidad media de las cosas; las moléculas en una taza de té caliente se agitan más que las de una jarra de cerveza fría. Para que dé comienzo la fusión es necesario alcanzar una temperatura de al menos unos 10 millones de grados, aunque es preferible que sea mucho más alta. Por suerte para nosotros, existen lugares en el universo donde las temperaturas alcanzan, e incluso superan, los valores necesarios para la fusión nuclear: el interior de los núcleos de las estrellas.

Retrocedamos en el tiempo a la edad media cósmica, menos de 500 millones de años tras el big bang, cuando el universo solo contenía hidrógeno, helio y pequeñas cantidades de los elementos químicos más ligeros. Lentamente, a medida que continuaba la expansión del universo, los gases primigenios empezaron a condensarse en cúmulos bajo el influjo de la gravedad, que se aceleraban a medida que se iban acercando unos a otros, como este libro se aceleraría hacia el suelo si lo dejases caer. Que el helio y el hidrógeno se moviesen cada vez más rápido significaba que estaban cada vez más calientes, por lo que las grandes bolas de gas se volvieron aún más calientes y densas. A una temperatura de unos 10.000 grados, los electrones abandonan sus órbitas alrededor de los núcleos, dejando tras ellos un gas de protones y neutrones denominado plasma. Electrones y protones siguen cayendo juntos de manera inexorable, cada vez más rápido, en un colapso continuamente acelerado. El plasma escapa a esta caída en apariencia inevitable cuando, al alcanzar los 10 millones de grados, sucede algo muy importante, algo que transforma la ardiente bola de protones y electrones en la luz y la vida del universo, una espléndida fuente de energía nuclear: una estrella. Los protones individuales se fusionan en deuterones, que a su vez se fusionan con otros protones para producir helio, liberando en cada paso valiosa energía de enlace. Así, la nueva estrella transforma lentamente una pequeña parte de su masa original en energía, lo que hace que su núcleo se caliente y le permite detener y resistir el colapso gravitatorio, al menos durante unos pocos miles de millones de años, durante los cuales los planetas fríos y rocosos se mantienen calientes, el agua fluye, los animales evolucionan y las civilizaciones emergen.

Nuestro Sol es una estrella que se encuentra actualmente en una plácida fase intermedia de su vida: está quemando hidrógeno y generando helio. Durante este proceso, pierde 4 millones de toneladas de masa cada segundo de cada día de cada milenio, al transformar 600 millones de toneladas de hidrógeno en helio cada segundo. Este despilfarro, del que depende nuestra existencia, no puede continuar indefinidamente, ni siquiera en nuestra propia bola de plasma, un millón de veces más grande que la Tierra. ¿Qué sucede entonces cuando se agota el suministro de hidrógeno en el núcleo de una estrella? Sin la fuente de presión nuclear hacia el exterior, la estrella empezará de nuevo a colapsar sobre sí misma, y al hacerlo se irá calentando. En un momento dado, a una temperatura de unos 100 millones de grados, el helio comienza a arder y el colapso se detiene de nuevo. Estamos utilizando el verbo «arder», pero eso no es muy preciso. Lo que en realidad queremos decir es que tiene lugar la fusión nuclear y que la masa neta de los productos finales es menor que la masa del material original que se fusiona. La pérdida de masa da lugar a la producción de energía, según $E = mc^2$.

El proceso de combustión del helio es digno de verse en detalle. Cuando se fusionan dos núcleos de helio, dan lugar a una determinada forma de berilio, el berilio 8, compuesta por cuatro protones y cuatro neutrones y que solo vive una diezmillonésima de milmillonésima de segundo antes de descomponerse de nuevo en dos núcleos de helio. La vida del berilio 8 es tan fugaz que la probabilidad de que tenga tiempo de fusionarse con cualquier otra cosa es muy reducida. De hecho, sin ayuda externa, eso es exactamente lo que sucedería siempre, lo que impediría la progresión hacia la síntesis de elementos más pesados en el interior de las estrellas. En 1953, cuando apenas se empezaba a comprender la física nuclear de las estrellas, el astrónomo Fred Hoyle se dio cuenta de que el carbono tenía que haberse formado en su interior, con independencia de lo que dijesen los físicos teóricos, pues estaba firmemente convencido de que no podía haberse creado en ningún otro lugar del universo. Junto a su sagaz observación de que los astrónomos existen, propuso que esto solo sería posible si existía a su vez un tipo de núcleo de carbono ligeramente más pesado, que se habría formado tras un proceso de fusión muy eficiente entre el fugaz berilio 8 y un tercer núcleo de helio. Hoyle calculó que, para que su teoría funcionase, el carbono pesado debía tener una masa 7,7 MeV/c^2 mayor que el carbono normal. Una vez que esta nueva forma del carbono se hubiese creado en la estrella, el camino hacia los elementos más pesados quedaba despejado. En esa época no se conocía ninguna forma del carbono como la que proponía, pero, espoleados por las predicciones de Hoyle, los científicos no tardaron ni un instante en empezar a buscarla. Apenas días después de que Hoyle hiciese su predicción, los físicos nucleares del laboratorio Kellogg del Instituto de Tecnología de California (Caltech) la confirmaron sin ningún género de dudas. Es una historia extraordinaria, en buena medida porque asienta nuestra confianza en la idea que tenemos de cómo funcionan las estrellas: no hay mejor justificación de una bella teoría que la verificación experimental de una de sus predicciones.

Hoy en día disponemos de muchas más evidencias que respaldan la teoría de la evolución estelar. Encontramos un ejemplo llamativo en el estudio de los neutrinos que se producen cada vez que un protón se transforma en un neutrón en el proceso de fusión. Los neutrinos son partículas fantasmagóricas que apenas interactúan con nada y, por eso mismo, la mayoría de ellos salen despedidos del Sol en cuanto se producen, sin ningún impedimento. De hecho, el flujo de neutrinos es tal que, cada segundo, alrededor de 100.000 millones atraviesan cada centímetro cuadrado de la Tierra. Es fácil leerlo, pero cuesta imaginarlo. Levanta la mano y mírate la uña del dedo pulgar. Cada segundo, la atraviesan 100.000 millones de partículas subatómicas provenientes del núcleo de nuestra estrella. Por suerte para nosotros, y de hecho para la Tierra en su conjunto, es como si no existiesen. No obstante, muy de vez en cuando, un neutrino interactúa, y el truco consiste en construir experimentos capaces de detectar estos eventos tan poco frecuentes. El experimento Super-Kamiokande, en las profundidades de la mina Mozumi, cerca de la ciudad de Hida, en Japón, es uno de ellos. Super-Kamiokande es un enorme cilindro de 40 metros de diámetro y otros 40 de altura, que contiene 50.000 toneladas de agua pura y está rodeado por más de 10.000 tubos fotomultiplicadores capaces de detectar los destellos de luz muy tenues que se producen cuando un neutrino choca con un electrón en el agua. Como resultado, el experimento es capaz de «ver» los neutrinos que llegan desde el Sol, y el número que detecta coincide con el esperado, que se basa en la teoría según la cual son el resultado de procesos de fusión en el interior del Sol.

Llegará un momento en que a la estrella se le agote el suministro de helio y comience a colapsarse aún más. Cuando la temperatura de su núcleo supere los 500 millones de grados, será posible la combustión del carbono, lo que producirá toda una variedad de elementos más pesados, hasta llegar al hierro. Tu sangre es roja porque contiene hierro, el punto final de los procesos de fusión que tienen lugar en el núcleo de las estrellas. Los elementos más pesados que el hierro no se pueden crear mediante fusión en el núcleo, porque esta sigue una ley de rendimientos decrecientes y los núcleos más pesados que el del hierro no liberarían energía al fusionarse con otros núcleos. Dicho de otro modo, añadir protones o neutrones a un núcleo de hierro solo hará que sea más pesado (no más ligero, como tendría que ser para que la fusión actuase como fuente de energía). Los núcleos más pesados que el del hierro prefieren en cambio desprenderse de protones o neutrones, como hemos visto antes para el uranio. En estos casos, la suma total de las masas de los productos es menor que la masa del núcleo inicial y, por lo tanto, cuando un núcleo pesado se divide se libera energía. El hierro es el caso particular que se sitúa entre ambas situaciones, lo que significa que es extraordinariamente estable.

Como no dispone de ninguna otra fuente de energía que pueda evitar lo inevitable, una estrella cuyo núcleo es rico en hierro se encuentra en realidad en el punto de no retorno, y la gravedad retoma su implacable tarea. A la estrella solo le queda una última oportunidad de escapar al colapso definitivo. Se vuelve tan densa que, como consecuencia del principio de exclusión de Pauli, los electrones que habían estado circulando libremente desde que fueron arrancados de los átomos de hidrógeno durante su nacimiento se resisten a seguir compactándose. Este es un principio importante dentro de la teoría cuántica, crucial para la estabilidad y estructura de los átomos. En pocas palabras, afirma que existe un límite a partir del cual los

electrones no se pueden comprimir más. En una estrella densa, los electrones ejercen una presión hacia fuera que aumenta a medida que la estrella se colapsa, llegando a tener la fuerza suficiente para contrarrestar el hundimiento gravitatorio. Una vez que esto sucede, la estrella queda atrapada en un estado disminuido pero extraordinariamente duradero. No tiene combustible que gastar (esa es la razón por la que se estaba colapsando) y la presión de los electrones evita que siga hundiéndose. Este tipo de estrella se llama enana blanca —un monumento en honor de una majestuosidad irremediablemente mermada y que se desvanece con lentitud—, el brillante lugar donde tiempo atrás se crearon los elementos de la vida, cuyos restos han quedado reducidos al tamaño de un planeta pequeño. En un futuro mucho más lejano que la edad actual del universo, las enanas blancas se habrán enfriado tanto que llegarán a desvanecerse. Esto nos recuerda las hermosas reflexiones del padre de la teoría del big bang, Georges Lemaître, al pensar sobre el inexorable viaje universal de la luz a las tinieblas, del que ni siquiera las estrellas podrán escapar: «La evolución del universo se asemeja a un espectáculo de fuegos artificiales que acaba de terminar: unos pocos vestigios luminosos, cenizas y humo. Desde un frío cúmulo de cenizas, contemplamos cómo los soles se desvanecen mientras tratamos de rememorar el brillo desaparecido del origen de los mundos».
A lo largo de este libro hemos pretendido explicar con detalle por qué las cosas son como son y proporcionar argumentos y evidencias mientras avanzábamos. La descripción que aquí ofrecemos de cómo funciona una estrella puede parecer caprichosa, y no cabe duda de que nos hemos alejado de nuestro estilo riguroso y expositivo. Podrías incluso objetar que, puesto que no es posible realizar experimentos de laboratorio directamente con estrellas, no se sabe a ciencia cierta cuál es su funcionamiento. Pero esta no es la razón de nuestra parquedad. Si no nos hemos extendido más es porque entrar en detalles nos habría desviado demasiado de nuestro camino. El extraordinario trabajo de Hoyle y el éxito de experimentos como el Super-Kamiokande tendrán que bastar como evidencia, junto con una última predicción del físico indio Subrahmanyan Chandrasekhar. A principios de la

década de 1930, provisto únicamente de la física establecida, predijo que debía existir un límite superior para cualquier estrella enana blanca (que no rotase sobre sí misma). Chandrasekhar estimó en un primer momento que este límite era de aproximadamente una masa solar (es decir, la masa del Sol), y cálculos más refinados condujeron tiempo después a un valor de 1,4 masas solares. En la época en que Chandrasekhar publicó sus trabajos, solo se habían observado unas pocas enanas blancas. Hoy en día, este número asciende a unas 10.000, cuya masa es normalmente del orden de la del Sol. Ni una sola de ellas tiene una masa superior al valor máximo de Chandrasekhar. Una de las mayores alegrías que la física nos proporciona es la de comprobar cómo leyes descubiertas en experimentos de sobremesa, en la penumbra del laboratorio en la Tierra, tienen validez a lo largo y ancho del universo, y Chandrasekhar aprovechó esta universalidad para hacer su predicción, por la que recibió el premio Nobel en 1983. La confirmación de su predicción es una de las evidencias que permiten a los físicos tener una gran confianza en que entienden realmente cómo funcionan las estrellas.

¿Comparten todas las estrellas el destino de acabar convertidas en enanas blancas? El párrafo anterior parece indicar que es así, pero lo cierto es que solo cuenta parte de la historia, y da una pista de cuál es la situación real. Si no puede existir una enana blanca cuya masa supere 1,4 veces la del Sol, ¿qué les sucede a las estrellas que sí la superan? Aparte de la posibilidad de que las estrellas grandes se desprendan de parte de su material para evitar superar el límite de Chandrasekhar, el destino les depara dos alternativas. En ambos casos, una gran masa inicial implica que, a medida que el colapso avanza, los electrones en algún momento empezarán a agitarse a velocidades próximas a la de la luz. Una vez que eso sucede, ya no cabe otra posibilidad: su presión nunca será suficiente para contrarrestar la fuerza gravitatoria. Para estas estrellas masivas, el estadio siguiente es una estrella de neutrones, en la que la fusión nuclear vuelve a entrar en acción por última vez. Los protones y los neutrones se mueven tan rápido que llega un momento en que su energía es suficiente para iniciar la fusión entre protón y electrón, dando lugar a un neutrón. Es la reacción opuesta al proceso de desintegración beta, en el cual un neutrón se descompone espontáneamente en un protón y un electrón, con la emisión de un neutrino. De esta manera, todos los protones y los electrones se transforman progresivamente en neutrones, y la estrella acaba convertida en una gran bola de neutrones. La densidad de una estrella de neutrones es extraordinaria: una pequeña cucharada de materia de la estrella pesa más que una montaña. Son más masivas que el Sol, aunque apenas ocupan el tamaño de una ciudad.[13] Muchas de las estrellas de neutrones que conocemos giran a velocidades asombrosas, emitiendo al espacio haces de radiación cual faros cósmicos. Estas estrellas, auténticas maravillas del universo, se denominan púlsares. Algunos de los púlsares conocidos tienen masas que casi doblan la del Sol, diámetros de tan solo 20 kilómetros, y dan más de 500 vueltas por segundo. Imagina la violencia de las fuerzas que deben existir en objetos como esos. Hemos descubierto maravillas que van más allá de nuestra imaginación.

Más allá de las estrellas de neutrones, un destino final espera a las estrellas más grandes. Igual que los electrones pueden alcanzar velocidades próximas a la de la luz en las enanas blancas, los neutrones que componen una estrella de neutrones pueden toparse con el límite que impuso Einstein. Cuando esto ocurre, no existe fuerza conocida capaz de evitar el colapso total, y la estrella acabará dando lugar a un agujero negro. A día de hoy, el conocimiento que tenemos de la física del espacio y el tiempo dentro de un agujero negro es incompleto. Como veremos en el capítulo final, la presencia de la masa hace que el espacio-tiempo se curve, distanciándose del espacio-tiempo de Minkowski que ya conocemos, y, en el caso de un agujero negro, esta curvatura es tal que ni siquiera la luz puede escapar de sus garras. En entornos tan extremos, las leyes de la física tal y como las conocemos en la actualidad dejan de tener validez. Uno de los grandes retos a los que ha de hacer frente la ciencia del siglo XXI es precisamente el de encontrar la manera de seguir progresando, ya que solo entonces podremos contar la historia de las estrellas de principio a fin.

Capítulo 7
El origen de la masa

El descubrimiento de $E = mc^2$ supuso un punto de inflexión en la manera que los físicos tenían de ver la energía, ya que nos enseñó que existe una enorme cantidad de energía almacenada en el interior de la propia masa. Es una cantidad muchísimo mayor de lo que nadie había osado imaginar: la energía que contiene la masa de un solo protón es casi mil millones de veces superior a la que se libera en una reacción química típica. A primera vista, parece que hemos dado con la solución para los problemas energéticos del mundo y, en cierta medida, puede que a largo plazo así sea. Pero con una importante salvedad: es muy difícil destruir la masa por completo. En una central eléctrica de fisión nuclear, únicamente se destruye una fracción muy pequeña del combustible original; el resto se transforma en elementos más ligeros, algunos de los cuales constituyen residuos altamente tóxicos. Incluso en el interior del Sol, los procesos de fusión son extraordinariamente poco efectivos a la hora de convertir masa en energía, y esto no se debe solo a que la proporción de masa que se destruye sea muy pequeña: la probabilidad de que tenga lugar la fusión de un protón en particular es extremadamente baja, porque el paso inicial de convertir un protón en un neutrón es extraordinariamente poco habitual (tanto que, de hecho, un protón en el núcleo del Sol tarda de media alrededor de 5.000 millones de años en fusionarse con otro protón para dar lugar a un deuterón, desencadenando así la liberación de energía). En realidad, el proceso ni siquiera llegaría a producirse nunca de no ser porque a escalas tan pequeñas la teoría cuántica es soberana: en la imagen del mundo anterior a la cuántica, la temperatura del Sol no era suficiente como para comprimir a los protones tanto como para que la fusión tuviese lugar (debería haber estado unas 1.000 veces más caliente que la temperatura actual de su núcleo, de unos 10 millones de grados). Cuando el físico británico *sir* Arthur Eddington propuso por primera vez, en 1920, la hipótesis de que la fusión era la fuente de la energía del Sol, enseguida se le planteó esta posible objeción a su teoría. Sin embargo, Eddington estaba convencido de que la fusión del hidrógeno para dar helio era la fuente de energía, y confiaba en que se tardaría poco en resolver el enigma de la temperatura. «El helio que manejamos se ha tenido que crear en algún momento y en algún lugar —dijo—. No buscamos llevarle la contraria a quien argumenta que las estrellas no tienen la temperatura suficiente para este proceso, pero sí le sugerimos que busque un lugar más caliente».

La conversión de protones en neutrones es tan laboriosa que, «kilogramo por kilogramo», el Sol es varios miles de veces menos eficiente que el cuerpo humano a la hora de transformar masa en energía. Un kilogramo del Sol genera de media únicamente 1/5.000 vatios de potencia, mientras que el cuerpo humano suele generar algo más de 1 vatio por kilogramo. Evidentemente, el Sol es muy grande, cosa que compensa más que de sobra su relativa ineficiencia.

Como no nos hemos cansado de repetir a lo largo del libro, la naturaleza se rige por leyes. No tiene mucho sentido entusiasmarse demasiado con una ecuación que solo nos dice, como $E = mc^2$, lo que podría suceder. Hay una enorme diferencia entre nuestra imaginación y lo que en realidad ocurre y, aunque nos fascinen las posibilidades que $E = mc^2$ nos ofrece, debemos saber cuál es el proceso por el que las leyes de la física permiten que se destruya la masa y se libere la energía. Desde luego, la ecuación por sí sola no implica necesariamente que tengamos la posibilidad de transformar masa en energía a nuestro antojo.

Uno de los asombrosos avances de la física en el último siglo ha sido la constatación de que, en apariencia, bastan unas pocas leyes para explicar prácticamente toda la física, al menos en principio. Eso mismo fue lo que creyó que había logrado Newton cuando, a finales del siglo XVII, escribió sus leyes del movimiento. Y durante los doscientos años siguientes escasearon las evidencias científicas que le llevasen la contraria. Newton, más bien modesto a ese respecto, dijo una vez: «Era como un niño jugando a la orilla del mar, distraído constantemente con una piedra más pulida o una concha más hermosa de lo habitual, mientras que el gran océano de la verdad permanecía ante mí, aún por descubrir». Estas frases reflejan perfectamente el asombro y la humildad que la práctica de la física puede provocar. Frente a la belleza de la naturaleza, parece innecesario, por no decir ridículo, pretender que hemos descubierto la teoría definitiva. A pesar de lo apropiado de esta modestia filosófica respecto a la empresa científica, la visión del mundo después de Newton afirmaba que todas las cosas estaban compuestas por pequeñas partes que obedecían fielmente las leyes de la física que Newton había articulado. Nadie negaba que quedaban aún por resolver varias cuestiones en apariencia menores: ¿cómo se mantienen unidas las cosas entre sí en realidad? ¿De qué están compuestas realmente esas pequeñas partes? Pero poca gente dudaba de que la teoría de Newton fuese el centro de todo, y que solo era cuestión de ir completando los detalles. Sin embargo, a lo largo del siglo XIX se fueron observando nuevos fenómenos cuya explicación contradecía a Newton, y que acabarían dando pie a la relatividad de Einstein y a la teoría cuántica. Newton fue derrocado, o, para ser más exactos, sus ideas pasaron a considerarse una aproximación de una visión más precisa de la naturaleza y, cien años más tarde, henos aquí de nuevo, ignorando tal vez las lecciones del pasado y afirmando que disponemos de una teoría de (casi) todos los fenómenos naturales. Es muy posible que nos equivoquemos de nuevo, lo cual no sería malo. Merece la pena recordar una vez más que la historia con frecuencia ha demostrado no solo que la arrogancia científica es absurda, sino también lo perjudicial que ha sido y probablemente será siempre para el intelecto humano la pretensión de que sabemos lo suficiente, no digamos ya todo lo que hay que saber, sobre el funcionamiento de la naturaleza. En una conferencia que ofreció en 1810, Humphry Davy lo expresó magníficamente: «Nada hay tan perjudicial para el progreso de la mente humana como suponer que nuestra visión de la ciencia es definitiva; que ya no existen misterios por descubrir en la naturaleza; que nuestras victorias son completas; que no quedan nuevos mundos por conquistar».

Puede que toda la física que conocemos no sea más que la punta del iceberg, como también es posible que nos estemos aproximando realmente a una «teoría del todo». Sea como sea, lo cierto es que disponemos de una teoría que, gracias al concienzudo trabajo de miles de científicos de todo el mundo, se ha demostrado que permite explicar una amplia variedad de fenómenos. Es una teoría cuya capacidad de unificación resulta asombrosa, y cuya ecuación central cabe en una servilleta.

$$\begin{aligned} L = & -\tfrac{1}{4} W_{\mu\nu} W^{\mu\nu} - \tfrac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \tfrac{1}{4} G_{\mu\nu} G^{\mu\nu} \\ & + \overline{\psi}_j \gamma^\mu \left(i\partial_\mu - g\tau_j \cdot W_\mu - g' Y_j B_\mu - g_s \mathbf{T}_j \cdot \mathbf{G}_\mu \right) \psi_j \\ & + |D_\mu \phi|^2 + \mu^2 |\phi|^2 - \lambda |\phi|^4 \\ & - (y_j \overline{\psi}_{jL} \phi \psi_{jR} + y'_j \overline{\psi}_{jL} \phi_c \psi_{jR} + \text{conjugado} \end{aligned}$$

Ecuación 7.1

Nos referiremos a esta ecuación central como la ecuación maestra, que constituye el núcleo de lo que se conoce como modelo estándar de la física de partículas. Aunque es poco probable que, a primera vista, la ecuación les diga algo a la mayoría de nuestros lectores, no podemos resistirnos a reproducirla aquí.

Evidentemente, solo los físicos profesionales entenderán en detalle qué es lo que representa la ecuación, pero no es a ellos a quienes se la queremos enseñar. En primer lugar, queríamos mostrar una de las ecuaciones más maravillosas de la física (enseguida dedicaremos un rato a explicar por qué es tan maravillosa). Pero también es posible hacerse una idea de qué es lo que representa simplemente hablando sobre los símbolos sin tener ningún conocimiento de matemáticas. Para entrar en calor, empezaremos describiendo el alcance de la ecuación maestra: ¿cuál es su función? ¿Para qué sirve? Su función es especificar las reglas según las cuales interactúan entre sí dos partículas cualesquiera en cualquier lugar del universo. La única excepción es que, por desgracia, no permite dar cuenta de la gravedad. A pesar de esta limitación, su alcance sigue siendo admirablemente ambicioso. Haber llegado a deducir la ecuación maestra constituye sin duda uno de los grandes logros de la historia de la física.

Aclaremos a qué nos referimos con la interacción entre dos partículas. Queremos decir que, como consecuencia de esta interacción, algo le sucede al movimiento de las partículas. Por ejemplo, dos partículas pueden dispersarse mutuamente, cambiando de dirección al hacerlo. O pueden también orbitar la una alrededor de la otra, atrapándose recíprocamente en lo que los físicos denominan un «estado ligado». Un átomo es un ejemplo de ello y, en el caso del hidrógeno, un solo electrón y un solo protón están ligados según las reglas que establece la ecuación maestra. La ecuación maestra incorpora las reglas para calcular la energía de enlace de un átomo, molécula o núcleo atómico, de la que tanto hemos oído hablar en el capítulo anterior. En cierto sentido, conocer las reglas del juego significa que estamos describiendo la forma en que opera el universo a un nivel muy fundamental. ¿Cuáles son entonces esas partículas de las que están compuestas todas las cosas, y cómo interactúan entre ellas?

El modelo estándar parte de la existencia de la materia. Para ser más precisos, supone la existencia de seis tipos de «quarks», tres clases de «leptones cargados», entre los que se cuenta el electrón, y tres tipos de «neutrinos». Puedes ver cuáles son las partículas de materia que aparecen en la ecuación maestra: se representan mediante el símbolo ψ (que se pronuncia «psi»). Para cada partícula debe existir también la antipartícula correspondiente. La antimateria no es ciencia ficción, sino que es uno de los componentes necesarios del universo. El físico teórico británico Paul Dirac fue el primero en constatar, a finales de la década de 1920, la necesidad de la antimateria, al predecir la existencia de un compañero del electrón llamado positrón, que debía tener exactamente la misma masa, pero una carga eléctrica opuesta. Ya nos hemos topado con los positrones, como subproductos del proceso por el que dos protones se fusionan para dar lugar a un deuterón. Una de las características más convincentes de una teoría científica válida es su capacidad para predecir algo que nunca antes se haya visto. La posterior observación de ese «algo» en un experimento proporciona una evidencia concluyente de que hemos comprendido algo real sobre el funcionamiento del universo. Llevando este argumento un poco más allá, cuantas más predicciones sea capaz de ofrecer una teoría, más impresionados deberíamos estar si los experimentos la confirman. En sentido contrario, si los experimentos no encuentran ese «algo» que cabía esperar, la teoría no puede ser correcta y hemos de abandonarla. En esta tarea intelectual no cabe la discusión: el experimento tiene la última palabra. El momento de gloria de Dirac llegó apenas unos años después, cuando Carl Anderson, utilizando rayos cósmicos, realizó la primera observación directa de los positrones. Dirac compartió el premio Nobel de 1933, que Anderson también logró en 1936. Aunque el positrón pueda parecer muy esotérico, se utiliza habitualmente en los hospitales de todo el mundo. Los escáneres PET (siglas de Positron Emission Tomography, «tomografía por emisión de positrones») utilizan positrones para permitir a los médicos recrear mapas tridimensionales del cuerpo humano. Parece poco probable que Dirac tuviese en mente sus aplicaciones médicas cuando trataba de dar forma a la idea de la antimateria. Una vez más, se pone de manifiesto lo útil que puede ser entender cuáles son los mecanismos internos del universo.

Hay otra partícula cuya existencia se presume, aunque nos precipitaríamos si la mencionásemos a estas alturas. Se representa mediante el símbolo griego φ (que se pronuncia «fi») y su presencia puede sentirse en las líneas tercera y cuarta de la ecuación maestra. Salvo por esta «otra partícula», todos los quarks, leptones y neutrinos (y sus respectivas partículas de antimateria) se han detectado en los experimentos. Evidentemente, no han sido ojos humanos los que las han visto, sino detectores de partículas, similares a cámaras de alta resolución que permiten captar imágenes de las partículas elementales durante sus fugaces existencias. Muy a menudo, el hecho de detectar alguna de ellas ha venido acompañado de un premio Nobel. La última en descubrirse fue el neutrino tau, en el año 2000. Este misterioso primo de los neutrinos electrónicos que fluyen desde el Sol como consecuencia del proceso de fusión completó el conjunto de las doce partículas de materia conocidas. Los quarks más ligeros, que forman los neutrones y los protones, se denominan up («arriba») y down («abajo»). Los protones están compuestos básicamente por dos quarks up y un quark down, mientras que los neutrones están formados por dos quarks down y un quark up. La materia ordinaria está formada por átomos, que a su vez constan de un núcleo atómico compuesto por protones y neutrones, rodeado, a una distancia relativamente grande, por electrones. Por lo tanto, los quarks up y down, junto con los electrones, son las partículas que más abundan en la materia ordinaria. Por cierto, los nombres de las partículas carecen por completo de significado técnico. El físico estadounidense Murray Gell-Mann tomó la palabra «quark» de *Finnegan's Wake*, una novela del escritor irlandés James Joyce. Gell-Mann necesitaba tres quarks para poder explicar las partículas que se conocían en esa época, y este breve pasaje de Joyce le pareció apropiado:

Tres quarks para Muster Mark!
Seguro que no tiene una gruesa corteza,
y seguro que la que tiene le sirve de bien poco.

Gell-Mann ha explicado que su idea original era que la palabra se pronunciase «cuorc», y de hecho ya tenía ese sonido en mente cuando se topó con la cita de *Finnegan's Wake*. Puesto que, en el original en inglés, «quark» ha de rimar con «Mark» y «bark» («corteza»), esto resultó algo problemático. Gell-Mann optó entonces por argumentar que la palabra podía significar «cuarto» («quart»), una unidad de volumen de líquidos, en lugar de su sentido más habitual, que es el de «graznido de gaviota», lo que le permitió mantener la pronunciación original. Quizá nunca lleguemos a saber cómo debería pronunciarse. El descubrimiento de tres quarks adicionales, que culminó en 1995 con el del quark top («cima»), ha hecho que la etimología de la palabra sea aún menos precisa, y podría servir de lección para los físicos que en el futuro sientan la tentación de buscar oscuras referencias literarias para dar nombre a sus hallazgos.

A pesar de los problemas con el nombre, la hipótesis de Gell-Mannde que los protones y los neutrones están compuestos por objetos más pequeños se confirmó cuando un acelerador de partículas en Stanford, en California, detectó finalmente los quarks en 1968, cuatro años después de la predicción teórica. Tanto Gell-Mann como los físicos que obtuvieron la evidencia experimental recibieron el premio Nobel por sus trabajos.

Aparte de las partículas de materia de las que acabamos de hablar, y del misterioso φ, existen otras partículas que debemos mencionar. Son las partículas *W* y *Z*, el fotón y el gluón, responsables de las interacciones entre todas las demás partículas. Sin ellas, los objetos no interaccionarían entre sí, y el universo sería entonces un lugar tremendamente aburrido. Se dice que su tarea es la de transportar la fuerza de las interacciones entre las partículas de materia. El fotón es la partícula encargada de comunicar la fuerza entre las partículas con carga eléctrica, como los electrones y los quarks. Puede decirse que forma la base de toda la física que descubrieron Faraday y Maxwell y, además, constituye la luz visible, las ondas de radio, de infrarrojo y de microondas, y los rayos X y gamma. Es perfectamente correcto imaginar que una bombilla emite un haz de fotones, que rebota en la página del libro y fluye hasta tus ojos, que no son más que sofisticados detectores de fotones. Un físico diría que la fuerza electromagnética está mediada por el fotón. La presencia del gluón no es tan habitual en nuestra vida diaria como la del omnipresente fotón, pero no por ello su papel es menos importante. En el interior de cada átomo se encuentra el núcleo atómico, una bola de carga eléctrica positiva (recuerda que los protones poseen carga eléctrica, pero los neutrones no), en el que, como sucede cuando tratas de juntar los polos iguales de dos imanes, los protones se repelen entre sí debido a la fuerza electromagnética. Aunque no les gusta estar juntos, y preferirían salir disparados en distintas direcciones, por suerte no es eso lo que sucede, y los átomos sí existen. El gluón es el intermediario de la fuerza que mantiene los protones «pegados» en el interior del núcleo, de ahí su ridículo nombre,[14] y también se encarga de mantener unidos los quarks que componen los protones y los neutrones. La intensidad de esta fuerza debe ser superior a la de la repulsión electromagnética entre los protones, y por esa razón se denomina fuerza fuerte. Desde luego, no nos estamos cubriendo de gloria al poner nombres.

En el contexto de este libro, podemos tratar conjuntamente las partículas *W* y *Z*. Sin ellas, las estrellas dejarían de brillar. En concreto, la partícula *W* es la encargada de la interacción que transforma un protón en un neutrón durante la formación del deuterón en el núcleo solar. Convertir protones en neutrones (y viceversa) no es lo único que hace la fuerza débil. También es la responsable de cientos de interacciones distintas entre las partículas elementales de la naturaleza, muchas de las cuales se estudian en experimentos como los que se llevan a cabo en el CERN. Salvo porque se encargan de hacer que el Sol brille, la presencia del *W* y del *Z* es tan poco evidente en nuestra vida cotidiana como la del gluón. Los neutrinos solo interactúan a través de las partículas *W* y *Z*, lo que hace que sean realmente escurridizos. Como hemos visto en el capítulo anterior, miles de millones de ellos atraviesan tu cabeza cada segundo sin que sientas nada, porque la fuerza que transmiten las partículas *W* y *Z* es extremadamente débil. Ya habrás adivinado que ese es precisamente su nombre.

Hasta ahora hemos hecho poco más que recitar la lista de las partículas que «viven» en la ecuación maestra. Las doce partículas de materia deben introducirse en la teoría *a priori*, y ni siquiera sabemos por qué son precisamente doce. Las observaciones de la desintegración de partículas *Z* en neutrinos, realizadas en el CERN en los años noventa, nos proporcionaron evidencias de que no son más de doce, pero, puesto que parece que con cuatro (los quarks up y down, el electrón y el neutrino electrónico) basta para construir un universo, la existencia de las otras doce es todo un misterio. Sospechamos que desempeñaron un papel importante en los primeros instantes del universo, pero la manera en la que afectan o han afectado a nuestra existencia actual es una de las grandes cuestiones de la física que aún están por resolver. De momento, Humphry Davy puede estar tranquilo.

En lo que se refiere al modelo estándar, las doce son partículas elementales, es decir, que no pueden dividirse en partes más pequeñas; son los elementos básicos. Esto parece ir en contra del sentido común, que nos dice que sería perfectamente natural que una pequeña partícula pudiese, en principio, partirse por la mitad. Pero la teoría cuántica no funciona así. Una vez más, nuestro sentido común no nos sirve de guía para la física fundamental. Por lo que respecta al modelo estándar, las partículas no tienen subestructura. Se dice que son «puntuales» y con eso se zanja la cuestión. Evidentemente, es posible que con el tiempo los experimentos revelen que los quarks pueden dividirse en partes más pequeñas, pero lo importante es que no tiene por qué ser así. Podría darse el caso de que las partículas sean realmente puntuales y que no tenga ningún sentido preguntarse sobre su subestructura. Resumiendo, sabemos que nuestro mundo está compuesto por un montón de partículas y que la ecuación maestra es la clave para entender cómo interactúan entre sí.

Hay un detalle que no hemos comentado: aunque seguimos hablando de partículas, en realidad este nombre es algo engañoso. No son partículas en el sentido tradicional de la palabra, no rebotan unas con otras como bolas de billar en miniatura, sino que interaccionan de una manera muy parecida a como lo hacen las ondas en el agua, produciendo sombras en el fondo de la piscina. Es como si las partículas tuviesen carácter de ondas, aunque sigan siendo partículas. De nuevo, se trata de una representación muy poco intuitiva, que proviene de la teoría cuántica. Precisamente, lo que hace la ecuación maestra es establecer con rigor (es decir, matemáticamente) la naturaleza de estas interacciones entre ondas. Pero ¿cómo llegamos a saber qué teníamos que escribir en la ecuación maestra? ¿Cuáles son los principios en los que se basa? Antes de responder a estas cuestiones, cuya relevancia es evidente, revisaremos con algo más de detalle la ecuación maestra y trataremos de extraer al menos parte de su significado.

La primera línea representa le energía cinética de las partículas *W* y *Z*, el fotón y el gluón, y nos dice cómo interactúan entre sí. Aún no habíamos mencionado esa posibilidad, pero existe: los gluones pueden interactuar con otros gluones, las partículas *W* y *Z* pueden interaccionar entre sí, y la partícula *W* puede hacerlo también con el fotón. En esta lista no figura la posibilidad de que los fotones interactúen entre sí, porque, por suerte, no lo hacen, ya que si no sería muy difícil ver las cosas. En cierto sentido, el hecho de que puedas leer este libro es algo extraordinario. Lo extraordinario es que la luz que viaja de la página hacia tus ojos no sea desviada por toda la luz que pasa a través de ella, procedente de todas las cosas que te rodean, cosas que podrías ver si girases la cabeza. Los fotones se atraviesan literalmente los unos a los otros, ignorándose mutuamente.

La segunda línea de la ecuación maestra es la más interesante: nos dice cómo interactúa cada partícula de materia en el universo con todas las demás. Contiene las interacciones mediadas por fotones, por partículas *W* y *Z* y por gluones, así como las energías cinéticas de todas las partículas de materia. De momento, no veremos las líneas tercera y cuarta.

Hemos hecho hincapié en que, a excepción de la gravedad, en la ecuación maestra se encuentran reflejadas todas las leyes fundamentales de la física que conocemos. Ahí está (agazapada entre las dos primeras líneas) la ley de la repulsión electrostática, que Charles-Augustin de Coulomb determinó a finales del siglo XVIII, y también están la electricidad y el magnetismo. Basta con que «le preguntemos» a la ecuación maestra cómo interactúan entre sí las partículas con carga eléctrica para que aparezcan todo el conocimiento acumulado por Faraday y las hermosas ecuaciones de Maxwell. Y, por supuesto, toda la estructura está sólidamente basada en la teoría de la relatividad especial de Einstein. De hecho, la parte del modelo estándar que explica cómo interactúan la luz y la materia se denomina electrodinámica cuántica. El término «cuántica» nos recuerda que la teoría cuántica tuvo que modificar las ecuaciones de Maxwell. Las modificaciones son normalmente muy pequeñas y dan cuenta de efectos sutiles, que fueron investigados por primera vez a mediados del siglo XX, entre otros por Richard Feynman. Como hemos visto, la ecuación maestra también contiene la física de las fuerzas débil y fuerte. Las propiedades de estas tres fuerzas de la naturaleza se especifican con todo detalle, lo que significa que se establecen las reglas del juego con precisión matemática y sin ambigüedad ni redundancia. Así que, con la salvedad de la gravedad, parece que tenemos algo que se parece a una gran teoría unificada. Ningún experimento en ningún lugar, ninguna observación del cosmos, han permitido nunca encontrar evidencias de que exista una quinta fuerza en el universo. La mayoría de los fenómenos cotidianos pueden explicarse completamente mediante las leyes del electromagnetismo y de la gravedad. La fuerza débil hace que el Sol arda, pero, aparte de eso, apenas se deja sentir en la vida cotidiana en la Tierra, y la fuerza fuerte mantiene los núcleos atómicos intactos, pero apenas se extiende más allá del núcleo, por lo que su enorme intensidad no llega a nuestro mundo macroscópico. La fuerza electromagnética es la que nos hace creer que cosas tan sólidas como las mesas y las sillas son realmente sólidas. En realidad, la materia es en su mayor parte espacio vacío. Imagina que nos acercásemos tanto a un átomo que llegásemos a ver el núcleo del tamaño de un guisante. Los electrones serían granos de arena moviéndose a gran velocidad a su alrededor, aproximadamente a un kilómetro de distancia. El resto estaría vacío. Puede que la analogía del «grano de arena» no sea del todo apropiada, ya que debemos recordar que se comportan más como ondas que como granos de arena, pero lo importante es que quede clara la diferencia de tamaño entre el átomo y su núcleo. La solidez se pone de manifiesto si tratamos de acercar la nube de electrones que se agita alrededor del núcleo a la de otro átomo vecino. Como los electrones poseen carga eléctrica, las nubes se repelen e impiden que los átomos se atraviesen los unos a los otros, pese a estar compuestos en su mayor parte por espacio vacío. Encontramos un claro indicio de lo vacía que está la materia si miramos a través del cristal de la ventana. Aunque parece sólido, la luz lo atraviesa sin problemas, lo que nos permite ver el mundo exterior. En realidad, lo verdaderamente sorprendente es que un pedazo de madera sea opaco y no transparente.

Es realmente impresionante que una sola ecuación pueda contener tanta física. Dice mucho sobre la «la irrazonable eficacia de las matemáticas» de la que habló Wigner. ¿Qué es lo que hace que el mundo natural no sea mucho más complejo? ¿Qué es lo que nos permite condensar tanta física en una ecuación como esta? ¿Cómo es que no tenemos que catalogar todas las cosas en enormes bases de datos y enciclopedias? Nadie sabe a ciencia cierta por qué podemos sintetizar la naturaleza de esta manera, y no cabe duda de que la elegancia y simplicidad aparentemente fundamentales constituyen uno de los motivos por los que los físicos se dedican a esto. Aunque no debemos olvidar que es posible que llegue el momento en que la naturaleza deje de permitir esta prodigiosa simplificación, no podemos más que maravillarnos ante la belleza subyacente que hemos descubierto.

Pese a todo lo que acabamos de decir, aún no hemos terminado. Todavía no hemos mencionado el mayor logro del modelo estándar. No solo incorpora en su interior las interacciones electromagnética, fuerte y débil, sino que unifica dos de ellas. A primera vista, parece que los fenómenos electromagnéticos y los asociados a la interacción débil no tienen nada que ver entre sí. El electromagnetismo es el fenómeno cotidiano por antonomasia, del que todos tenemos una idea intuitiva, mientras que la fuerza débil permanece oculta en el turbio mundo subatómico. No obstante, sorprendentemente, el modelo estándar nos dice que ambas son en realidad manifestaciones distintas de la misma cosa. Vuelve a leer la segunda línea de la ecuación maestra. Sin saber nada de matemáticas, puedes «ver» las interacciones entre las partículas de materia. Las partes de la segunda línea en las que intervienen las partículas *W*, *B* y *G* (de gluón) aparecen entre dos partículas de materia, ψ, lo que significa que este es el lugar donde la ecuación maestra nos dice cómo «se acoplan» las partículas de materia con los mediadores de las fuerzas, pero con un detalle: el fotón se aloja en parte en el símbolo «*W*» y en parte en «*B*», que es donde se encuentra también la *Z*. La partícula *W* se aloja por completo en «*W*».

Es como si, para las matemáticas, los objetos fundamentales fuesen *W* y *B*, que se combinan para dar lugar al fotón y a la partícula *Z*. El resultado es que la fuerza electromagnética (mediada por el fotón) y la fuerza débil (mediada por las partículas *W* y *Z*) están entrelazadas. Eso significa que las propiedades que se miden en los experimentos que tratan con fenómenos electromagnéticos deberían estar relacionadas con las que se miden en los que traten con fenómenos débiles. Esta predicción del modelo estándar es impresionante. Y fue de hecho una predicción: los artífices del modelo estándar (Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam) compartieron un premio Nobel por sus trabajos, ya que su teoría fue capaz de predecir las masas de las partículas *W* y *Z* mucho antes de que fuesen descubiertas en el CERN en los años ochenta. Todo cuadra estupendamente, pero ¿cómo supieron Glashow, Weinberg y Salam qué era lo que debían escribir? ¿Cómo llegaron a la conclusión de que «las partículas *W* y *B* se combinan para dar lugar al fotón y a la partícula *Z*»? Para encontrar la respuesta a esta pregunta, tendremos que hacer una incursión en el hermoso núcleo de la física de partículas moderna. No se limitaron a proponer hipótesis, disponían de un importante indicio: la naturaleza es simétrica.

La simetría que nos rodea salta a la vista. Deja que un copo de nieve caiga sobre tu mano y podrás observar la más hermosa de las esculturas de la naturaleza. Sus formas se repiten con regularidad matemática, como si se reflejasen en un espejo. Algo más mundano, como una pelota, tiene el mismo aspecto la mires desde donde la mires, y un cuadrado se puede invertir a lo largo de su diagonal, o respecto a un eje que pase por su centro, sin que cambie su apariencia. En física, la simetría se manifiesta de una manera muy similar. Si manipulamos una ecuación y esta no varía, se dice que lo que hemos hecho es una simetría de la ecuación. Es todo un poco abstracto, pero recuerda que las ecuaciones son la forma que tienen los físicos de expresar las relaciones entre objetos reales. Una simetría sencilla pero de importancia que poseen todas las ecuaciones importantes de la física refleja el hecho de que, si colocamos al físico en un tren en movimiento, los resultados del experimento no se verán alterados, siempre que el tren no esté acelerando. Esta idea nos resulta familiar: es el principio de la relatividad de Galileo, que constituye la base de la teoría de Einstein. Utilizando el vocabulario de la simetría, diremos que las ecuaciones que describen nuestro experimento no dependen de si este se realiza sobre el andén de la estación o dentro del tren, por lo que el hecho de que el experimento se mueva es una simetría de la ecuación. Hemos visto cómo este hecho sencillo condujo a Einstein al descubrimiento de su teoría de la relatividad. Es algo habitual: las simetrías sencillas tienen consecuencias profundas.

Estamos en condiciones de hablar de la simetría de la que Glashow, Weinberg y Salam hicieron uso cuando descubrieron el modelo estándar de la física de partículas. Tiene un nombre llamativo: simetría de gauge. ¿Y qué es un gauge? Antes de intentar explicarlo, diremos para qué nos sirve. Imaginemos que somos Glashow, Weinberg o Salam, y estamos devanándonos los sesos buscando una teoría que explique cómo interactúan los objetos. Decidimos que vamos a empezar por construir una teoría para las partículas diminutas e indivisibles. De los experimentos, sabemos cuáles son las partículas que existen, y haríamos bien en crear una teoría que las incluya todas, pues de lo contrario no sería más que una teoría a medias. Evidentemente, podríamos devanarnos los sesos aún más tratando de comprender por qué habrían de ser esas partículas en particular las que componen todo el universo, o por qué habrían de ser indivisibles, pero no nos conduciría a nada. En realidad, son dos preguntas muy buenas, para las que a día de hoy no tenemos respuesta. Una de las cualidades de un buen científico es saber elegir las preguntas que ha de plantearse para poder seguir adelante, y cuáles conviene dejar para otro día. Así pues, demos por buenos los ingredientes y veamos si somos capaces de encontrar la manera en que las partículas interactúan entre sí. Si no interaccionasen, el mundo sería realmente aburrido: cualquier objeto podría atravesar a cualquier otro, nada atraería a nada, y nunca tendríamos núcleos, átomos, animales o estrellas. Pero, muy a menudo, la física consiste en dar pequeños pasos, y no es tan complicado escribir una teoría de partículas cuando estas no interactúan entre sí, basta con escribir la segunda línea de la ecuación maestra, eliminando las partes en las que aparecen *W*, *B* y *G*. Esto es: una teoría cuántica del todo, pero sin ninguna interacción. Hemos dado nuestro primer pasito. Aquí llega la magia: impondremos el requisito de que el mundo, y por lo tanto nuestra ecuación, tenga simetría de gauge y obtendremos un resultado asombroso: el resto de la segunda línea, y toda la primera línea, aparecen «gratis». En otras palabras, si queremos satisfacer las exigencias de la simetría de gauge, nos vemos obligados a modificar la versión «sin interacciones» de la teoría y pasamos de pronto de la teoría más aburrida del mundo a una en la que el fotón, las partículas *W* y *Z* y el gluón no solo existen, sino que son los encargados de mediar en las interacciones entre las partículas. Dicho de otra manera, hemos llegado a una teoría capaz de describir la estructura de los átomos, el brillo de las estrellas y, en última instancia, la composición de objetos tan complejos como los seres humanos, todo ello gracias a la aplicación del concepto de simetría. Ya tenemos las dos primeras líneas de nuestra teoría de casi todo, ahora solo nos queda entender qué es en realidad esa milagrosa simetría y explicar las dos últimas líneas.

La simetría de un copo de nieve es geométrica, y la puedes ver con los ojos. La simetría que subyace bajo el principio de relatividad de Galileo no la puedes ver con tus ojos, pero tampoco es difícil de entender, aunque sea abstracta. La simetría de gauge es similar al principio de Galileo, en el sentido de que es abstracta, aunque con un poco de imaginación tampoco es difícil de comprender. Para ayudar a establecer la relación entre las descripciones que hemos ido presentando y sus fundamentos matemáticos, hemos hecho repetidas referencias a la ecuación maestra. Hagámoslo de nuevo. Hemos dicho que las partículas de materia se representan en la ecuación mediante el símbolo griego ψ. Ha llegado el momento de profundizar un poco más. ψ es lo que se llama un campo. Podría ser el campo de electrones, o de quarks up, o, de hecho, el campo de cualquier otra de las partículas de materia del modelo estándar. Allí donde el campo sea más grande, mayor es la probabilidad de que se encuentre la partícula. De momento nos concentraremos en los electrones, pero la historia es la misma para el resto de las partículas, de los quarks a los neutrinos. Si el campo se anula en algún lugar, la partícula no se encontrará allí. Puedes imaginar un campo real, cubierto de hierba. O quizá sería mejor pensar en un paisaje ondulado, con sus colinas y sus valles. El campo es más grande en las colinas y más pequeño en los valles. Estamos intentando que crees un campo de electrones imaginario en tu mente. Quizá te sorprenda que la ecuación maestra sea tan vaga. No sirve para ciertas magnitudes, y ni siquiera podemos seguirle la pista al electrón. Lo único que podemos decir es que es más probable que lo encontremos aquí (en la montaña) que allí (en el campamento base en el valle). Podemos asociar números concretos a la probabilidad de encontrar el electrón aquí o allí, pero nada más. La vaguedad de nuestra descripción del mundo a las escalas más diminutas se debe a que esos son los dominios propios de la teoría cuántica, que se expresa exclusivamente mediante las probabilidades de que las cosas sucedan. A escalas muy reducidas, conceptos como los de posición o momento lineal parecen llevar la incertidumbre intrínsecamente asociada a ellos. Dicho sea de paso, a Einstein no le gustaba nada el hecho de que el mundo se comportase siguiendo las leyes de la probabilidad, lo que dio lugar a su famosa frase de que «Dios no juega a los dados». No obstante, se vio obligado a aceptar el enorme éxito de la teoría cuántica, que explica todos los experimentos que se han realizado en el mundo subatómico, y sin la cual no tendríamos ni idea de cómo funcionan los microchips que se encuentran en el interior de los ordenadores modernos. Puede que en el futuro alguien idee una teoría aún mejor, pero de momento la teoría cuántica constituye nuestro mayor logro. Como no nos hemos cansado de repetir a lo largo del libro, cuando nos aventuramos más allá de nuestra experiencia cotidiana, no existe ninguna razón en absoluto por la que la naturaleza deba comportarse de acuerdo con las reglas que nos dicta el sentido común. Nuestra propia evolución se ha producido en el marco de la mecánica macroscópica, no de la mecánica cuántica.

Volviendo a la tarea que tenemos entre manos, puesto que es la teoría cuántica la que define las reglas del juego, estamos obligados a hablar de campos de electrones. Pero, aunque hemos especificado nuestro campo y hemos esbozado el paisaje, aún tenemos trabajo por hacer. Las matemáticas de los campos cuánticos nos deparan una sorpresa. Existe cierta redundancia. Para cada punto del paisaje, ya sea una colina o un valle, las matemáticas dicen que debemos especificar no solo el valor del campo en un punto en concreto (por ejemplo, continuando con nuestra analogía con un campo real, la altura sobre el nivel del mar), que correspondería a la probabilidad de encontrar la partícula ahí, sino que también hemos de especificar una cosa llamada «fase» del campo. La representación más sencilla de la fase consiste en imaginar la esfera de un reloj (o de un indicador) con una sola manecilla. Las doce en punto sería una posible fase, la hora y media sería otra fase distinta. Imaginemos que colocamos un reloj diminuto en cada punto de nuestro paisaje, que nos dice cuál es la fase del campo en ese punto. Obviamente, no son relojes de verdad (y, por supuesto, no miden el tiempo). La existencia de la fase es algo que los físicos ya sabían mucho antes de que apareciesen Glashow, Weinberg y Salam. Todo el mundo sabía también que lo importante no eran los valores absolutos, sino la fase relativa entre distintos puntos del campo. Por ejemplo, podríamos adelantar diez minutos todos los minúsculos relojes y nada cambiaría. Lo importante es que todos los relojes se adelanten o se retrasen en la misma medida. Si olvidásemos adelantar uno de ellos, estaríamos describiendo un campo de electrones distinto. Esto parece indicar que existe cierta redundancia en la descripción matemática del mundo.

En 1954, varios años antes de que Glashow, Weinberg y Salam propusiesen el modelo estándar, dos físicos que compartían despacho en el laboratorio de Brookhaven, Chen Ning Yang y Robert Mills, expusieron su opinión sobre el posible significado de esta redundancia en la determinación de la fase. Es habitual que se produzcan avances en la física cuando la gente juega con ideas sin ningún motivo aparente, que es precisamente lo que hicieron Yang y Mills. Se plantearon la cuestión de qué sucedería si a la naturaleza no le importase en absoluto la fase. Dicho en otras palabras, jugaron con la ecuación matemática, cambiando sin ton ni son todas las fases, y trataron de ver cuáles serían las consecuencias. Puede parecer extraño, pero, si sientas a un par de físicos en un despacho y los dejas a su aire, acabarán haciendo cosas como esta. Volviendo a la analogía con el paisaje, puedes imaginártelo como si te movieses por el campo, modificando al azar el valor que marcan los pequeños relojes. A primera vista, está claro lo que sucede: no puedes hacerlo, no es una simetría de la naturaleza.

Para ser más precisos, fijémonos de nuevo únicamente en la segunda línea de la ecuación maestra. Dejemos de lado todas las partes que se refieren a las partículas *W*, *B* y *G*. Lo que nos queda entonces es la teoría de partículas más sencilla que cabría imaginar: partículas que permanecen en reposo y nunca interactúan entre sí. Claramente, esa pequeña parte de la ecuación maestra no permanece inalterada si de pronto modificamos los valores que marcan todos los relojes diminutos (aunque esto no es algo que uno pueda deducir simplemente mirando la ecuación). Yang y Mills lo sabían, pero siguieron insistiendo y se plantearon una gran pregunta: ¿cómo podemos modificar la ecuación de forma que no varíe? La respuesta es fantástica: tenemos que volver a incorporar las partes de la ecuación maestra que acabamos de eliminar, no cabe ninguna otra posibilidad. Al hacerlo, invocamos a los mediadores de las fuerzas y pasamos súbitamente de un mundo sin interacciones a una teoría capaz de describir el mundo real. El hecho de que a la ecuación maestra no le importen cuáles sean los valores que marquen los relojes (o los indicadores) es lo que llamamos simetría de gauge. Lo sorprendente es que el requisito de la simetría de gauge hace que, al escribir la ecuación, no tengamos más que una sola opción: la simetría de gauge conduce inevitablemente a la ecuación maestra. Como corolario, deberíamos añadir que Yang y Mills fueron quienes nos indicaron el camino a seguir, pero su trabajo tenía un interés eminentemente matemático y apareció mucho antes de que los físicos supiesen cuáles eran las partículas que la teoría fundamental debía describir. Fueron Glashow, Weinberg y

Salam quienes, partiendo de sus ideas, tuvieron la visión suficiente para aplicarlas al mundo real.

Hemos visto, por lo tanto, cómo se pueden escribir las dos primeras líneas de la ecuación maestra en la que se basa el modelo estándar de la física de partículas, y confiamos en haber transmitido también cierta idea de su alcance y su contenido. Asimismo, hemos visto que no se trata de una ecuación *ad hoc*, sino que la simetría de gauge nos conduce a ella inexorablemente. Ahora que tenemos una idea más aproximada de esta importantísima ecuación, podemos retomar la tarea original que nos ha traído hasta aquí. Estábamos tratando de entender hasta qué punto las reglas de la naturaleza contemplan la posibilidad de que la masa se transforme realmente en energía, y viceversa. Evidentemente, la respuesta se encuentra en la ecuación maestra, que es la que dicta las reglas del juego. Pero existe una manera mucho más sugerente de entender lo que sucede y de comprender cómo interactúan las partículas entre sí. Fue Richard Feynman quien introdujo en la física esta perspectiva, que se basa en el uso de diagramas.

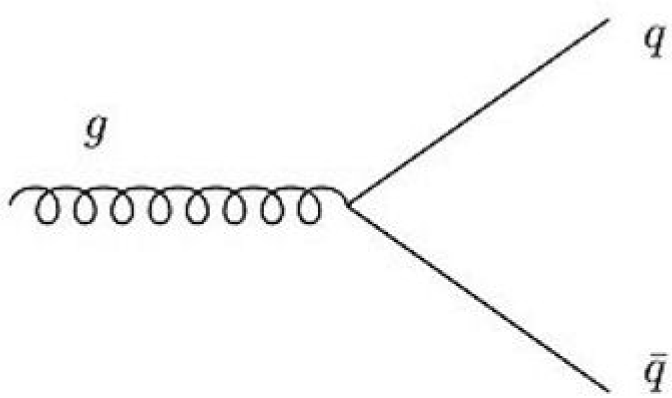

Figura 14

¿Qué sucede cuando se aproximan dos electrones? ¿Y si son dos quarks? ¿Y si un neutrino se acerca a un anti muón?… Lo que sucede es que las partículas interaccionan, siguiendo escrupulosamente lo que dicta la ecuación maestra. Dos electrones se repelen, porque ambos tienen la misma carga eléctrica, mientras que un electrón y un antielectrón se atraen, porque sus cargas son opuestas. Toda esta física está contenida en las dos primeras líneas de la ecuación maestra, y se resume en unas pocas reglas que podemos representar gráficamente. En realidad es algo muy fácil de entender, aunque llegar a apreciar los detalles requiere algo más de esfuerzo. Nos limitaremos a ver lo más básico.

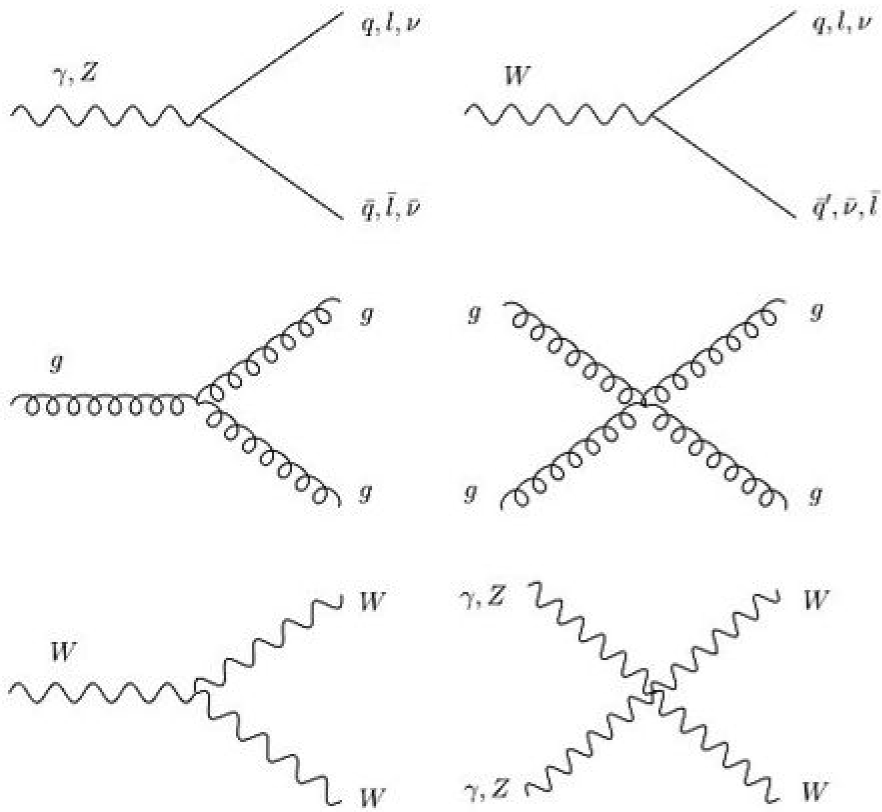

Figura 15

Si nos fijamos de nuevo en la segunda línea, vemos que el término en el que aparecen dos símbolos ψ y un *G* es la única parte de la ecuación que tiene relevancia para la interacción entre quarks por medio de la fuerza fuerte. Lo que nos dice la ecuación maestra es que, en el mismo punto del espacio-tiempo, interaccionan dos campos de quarks y un gluón. Y no solo eso, sino que esa es la única forma en la que pueden interaccionar. Una vez que hemos decidido hacer que nuestra teoría posea simetría de gauge, esa parte de la ecuación maestra nos indica con precisión cómo interaccionan los quarks y los gluones. No tenemos ninguna libertad de elección en el asunto. Feynman se dio cuenta de que todas las interacciones básicas son, en esencia, tan sencillas como esta, y se puso a dibujar gráficos para cada una de las posibles interacciones que la teoría contempla. La figura 14 muestra cómo representan habitualmente los físicos de partículas la interacción entre quark y gluón. La línea rizada representa un gluón, mientras que la línea recta representa un quark o un anti quark. La figura 15 representa el resto de las interacciones permitidas en el modelo estándar, que se derivan de las dos primeras líneas de la ecuación maestra. No te detengas en los detalles de los gráficos. La idea es que podemos dibujarlos y que no son demasiados. Las partículas de luz (fotones) se representan con el símbolo γ, y las partículas *W* y *Z* aparecen marcadas como tales. Los seis quarks figuran bajo la etiqueta genérica *q*, los neutrinos se representan como ν (que se pronuncia «nu») y los tres leptones con carga eléctrica (electrón, muón y tau) aparecen como *l*. Las antipartículas se distinguen trazando una línea sobre el símbolo de la partícula correspondiente. Ahora viene lo bueno. Estos diagramas representan lo que los físicos de partículas denominan vértices de interacción, que pueden conectarse entre sí para crear diagramas más grandes. Cualquier diagrama que dibujes representa un proceso que puede darse en la naturaleza y, en sentido contrario, si no puedes dibujar un diagrama es porque el proceso no se puede producir.

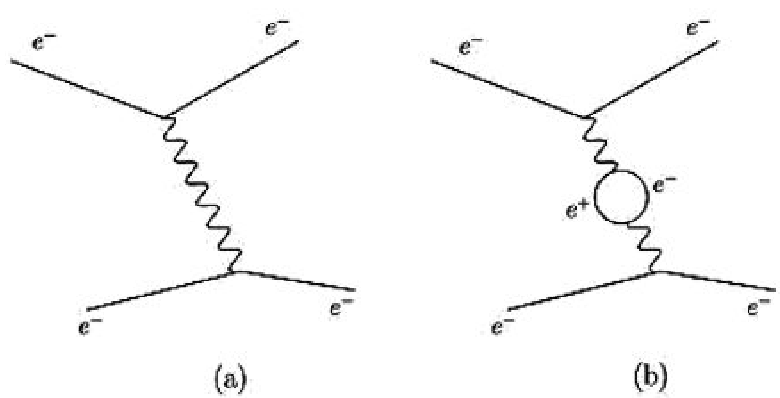

Figura 16

Feynman no se limitó a introducir los diagramas, sino que asoció con cada vértice una regla matemática derivada directamente de la ecuación maestra. En los diagramas compuestos, las reglas se multiplican unas por otras, lo que permite a los físicos calcular la probabilidad de que el proceso asociado a un determinado diagrama tenga lugar. Por ejemplo, cuando se encuentran dos electrones, el diagrama más sencillo que podemos dibujar es el que aparece en la figura 16(a). En ese caso, decimos que los electrones se dispersan mediante el intercambio de un fotón. Este diagrama se construye a partir de dos vértices electrón-fotón. Puedes verlo como que los electrones vienen desde la izquierda, se dispersan como consecuencia del intercambio del fotón, y después se alejan por la derecha. En realidad, disimuladamente, hemos añadido una regla más: puedes sustituir una partícula por su antipartícula (y viceversa), siempre que la conviertas en una partícula e inviertas el sentido de su movimiento. La figura 16(b) muestra otra manera posible de combinar los vértices. Es algo más enrevesada que la anterior, pero corresponde a otra posible interacción entre los electrones. Si lo piensas un momento, verás que el número de diagramas posibles es infinito. Todos ellos representan las distintas maneras en que pueden dispersarse dos electrones, pero, por suerte para quienes tenemos que calcular qué es lo que sucede, algunos de los diagramas son más importantes que otros. De hecho, es muy fácil enunciar la regla: en general, los diagramas más importantes son aquellos con el menor número de vértices. Por lo tanto, en el caso del par de electrones, el diagrama de la figura 16(a) es el más importante, porque solo tiene dos vértices. Eso significa que podemos hacernos una idea bastante aproximada de lo que sucede si calculamos únicamente este diagrama mediante las reglas de Feynman. Es muy gratificante ver cómo lo que surge de las matemáticas es la física de la interacción entre dos partículas cargadas, tal y como la descubrieron Faraday y Maxwell. Pero ahora podemos afirmar que entendemos mucho mejor el origen de esa física, pues la hemos derivado a partir de la simetría de gauge. Los cálculos realizados utilizando los diagramas de Feynman nos ofrecen mucho más de lo que cualquier otra manera de entender la física del siglo XIX nos puede dar. Para la interacción entre dos electrones, podemos incluso calcular las correcciones a las predicciones de Maxwell, pequeñas modificaciones que mejoran los resultados de sus ecuaciones y se aproximan más a los resultados experimentales. La ecuación maestra abre así nuevas vías de investigación, que apenas empezamos a atisbar. Como hemos venido diciendo, el modelo estándar describe todo lo que sabemos sobre la interacción entre partículas, y constituye una teoría completa de las fuerzas fuerte, débil y electromagnética, capaz incluso de unificar dos de ellas. Únicamente la gravedad queda fuera de este ambicioso marco de comprensión de todas las interacciones del universo.

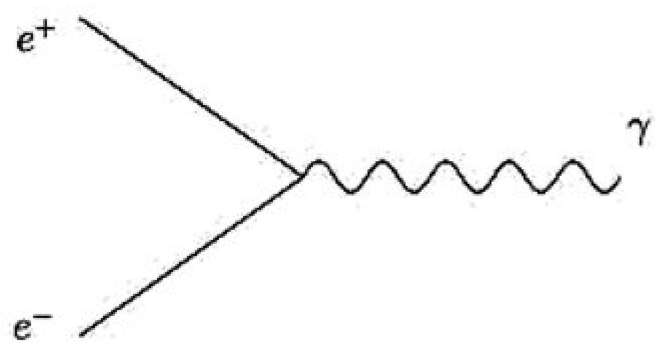

Figura 17

Pero no perdamos de vista nuestro objetivo. ¿Cuál es el mecanismo por el que las reglas de Feynman, que condensan el contenido esencial del modelo estándar, dictan las maneras en que podemos destruir la masa y transformarla en energía? ¿Cómo podemos utilizarlas para sacar el máximo provecho de $E = mc^2$? Antes de nada, recordemos un resultado importante del capítulo 5: la luz está compuesta por partículas sin masa. En otras palabras, los fotones carecen de masa alguna. Podemos, pues, dibujar un diagrama interesante, que aparece en la figura 17: un electrón y un antielectrón (positrón) chocan y se aniquilan para dar lugar a un solo fotón (para mayor claridad, hemos llamado e^- al electrón y e^+ al positrón). Las reglas de Feynman lo permiten. Este diagrama merece nuestra atención, porque representa un caso en el que partimos de una determinada masa (la que poseen un electrón y un positrón) y acabamos sin ella (un fotón). Es el proceso de destrucción completa de la materia, en el que toda la energía acumulada en la masa del electrón y el positrón se libera como energía del fotón. Pero hay un problema: la aniquilación en un solo fotón no cumple la regla según la cual todo lo que sucede debe satisfacer tanto la ley de conservación de la energía como la de conservación del momento lineal, cosa que este proceso no puede hacer (no es algo completamente obvio, pero no nos molestaremos en probarlo). Es un problema que tiene fácil solución: crear dos fotones. La figura 18 muestra el diagrama de Feynman correspondiente, en el que, de nuevo, la masa inicial se destruye por completo y se transforma totalmente en la energía de los dos fotones, en este caso. Procesos como este fueron fundamentales en los primeros momentos del universo, cuando la materia y la antimateria se destruyeron mutuamente casi por completo mediante interacciones como esta. Hoy en día podemos observar los vestigios de esa destrucción. Los astrónomos han observado que, por cada partícula de materia, en el universo existen 100.000 millones de fotones. Dicho de otro modo, de cada 100.000 millones de partículas de materia creadas inmediatamente después del big bang, solo ha sobrevivido una. Las demás aprovecharon la oportunidad que se les ofreció, representada gráficamente en los diagramas de Feynman, de deshacerse de su masa y convertirse en fotones.

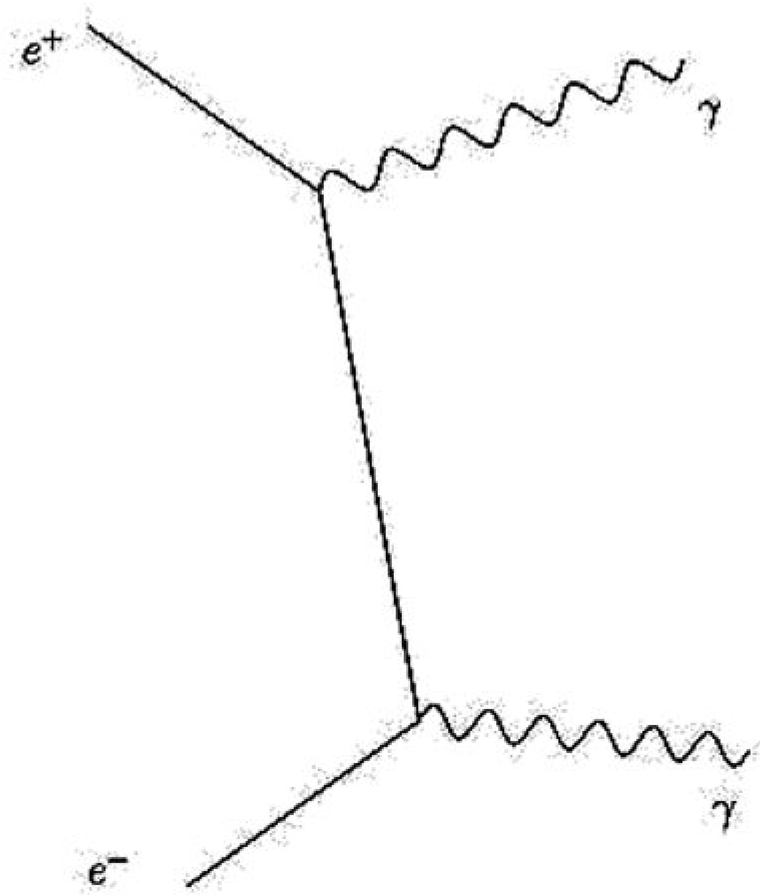

Figura 18

En un sentido muy concreto, la materia de que están compuestas las estrellas, los planetas y las personas no es más que un minúsculo residuo de la inmensa aniquilación de masa que tuvo lugar en los orígenes de la historia del universo. Es un hecho feliz, casi milagroso, que quedase algo en absoluto. A día de hoy, seguimos sin saber a ciencia cierta por qué sucedió. Aún no sabemos cómo responder a la pregunta de: « ¿Por qué el universo no está repleto de luz y nada más?», aunque en varios lugares del mundo se están preparando experimentos para tratar de darle respuesta. No es que no tengamos ideas inteligentes con las que probar, sino que aún no hemos dado con la evidencia experimental decisiva que nos permita afirmar que las teorías son erróneas. El famoso disidente ruso Andréi Sajárov llevó a cabo los primeros trabajos en este campo, siendo el primero en exponer los criterios que debía satisfacer cualquier teoría que pretendiese dar respuesta a la pregunta de por qué sigue habiendo materia tras el big bang.

Hemos aprendido que la naturaleza dispone de un mecanismo para destruir la masa, pero por desgracia su uso en la Tierra no es muy práctico, porque necesitaríamos generar y almacenar antimateria (que sepamos, no hay ningún lugar del que podamos extraerla, ni existen cúmulos de antimateria flotando en el espacio exterior). Como fuente de energía no parece muy útil, sencillamente porque no disponemos del combustible. La antimateria se puede crear en el laboratorio, pero solo tras invertir grandes cantidades de energía. Así que, aunque el proceso de la aniquilación de materia y antimateria es un mecanismo inmejorable para convertir masa en energía, no nos va a servir para resolver la crisis energética mundial.

¿Y qué hay de la fusión, el proceso que utiliza el Sol para producir energía? ¿Cómo se expresa en el lenguaje del modelo estándar? La clave está en concentrar nuestra atención en el vértice de Feynman en el que interviene una partícula W. La figura 19 representa lo que sucede cuando se crea un deuterón a partir de la fusión de dos protones. Recuerda que los protones están compuestos, en una muy buena aproximación, por tres quarks: dos quarks up y un quark down. El deuterón está formado por un protón y un neutrón, y este último, a su vez, está compuesto, de forma muy aproximada, por tres quarks: un quark up y dos quarks down. El diagrama representa cómo uno de los protones se convierte en un neutrón y, como puedes ver, la clave es la partícula W. Uno de los quarks up que componen el protón ha emitido una partícula W y, como consecuencia, se ha convertido en un quark down, haciendo que el protón se transforme en un neutrón. Según el diagrama, la partícula W no se queda por ahí, sino que muere y da lugar a un antielectrón y un neutrino.[15] Las partículas W que se emiten durante la formación de un deuterón siempre mueren y, de hecho, nadie ha conseguido nunca observar partículas W si no es a través de los objetos en que se convierten al desaparecer. Por regla general, casi todas las partículas elementales mueren, porque suele existir un diagrama de Feynman que lo permite. La excepción se produce cuando es imposible que se conserven la energía o el momento lineal, lo que normalmente significa que solo persisten las partículas más ligeras. Este es el motivo por el que los protones, los electrones y los fotones predominan en la materia ordinaria. Sencillamente, no tienen en qué desintegrarse: los quarks up y down son los quarks más ligeros, el electrón es el más ligero de los leptones con carga y el fotón no tiene masa. Por ejemplo, el muón es prácticamente idéntico al electrón, salvo por el hecho de que es más pesado. Recuerda que ya nos lo hemos encontrado antes, cuando hemos hablado del experimento de Brookhaven. Puesto que inicialmente tiene más energía que un electrón, su desintegración en un electrón no viola la conservación de la energía. Además, como se puede ver en la figura 20, las reglas de Feynman permiten que esto suceda y, puesto que también se emiten un par de neutrinos, tampoco hay impedimento para que se conserve el momento. El resultado es que los muones efectivamente se desintegran, con una fugaz vida media de 2,2 microsegundos.

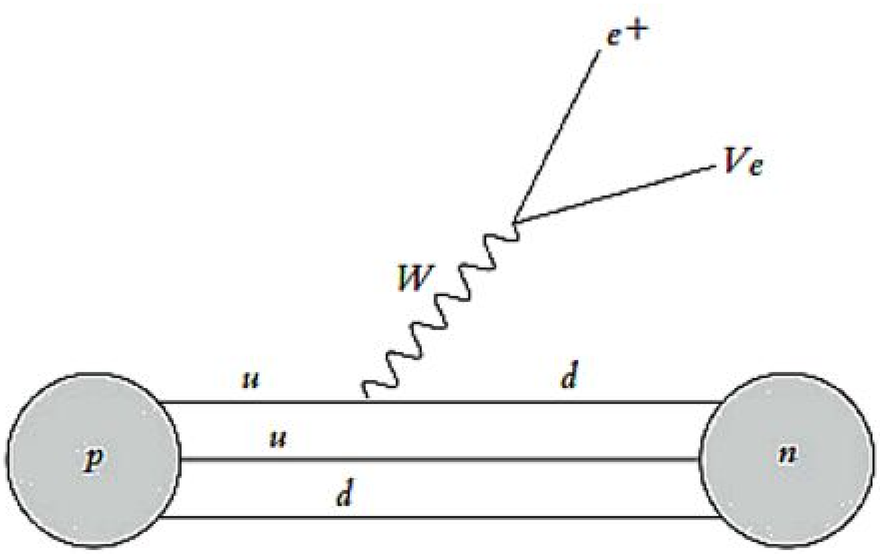

Figura 19

Por cierto, este es un tiempo muy largo si lo comparamos con la escala temporal de la mayoría de los procesos interesantes de la física de partículas. Por el contrario, el electrón es la partícula más ligera del modelo estándar y no tiene en qué desintegrarse. Por lo que sabemos, un electrón nunca se desintegrará espontáneamente, y la única manera de que desaparezca es haciendo que se aniquile junto con su correspondiente partícula de antimateria.

Volviendo al deuterón, la figura 19 explica cómo se puede formar a partir de la colisión de dos protones, y nos dice que cabe esperar la aparición de un antielectrón (positrón) y un neutrino por cada evento de fusión. Como ya hemos mencionado, los neutrinos interactúan con las demás partículas del universo solo de manera muy débil. La ecuación maestra nos dice que esto es así, puesto que los neutrinos son las únicas partículas que interaccionan exclusivamente a través de la fuerza débil. En consecuencia, los neutrinos creados en las profundidades del núcleo solar pueden escapar sin demasiados problemas; salen en todas direcciones y algunos de ellos se dirigen hacia la Tierra. Como sucede con el Sol, la Tierra les resulta prácticamente transparente y la atraviesan sin siquiera notar su presencia. No obstante, cada neutrino tiene una pequeña probabilidad de interaccionar con un átomo terrestre, y experimentos como el de Super-Kamiokande los han logrado detectar, como ya hemos comentado antes.

¿Qué confianza podemos tener en que el modelo estándar es correcto, habida cuenta de la precisión actual de nuestros experimentos? A lo largo de todos estos años, el modelo estándar ha venido superando las pruebas más rigurosas en varios laboratorios de todo el mundo. No nos debe preocupar que los científicos sean víctimas de un sesgo favorable hacia la teoría: quienes llevan a cabo los experimentos desearían fervientemente demostrar que el modelo estándar no es válido o adolece de algún tipo de deficiencia, y se afanan por ponerlo a prueba hasta llegar a su destrucción. Su sueño es vislumbrar nuevos procesos físicos que abran insólitas y deslumbrantes perspectivas con magníficas vistas sobre los mecanismos internos del universo. Pero, hasta ahora, el modelo estándar ha resistido todos sus intentos.

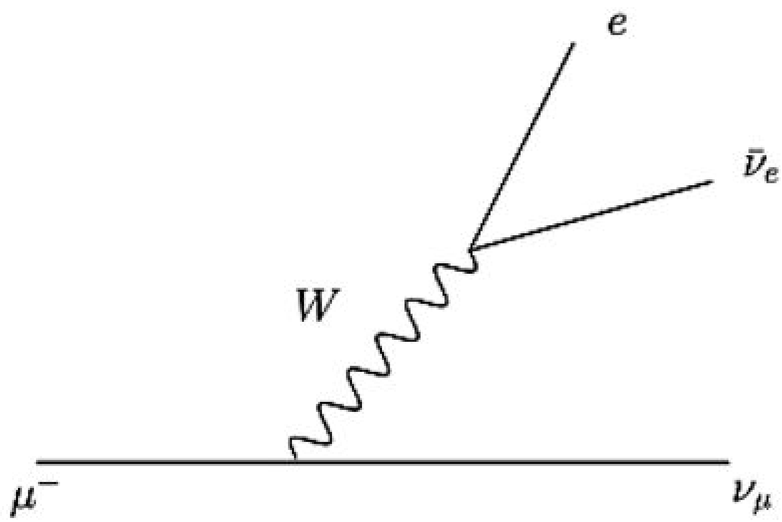

Figura 20

La última de las enormes máquinas que se han utilizado para ponerlo a prueba es el gran colisionador de hadrones (LHC, Large Hadron Collider) del CERN. Esta colaboración entre científicos a escala mundial pretende confirmar o desbaratar el modelo estándar. Volveremos a ella enseguida. El predecesor del LHC fue el gran colisionador de electrones y positrones (LEP, Large Electron Positron Collider), donde se llevaron a cabo algunos de los experimentos más precisos realizados hasta la fecha. El LEP estaba albergado en un túnel circular de 27 kilómetros que corría bajo la ciudad de Ginebra y varios pintorescos pueblos franceses, y exploró el mundo del modelo estándar durante once años, entre 1989 y 2000. Utilizaba enormes campos eléctricos para acelerar haces de electrones en una dirección, y de positrones en la dirección contraria. A grandes rasgos, la aceleración de partículas cargadas por medio de campos eléctricos se asemeja al mecanismo que se empleaba para disparar electrones y producir las imágenes en los antiguos televisores con tubo de rayos catódicos. Los electrones se emitían en la parte trasera del aparato, motivo por el cual este tipo de televisores solía ser más voluminoso. Después, mediante un campo eléctrico, los electrones se aceleraban hacia la pantalla. Un imán permitía curvar el haz y recorrer con él la pantalla para reconstruir la imagen.

En el LEP también se utilizaban campos magnéticos, en este caso para desviar las partículas de manera que su recorrido por el túnel siguiese una trayectoria circular. El objetivo de todo este montaje era hacer que los dos haces chocasen frontalmente. Como ya hemos aprendido, la colisión de un electrón y un positrón puede conducir a su aniquilación mutua, con la consiguiente transformación de su masa en energía. Esta energía es precisamente lo que más interesaba a los científicos del LEP, porque, según las reglas de Feynman, podría dar lugar a partículas más pesadas. Durante la primera fase del funcionamiento de la máquina, las energías del electrón y el positrón se escogieron con gran precisión para que maximizasen la probabilidad de obtener una partícula *Z* (si revisas la lista de las reglas de Feynman para el modelo estándar comprobarás que permiten la aniquilación de un par electrón-positrón en una partícula *Z*). En comparación con otras partículas, la *Z* es bastante pesada: su masa es casi 100 veces mayor que la del protón, unas 200.000 veces mayor que la del electrón y el positrón. En consecuencia, el electrón y el positrón debían acelerarse hasta alcanzar prácticamente la velocidad de la luz para que tuviesen la energía suficiente como para dar lugar a la partícula *Z*. Es evidente que la energía acumulada en sus masas y que se libera cuando se aniquilan no se aproxima ni remotamente a la necesaria para crear la partícula *Z*.

El objetivo inicial del LEP era sencillo: producir partículas *Z* a partir de repetidas colisiones entre electrones y positrones. Cada vez que chocan los dos haces de partículas, existe una probabilidad razonable de que un electrón de uno de ellos se aniquile contra un positrón del otro, dando lugar a una partícula *Z*. Disparando los haces a ráfagas, a lo largo de todo su período de operación el LEP consiguió crear 20 millones de partículas *Z* mediante la aniquilación de pares electrón-positrón.

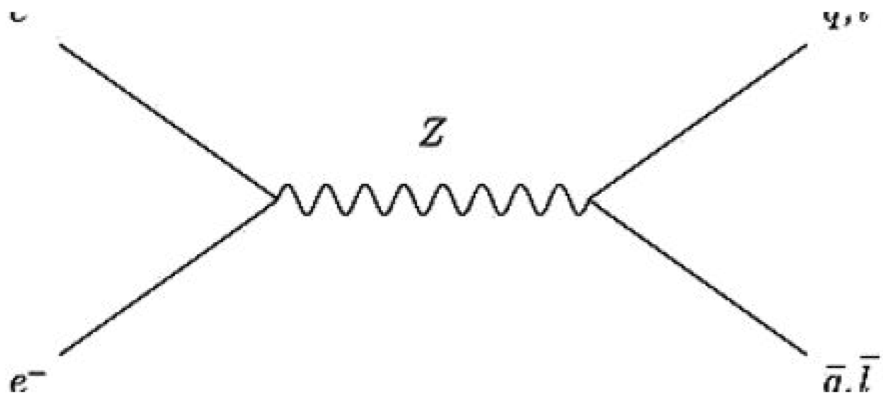

Figura 21

Igual que las demás partículas pesadas del modelo estándar, la *Z* no es estable, y solo vive durante unos brevísimos 10^{-25} segundos. La figura 21 ilustra varios de los procesos posibles en los que interviene la partícula *Z* y en los que tanto interés tenían los aproximadamente 1.500 físicos que trabajaban en el LEP, por no mencionar a los muchos miles más de todo el mundo que esperaban con impaciencia sus resultados. Mediante inmensos detectores de partículas que rodeaban el punto donde el electrón y el positrón se aniquilaban, los físicos pudieron capturar e identificar los productos de la desintegración de la partícula *Z*. Los detectores de partículas modernos, como los que se utilizaron en el LEP, parecen enormes cámaras digitales, de muchos metros de diámetro y de muchos metros de altura, que permiten hacer un seguimiento de las partículas que los atraviesan. Los detectores, como los propios aceleradores, constituyen gloriosas hazañas de la ingeniería moderna. En cavernas del tamaño de catedrales, son capaces de medir la energía y el momento de una sola partícula subatómica con una precisión exquisita. Llevan hasta el límite nuestras capacidades de ingeniería, lo que los convierte en hermosos monumentos de nuestro deseo colectivo de explorar el funcionamiento del universo.

Provistos con estos detectores y enormes baterías de ordenadores de alto rendimiento, uno de los objetivos principales de los científicos se basaba en una estrategia muy sencilla: necesitaban hacer una criba de todos sus datos para identificar las colisiones en las que se había producido una partícula *Z* y, a continuación, para cada una de esas colisiones, calcular cómo se había desintegrado la partícula. Algunas veces lo hacía creando un par electrón-positrón; otras, dando lugar a un par quark-antiquark, o incluso un muón y un antimuón (mira de nuevo la figura 21). Su tarea consistía en llevar un recuento del número de veces en que la partícula *Z* se desintegraba según cada uno de los mecanismos posibles de acuerdo con el modelo estándar y comparar los resultados con los números que predecía la teoría. Con más de 20 millones de partículas *Z* a su disposición, sometieron el modelo estándar a una prueba rigurosa y, obviamente, las evidencias demostraron que la teoría funciona perfectamente. Este ejercicio se conoce como medición de las anchuras parciales, y fue una de las pruebas más importantes del modelo estándar que el LEP posibilitó. A lo largo de los años se realizaron muchos otros experimentos, y en todos ellos se pudo comprobar que el modelo estándar funcionaba. Cuando el LEP cerró sus puertas definitivamente en el año 2000, sus datos ultra precisos habían permitido probar el modelo estándar con un margen de error del 0,1 por ciento.

Antes de abandonar el asunto de las pruebas del modelo estándar, no nos podemos resistir a comentar otro ejemplo de un experimento muy distinto. Los electrones (y muchas otras partículas elementales) se comportan como imanes diminutos, y se han diseñado experimentos muy hermosos para medir sus efectos magnéticos. Estos experimentos, muy ingeniosos, no se llevan a cabo en los colisionadores, ni requieren colisiones brutales de materia y antimateria, pero permiten a los científicos medir el magnetismo con un increíble margen de error de una parte por billón, que equivale a medir la distancia entre Londres y Nueva York con un error mucho menor que el grosor de un pelo humano. Por si eso no fuese suficiente, los físicos teóricos, por su parte, también han trabajado de lo lindo, haciendo cálculos de ese mismo fenómeno. Estos cálculos antes solían hacerse con lápiz y papel, pero hoy en día hasta los teóricos necesitan utilizar ordenadores potentes.

No obstante, partiendo del modelo estándar y con la mente despejada, los teóricos han calculado sus predicciones, y sus resultados coinciden exactamente con los de los experimentos. A día de hoy, teoría y experimento concuerdan con un margen de error de una cienmillonésima parte, lo que supone una de las pruebas más precisas en toda la historia de la ciencia. A estas alturas, gracias en buena medida al LEP y a los experimentos sobre el magnetismo de los electrones, tenemos una gran confianza en que el modelo estándar de la física de partículas va por buen camino. Nuestra teoría de casi todo tiene buena pinta, salvo por un último detalle, que es de hecho muy importante: ¿a qué se refieren las dos últimas líneas de la ecuación maestra?

Asumimos la culpa de haber ocultado un dato que es absolutamente crucial para la búsqueda que dio sentido a este libro. Ha llegado el momento de descubrir el pastel. Parece que la simetría de gauge exige que ninguna de las partículas del modelo estándar tenga masa, lo cual es completamente erróneo. Las cosas tienen masa, y para demostrarlo no hace falta ningún complicado experimento científico. Llevamos todo el libro hablando de ella y hemos deducido la ecuación más famosa de la física, $E = mc^2$, que claramente contiene una «*m*». Las dos últimas líneas de la ecuación maestra nos ayudarán a resolver este problema. Cuando las hayamos comprendido, podremos dar por finalizado nuestro recorrido, pues habremos llegado a una explicación del origen mismo de la masa.

Es muy fácil definir cuál es el problema con la masa. Si tratamos de incorporar la masa directamente en la ecuación maestra, tendremos que renunciar inevitablemente a la simetría de gauge. Pero, como hemos visto, la simetría de gauge constituye el núcleo de la teoría. A partir de ella, hemos sido capaces de hacer que surgieran todas las fuerzas de la naturaleza. Lo que es aún peor, los teóricos demostraron en los años setenta que no es posible desechar la simetría de gauge, porque eso desbarataría la teoría y haría que dejase de tener sentido. En 1964, tres grupos independientes de investigadores consiguieron sacarnos de este aparente punto muerto. Tanto François Englert y Robert Brout, que trabajaban en

Bélgica, como Gerald Guralnik, Carl Hagen y Tom Kibble, en Londres, y Peter Higgs, desde Edimburgo, publicaron sendos trabajos fundamentales que condujeron a lo que más tarde acabó conociéndose como mecanismo de Higgs.

¿Cómo podría explicarse la masa? Supongamos que partimos de una teoría de la naturaleza en la que la masa no apareciese por ninguna parte. En una teoría así, la masa sencillamente no existiría, y nadie inventaría una palabra para referirse a ella. Como hemos visto, todo se movería a la velocidad de la luz. Supongamos ahora que, dentro de esa teoría, sucede algo que hace que, a partir de ese momento, varias partículas empiecen a moverse a distintas velocidades, todas menores que la de la luz. Podría perfectamente decirse que ese evento era el responsable de la aparición de la masa. Esa «cosa» es el mecanismo de Higgs, y ha llegado el momento de explicar en qué consiste.

Imagina que tienes los ojos vendados y que sostienes un hilo del que cuelga una pelota de ping pong. Si la sacudes, llegarás a la conclusión de que en su extremo hay algo con poca masa. Supón ahora que en lugar de oscilar libremente, la pelota está sumergida en denso sirope de arce. Si vuelves a mover el hilo encontrarás una resistencia mayor y supondrás, razonablemente, que lo que cuelga de él es algo mucho más pesado que una pelota de ping pong. Es como si la bola fuese más pesada porque el sirope la lastra. Imagina ahora que un sirope cósmico impregna todo el espacio, llegando a cualquier rincón, a cualquier rendija, tan omnipresente que ni siquiera sabemos que está ahí. En cierto sentido, es el escenario en el que todo sucede.

Evidentemente, la analogía con el sirope no es completa. Por una parte, tiene que ser un sirope selectivo, que frena los quarks y los leptones, pero permite que los fotones se muevan sin impedimentos. Podrías llevar la analogía un poco más allá, y tratar de incorporar esta característica, pero creemos que se entiende la idea, y no hemos de olvidar que, a fin de cuentas, es solo una analogía. Por supuesto, en los artículos que publicaron Higgs y los demás el sirope no se menciona.

Lo que sí mencionan es lo que ahora llamamos el campo de Higgs. Igual que el campo de electrones, lleva asociada una partícula: la partícula de Higgs. Como el campo de electrones, el campo de Higgs fluctúa y, allí donde es mayor, más alta es la probabilidad de encontrar la partícula de Higgs. Pero hay una diferencia: el campo de Higgs no se anula ni siquiera cuando no hay partículas de Higgs, y eso es lo que hace que se asemeje al sirope omnipresente. Todas las partículas del modelo estándar se mueven con el campo de Higgs de fondo, y algunas se ven más afectadas por él que otras. Las dos líneas finales de la ecuación maestra reflejan este hecho. El campo de Higgs viene representado por el símbolo φ, y las partes de la tercera línea en la que aparece φ por partida doble, junto con una *B* o una *W* (que, en nuestra notación compacta, están ocultas dentro del símbolo *D* en la tercera línea de la ecuación maestra), son los términos que generan las masas de las partículas *W* y *Z*. La teoría está ingeniosamente construida de tal manera que el fotón siga careciendo de masa (en la tercera línea, la parte del fotón que reside en *B* se anula con la parte que está en *W*; como ya hemos dicho, todo esto está oculto dentro del símbolo *D*) y, puesto que el campo de gluones (*G*) no ha aparecido en ningún momento, este tampoco tiene masa.

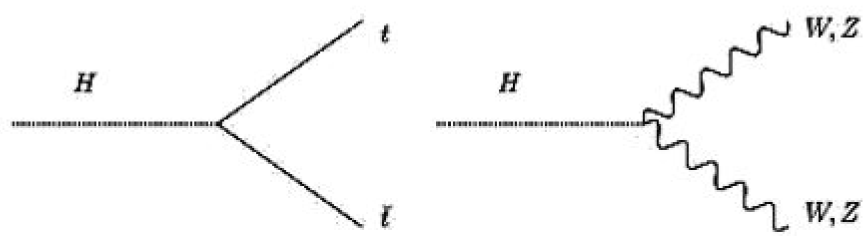

Figura 22

Todo esto concuerda con los experimentos. Al incorporar el campo de Higgs, hemos podido generar las masas de las partículas sin desbaratar la simetría de gauge, pues las masas se generan como consecuencia de la interacción con el propio campo de Higgs. Aquí radica la magia de la idea: podemos conseguir que las partículas adquieran masa sin necesidad de pagar por ello el precio de la pérdida de la simetría de gauge. En la cuarta línea de la ecuación maestra es donde el campo de Higgs genera las masas para el resto de las partículas del modelo estándar.

Esta fantástica representación tiene un problema: ningún experimento ha logrado observar una partícula de Higgs. Todas las demás partículas del modelo estándar se han producido en los experimentos, por lo que la de Higgs es sin duda la pieza que falta en el rompecabezas. Si existe, tal y como predice el modelo estándar, este habrá logrado un nuevo triunfo, y podrá sumar la explicación del origen de la masa a su impresionante lista de éxitos. Como hace con todas las demás partículas de interacción, el modelo estándar determina exactamente cómo habría de manifestarse la partícula de Higgs en los experimentos. Lo único que no nos dice es cuál debería ser su masa, aunque, una vez conocidas las de la partícula W y el quark top, sí predice el intervalo dentro del cual debería encontrarse. El LEP podría haber observado el bosón de Higgs si este hubiese estado en el extremo más ligero de dicho intervalo, pero, puesto que no fue así, podemos suponer que es demasiado pesado como para haberse producido en el LEP (recuerda que se necesita más energía para generar las partículas más pesadas, en consonancia con $E = mc^2$). Mientras escribimos estas líneas, el colisionador Tevatrón del Laboratorio Nacional Fermi (Fermilab), cerca de Chicago, está tratando de encontrar el bosón de Higgs, de momento sin éxito. Es muy probable que la energía del Tevatrón sea también insuficiente para obtener una señal clara del bosón de Higgs, aunque no se puede descartar que lo encuentre. El LHC es la máquina más potente jamás construida, y debería zanjar definitivamente la cuestión de la existencia del bosón de Higgs, porque su energía es más que suficiente para rastrear todo el intervalo del modelo estándar. En otras palabras, el LHC confirmará el modelo estándar, o bien será su tumba. Enseguida explicaremos por qué estamos tan convencidos de que el LHC conseguirá lo que máquinas anteriores no fueron capaces de hacer, pero antes nos gustaría explicar cómo espera generar las partículas de Higgs.

El LHC se construyó en el interior del mismo túnel circular de 27 kilómetros de largo en el que antes estuvo el LEP, pero, salvo por el propio túnel, todo lo demás era diferente. Un acelerador completamente nuevo ocupa el espacio donde antes estaba el LEP. Es capaz de acelerar protones en direcciones opuestas alrededor del túnel hasta alcanzar una energía igual a 7.000 veces la de su masa. Conseguir que los protones choquen entre sí a esas energías lleva la física de partículas a una nueva era y, si el modelo estándar está en lo cierto, producirá grandes cantidades de partículas de Higgs. Los protones están compuestos por quarks, por lo que, si queremos entender qué debería suceder en el LHC, todo lo que tenemos que hacer es identificar los diagramas de Feynman pertinentes.

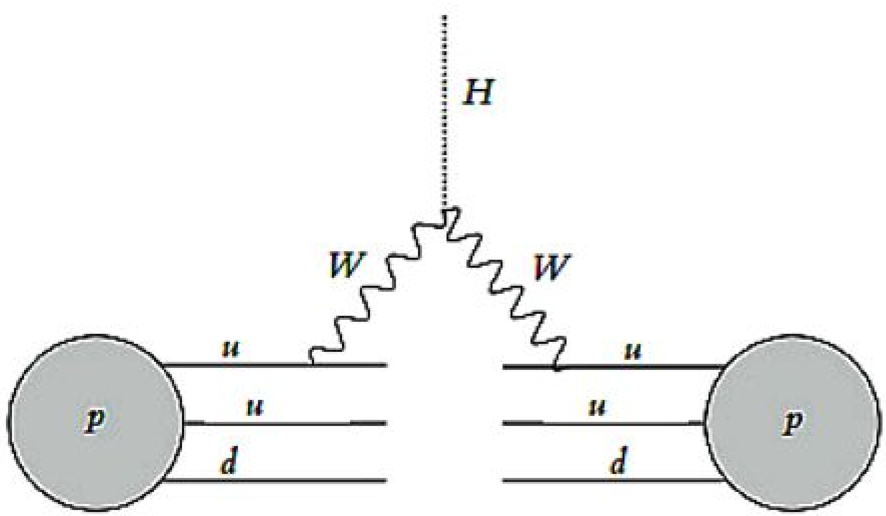

Figura 23

Los vértices más importantes correspondientes a interacciones entre partículas ordinarias del modelo estándar y la de Higgs se pueden ver en la figura 22, donde el bosón de Higgs se representa mediante una línea de puntos que interactúa con el quark más pesado, el top (que se marca con una *t*), y con las partículas *W* y *Z*, también bastante pesadas. No te sorprenderá saber que la partícula responsable del origen de la masa prefiere interaccionar con las partículas más masivas. Sabiendo que los protones constituyen una fuente de quarks, nuestra tarea consiste en averiguar cómo incorporar el vértice del bosón de Higgs en un diagrama de Feynman más amplio. Entonces habremos encontrado la manera de fabricar partículas de Higgs en el LHC. Puesto que los quarks interaccionan con los bosones *W* (o *Z*), es fácil calcular cómo podrían producirse mediante partículas *W* (o *Z*). El resultado se muestra en la figura 23: un quark de cada uno de los protones que intervienen en la colisión (marcados como «*p*») emite una partícula *W* (o *Z*), y estas se fusionan para dar lugar al bosón de Higgs. El proceso se denomina fusión de bosones débiles, y se espera que sea crucial en el LHC.

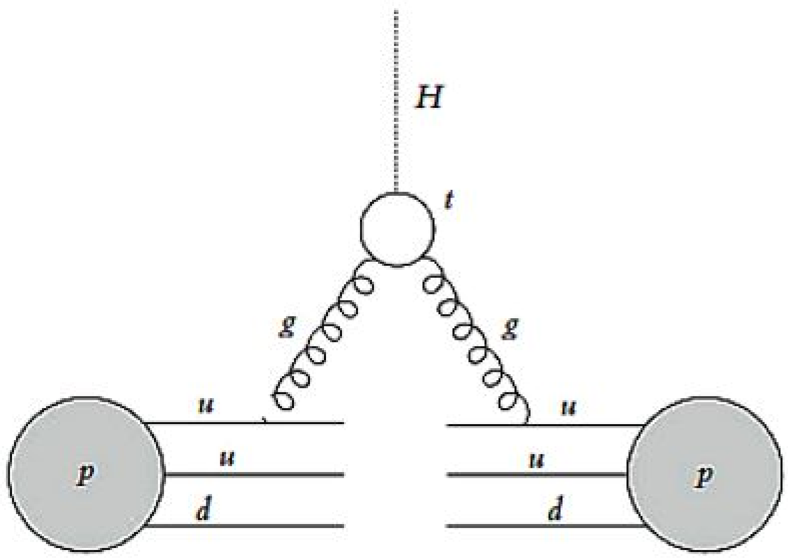

Figura 24

El caso del mecanismo de producción de quarks top es algo delicado. Los quarks top no existen dentro de los protones, por lo que necesitamos encontrar una manera de pasar de los quarks ligeros (up y down) a los quarks top. Estos últimos interactúan con aquellos a través de la fuerza fuerte (es decir, mediante la emisión y absorción de un gluón). El resultado se muestra en la figura 24. Es bastante parecido al proceso de fusión de bosones débiles, con la diferencia de que intervienen gluones en lugar de las partículas *W* o *Z*. De hecho, como este proceso tiene lugar a través de la interacción fuerte, es la manera que ofrece una mayor probabilidad de producir partículas de Higgs en el LHC. Se denomina fusión de gluones.

Este es, por lo tanto, el mecanismo de Higgs, la teoría sobre el origen de la masa en el universo que goza actualmente de una mayor aceptación. Si todo transcurre como está previsto, el LHC confirmará la descripción que hace el modelo estándar del origen de la masa, o bien demostrará que es errónea. Esta es la razón por la que los próximos años van a ser muy emocionantes para la física. Nos encontramos en la típica situación en la que tenemos una teoría que predice en detalle lo que debería suceder en un experimento, y por tanto saldrá reforzada o se desmoronará en función de los resultados del mismo. Pero ¿qué pasa si el modelo estándar es erróneo? ¿Podría suceder algo totalmente diferente e inesperado? Puede que el modelo estándar esté equivocado y que no exista la partícula de Higgs. No se puede negar que cabe esta posibilidad. Los físicos de partículas están entusiasmados porque saben que el LHC necesariamente desvelará algo nuevo. La posibilidad de que el LHC no observe nada nuevo no se contempla porque, sin el bosón de Higgs, el modelo estándar deja de tener sentido a las energías que el LHC es capaz de generar, y sus predicciones simplemente se vienen abajo. El LHC es la primera máquina que se adentra en este territorio inexplorado. Para ser más precisos, si nos vemos obligados a desechar las partes de la ecuación maestra que hacen referencia al bosón de Higgs, perdemos la capacidad de calcular qué es lo que ocurre cuando dos partículas *W* chocan a energías superiores a mil veces la energía de la masa del protón, como sin duda sucederá en el LHC. Volver a introducir el bosón de Higgs hace que las ecuaciones funcionen, pero esta no es la única opción, existen otras formas de hacer que tenga lugar el proceso de dispersión de partículas *W*. Sea cual sea la posibilidad por la que la naturaleza se decante, es absolutamente inevitable que el LHC observe algo que no hayamos visto nunca antes. No es habitual que los físicos lleven a cabo un experimento con una garantía tal de que aparecerán cosas interesantes, y eso es lo que convierte al LHC en el experimento que ha despertado más expectación en muchos años.

Capítulo 8
La curvatura del espacio-tiempo

Hasta ahora hemos imaginado que el espacio-tiempo era fijo e invariable, como un decorado o un escenario tetradimensional en el que «pasan cosas». También hemos aprendido que el espacio-tiempo posee una geometría claramente distinta de la geometría euclidiana. Hemos visto cómo la idea del espacio-tiempo conduce de forma natural a $E = mc^2$ y cómo esta sencilla ecuación y la física que representa se han convertido en los cimientos tanto de nuestras modernas teorías de la naturaleza como del mundo industrializado. Una última pregunta, fruto de nuestra curiosidad, nos acercará aún más al giro final de nuestra historia: ¿es posible que la curvatura del espacio-tiempo sea distinta en diferentes lugares del universo?

La idea del espacio curvo no nos debería pillar de nuevas. El espacio euclidiano es plano, pero el de Minkowski es curvo, lo que significa que en este último no tiene validez el teorema de Pitágoras, sino que en su lugar se aplica la versión con signo negativo de la ecuación para la distancia. Sabemos asimismo que la distancia entre dos puntos en el espacio-tiempo es análoga a la distancia entre distintos puntos sobre un mapa de la Tierra, puesto que la distancia más corta entre dos puntos no es una línea recta en el sentido habitual de la palabra. Así, el espacio-tiempo de Minkowski y la superficie terrestre son ejemplos de espacios curvos. A la vista de lo anterior, la distancia entre dos puntos en el espacio-tiempo de Minkowski siempre satisface que $s^2 = (ct)^2 - x^2$, lo que significa que su curvatura es la misma en todos sus puntos. Lo mismo puede decirse de la superficie terrestre. No obstante, ¿podría tener sentido hablar de una superficie cuya curvatura varía de un punto a otro? ¿Qué aspecto tendría el espacio-tiempo si esto fuese posible, y qué implicaría para los relojes, las reglas y las leyes físicas? Para explorar esta posibilidad, ciertamente enigmática, bajaremos una vez más de las abrumadoras cuatro dimensiones a solo dos, mucho más manejables, y centraremos nuestra atención en la superficie de una esfera.

La curvatura de una bola pulida es la misma en todos sus puntos. Hasta aquí todos de acuerdo. Pero no sucede lo mismo con una pelota de golf, con sus hoyuelos. De la misma manera, la superficie terrestre tampoco es una esfera perfecta. Si la vemos de cerca, encontraremos valles y colinas, montañas y océanos. La ley de la distancia entre dos puntos de la superficie terrestre es solo aproximadamente la misma en toda ella. Para tener una respuesta más precisa, necesitamos saber cómo varía la superficie cuando nuestro recorrido nos lleva por valles y montañas. ¿Podría ser que el espacio-tiempo tuviera hoyuelos como los de una pelota de golf, o valles y montañas como la Tierra? ¿Es posible que «se combe» entre dos puntos?

Cuando deducíamos la ecuación para la distancia en el espacio-tiempo, parecía que no cabía la posibilidad de que variase de un lugar a otro. De hecho, hemos argumentado que la expresión precisa de la ecuación de la distancia venía determinada por los requisitos que imponía la causalidad. Pero hemos aceptado una suposición muy importante. Hemos supuesto que el espacio-tiempo es igual en todas partes. Se puede afirmar que esta suposición funciona muy bien y las evidencias experimentales la avalan en buena medida, puesto que ha sido crucial para poder llegar a $E = mc^2$, pero quizá no hemos prestado suficiente atención a los detalles. ¿Es posible que el espacio-tiempo no sea igual en todas partes? ¿Podría esto tener consecuencias observables? La respuesta es un sí rotundo. Para llegar a esta conclusión, sigamos los pasos de Einstein por última vez. Este camino supuso para él diez años de duras luchas, hasta llegar a otro destino majestuoso: la teoría de la relatividad general.

El recorrido que condujo a Einstein a la relatividad especial tuvo su punto de partida en una pregunta sencilla: ¿qué significaría el hecho de que la velocidad de la luz fuese la misma para todos los observadores? El camino hacia la relatividad general, mucho más tortuoso, partió de una observación igualmente sencilla que le impresionó tanto que no se quedó tranquilo hasta que comprendió su verdadero significado. El hecho es el siguiente: todas las cosas caen hacia el suelo con la misma aceleración. Eso es todo. Eso es lo que provocó su entusiasmo. Hay que tener una cabeza como la suya para intuir la profundidad de lo que se oculta tras un hecho aparentemente tan trivial.

En realidad, se trata de un hecho famoso de la física, conocido mucho antes de Einstein. Se atribuye a Galileo el mérito de ser el primero en darlo por cierto. Dice la leyenda que subió a lo alto de la Torre Inclinada de Pisa, dejó caer desde allí dos bolas de distintas masas y vio cómo llegaban al suelo a la vez. Lo importante no es si realizó el experimento o no, sino que dedujo correctamente que ese sería su resultado. Sabemos sin lugar a dudas que el experimento se acabó realizando, aunque no en Pisa, sino en la Luna, en 1971, por el comandante del Apolo 15, David Scott, que dejó caer una pluma y un martillo y observó cómo llegaban al suelo al mismo tiempo. No podemos realizar el experimento en la Tierra porque una pluma siente el efecto del viento, que ralentiza su caída, pero su resultado es espectacular cuando se lleva a cabo en el alto vacío existente en la superficie lunar. Obviamente, no es necesario ir a la Luna para comprobar que Galileo estaba en lo cierto, pero eso no le resta ningún encanto al vídeo de la demostración del Apolo 15, que merece mucho la pena. Lo importante es que, si pueden despreciarse los factores que complican la situación, como el aire, todo cae a la misma velocidad. La pregunta evidente es: ¿por qué es así? ¿Por qué caen a la misma velocidad, y por qué le estamos dando a esto tanta importancia?

Imagina que estás en un ascensor inmóvil. Tus pies pisan el suelo con firmeza y la cabeza te pesa sobre los hombros. Tu estómago está en su sitio, en el interior de tu cuerpo. Ahora imagina que tienes la mala suerte de encontrarte dentro de un ascensor que cae en picado hacia el suelo porque se han cortado los cables. Puesto que todas las cosas caen a la misma velocidad, tus pies ya no se apoyan sobre el suelo, la cabeza no te pesa sobre los hombros y tu estómago flota libremente dentro de tu cuerpo. En resumen, están en ingravidez. Esto es muy importante, porque es exactamente como si alguien hubiese pulsado un botón para apagar la gravedad. Es lo mismo que sentiría un astronauta que flotase libremente en el espacio. Para ser más precisos, mientras el ascensor cae no puedes realizar en su interior ningún experimento que te permita distinguir entre las posibilidades de que estés cayendo hacia la Tierra o flotando en el espacio exterior. Obviamente, sabes cuál es la respuesta, porque has entrado en el ascensor, y es posible que el indicador luminoso esté acercándose al «piso bajo» a una velocidad alarmante, pero eso no es lo importante. Lo importante es que las leyes físicas son idénticas en ambos casos. Esto es lo que le afectó tan profundamente a Einstein. La universalidad de la caída libre tiene un nombre: se denomina principio de equivalencia.

En general, la gravedad varía de un lugar a otro. Es más fuerte cuanto más cerca de la Tierra estés, aunque no hay demasiada diferencia entre el nivel del mar y la cima del Everest. Es mucho más débil en la Luna, porque su masa es mucho menor que la de la Tierra. Análogamente, la intensidad de la gravedad del Sol es mucho mayor que la de la Tierra. Pero, independientemente del lugar del sistema solar donde te encuentres, la fuerza de la gravedad en tus inmediaciones no variará demasiado. Imagina que estás de pie en el suelo. La gravedad en tus pies es ligeramente más intensa que en tu cabeza, pero la diferencia es muy pequeña. De hecho, será menor para una persona baja que para una alta. Recurramos una vez más a un experimento mental e imaginemos cosas cada vez más pequeñas, hasta llegar a un «ascensor» diminuto, tan pequeño que podemos suponer que la gravedad en su interior es constante. Dentro del ascensor diminuto hay físicos aún más diminutos cuya tarea consiste en realizar experimentos dentro de él. Imaginemos ahora que el ascensor está en caída libre. En ese caso, ninguno de los diminutos físicos pronunciaría jamás la palabra «gravedad». Una descripción del mundo basada en las observaciones realizadas por este grupo de diminutos físicos en caída libre tiene la sorprendente cualidad de que la gravedad sencillamente no existe. Nadie pronunciaría con voz aguda la palabra «gravedad» porque dentro del ascensor no se podría efectuar ninguna observación que indicase que tal cosa existe. Pero ¡espera un momento! Está claro que hay algo que hace que la Tierra orbite alrededor del Sol. ¿Se trata tan solo de un juego de manos, o hay aquí algo importante?

Dejemos por un momento la gravedad y el espacio-tiempo y volvamos a la analogía con la curvatura de la superficie terrestre. Un piloto que tenga intención de viajar de Manchester a Nueva York evidentemente necesita tener en cuenta que la superficie terrestre es curva. Por el contrario, cuando vas del salón a la cocina puedes ignorar sin problemas la curvatura de la Tierra y suponer que la superficie es plana. Dicho de otro modo, la geometría es (muy aproximadamente) euclidiana. Esta es la razón, en definitiva, por la que los humanos tardamos tanto tiempo en descubrir que la Tierra no es plana, sino esférica: su radio de curvatura es mucho mayor que las distancias que manejamos habitualmente en nuestra vida diaria. Imagina que troceásemos la superficie terrestre en un montón de pequeños pedazos cuadrados, como se muestra en la figura 25. Cada uno de los pedazos es prácticamente plano, y cuanto más pequeños los hagamos, más planos serán. En cada pedazo, es válida la geometría euclidiana: las líneas paralelas no se intersecan y el teorema de Pitágoras funciona. La curvatura de la superficie solo se pone de manifiesto cuando tratamos de cubrir un área más extensa de la superficie terrestre con nuestros pedazos euclidianos. Necesitamos coser juntos montones de estos pequeños remiendos para reconstruir fielmente la superficie curva de la Tierra.

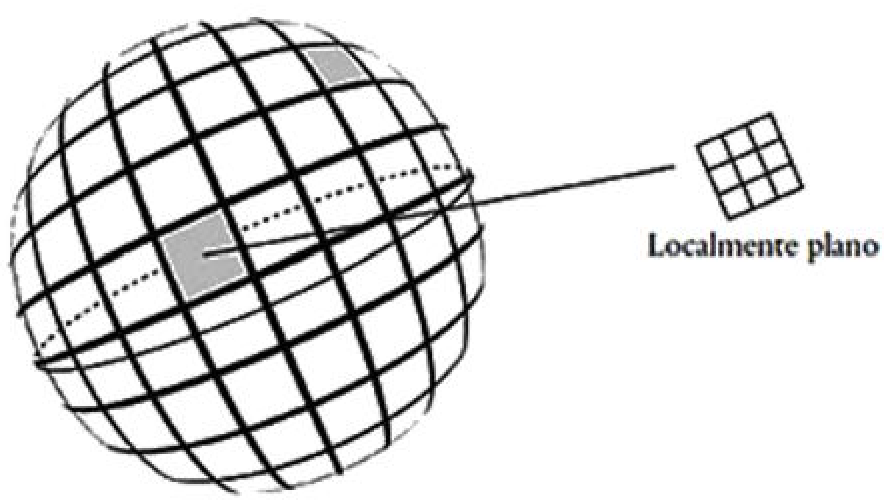

Figura 25

Volvamos ahora a nuestro pequeño ascensor en caída libre e imaginemos que hay muchos otros como él, uno en cada punto del espacio-tiempo. El espacio-tiempo dentro de cada uno de ellos es aproximadamente el mismo en todos los puntos, y esta aproximación mejora si disminuye el tamaño del ascensor. Recuerda que en el capítulo 4 hemos tenido la precaución de indicar que estábamos suponiendo que el espacio-tiempo debía ser «invariable e igual en todas partes», y que eso fue fundamental para poder desarrollar la fórmula para la distancia en el espacio-tiempo de Minkowski. Puesto que espacio-tiempo dentro de cada ascensor diminuto es también «invariable e igual en todas partes», se deduce que podemos aplicar la fórmula de Minkowski para la distancia dentro de cada uno de los ascensores.

Afortunadamente, empieza a atisbarse la analogía con la esfera. Donde antes decíamos «pedazo plano de la superficie terrestre», ahora diremos «ascensor en caída libre en el espacio-tiempo», y donde decíamos «superficie curva de la Tierra», diremos ahora «espacio-tiempo curvo». De hecho, esta es la razón por la que los físicos suelen referirse al espacio-tiempo de Minkowski como «espacio-tiempo plano». El espacio-tiempo de Minkowski desempeña en esta analogía el papel del espacio plano euclidiano. En el libro, hemos reservado el uso de la palabra «plana» para la geometría euclidiana, y el signo negativo en la versión de Minkowski del teorema de Pitágoras nos ha llevado a utilizar el término «curvo». A veces, el uso del lenguaje no es tan sencillo como nos gustaría. Por lo tanto, la unión de los pequeños ascensores en el espacio-tiempo es análoga a la de los pequeños pedazos de la esfera. La gravedad ha desaparecido de cada uno de los ascensores, pero podemos imaginar que unimos los pequeños pedazos de Minkowski para formar un espacio-tiempo curvo, como hemos hecho con los pedazos planos euclidianos para reconstruir la superficie curva de la Tierra. Si no hubiese gravedad, nos bastaría un único gran ascensor cuya geometría sería la de Minkowski. Así, lo que acabamos de aprender es que, si la gravedad está presente en los alrededores, podemos hacer que desaparezca, pero solo a costa de hacer que el espacio-tiempo se curve.

Dándole la vuelta, parece que hemos descubierto que la fuerza de la gravedad no es en realidad más que una señal de que el espacio-tiempo es curvo. ¿Es realmente así? ¿Cuál es la causa de la curvatura? Puesto que la gravedad está presente en las inmediaciones de la materia, podríamos llegar a la conclusión de que el espacio-tiempo se curva también en las inmediaciones de la materia y, puesto que $E = mc^2$, de la energía. El grado de curvatura es algo sobre lo que de momento no hemos hablado. Y no pensamos decir mucho al respecto porque, como suelen decir los físicos, no es trivial. En 1915, Einstein escribió una ecuación capaz de cuantificar con precisión cuánta curvatura debía existir en presencia de materia y energía. Su ecuación supone una mejora respecto a la antigua ley de gravitación de Newton, porque satisface automáticamente los requisitos de la teoría de la relatividad especial (cosa que no sucede con la ley de Newton). Por supuesto, en la mayoría de los casos que nos encontramos en nuestra vida cotidiana, los resultados que da esta nueva ecuación son muy similares a los de la teoría de Newton, pero pone de manifiesto que esta no es más que una aproximación de aquella. Para entender las distintas formas de pensar sobre la gravedad, veamos cómo describirían Newton y Einstein el movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol. Newton diría algo como: «La Tierra se ve atraída hacia el Sol por la fuerza de la gravedad, y esa atracción evita que salga despedida hacia el espacio y la obliga a moverse describiendo una enorme trayectoria circular».[16] Es parecido a hacer girar alrededor de tu cabeza una bola atada a una cuerda. La bola seguirá una trayectoria circular porque la tensión de la cuerda impide que haga otra cosa, pero, si la cortases, la bola continuaría en línea recta. De manera análoga, si apagases súbitamente la gravedad solar, según Newton la Tierra saldría despedida en línea recta hacia el espacio exterior. La descripción de Einstein es muy diferente, y dice así: «El Sol es un objeto con masa y, como tal, deforma el espacio-tiempo en sus inmediaciones.

La Tierra se mueve libremente a través del espacio-tiempo, pero la curvatura de este hace que la Tierra se mueva en círculos».

Para ver cómo es posible que una fuerza aparente no sea más que una consecuencia de la geometría, podemos pensar en dos amigos que caminan sobre la superficie terrestre. Se les indica que partan del ecuador y caminen en paralelo en dirección norte, según dos líneas perfectamente rectas, cosa que hacen obedientemente. Un tiempo después, verán que se van acercando y, si continúan andando durante el tiempo suficiente, sus caminos se cruzarán en el Polo Norte. Habiendo comprobado que ninguno de los dos ha hecho trampas y se ha desviado de su trayectoria, bien podrían llegar a la conclusión de que entre ellos había actuado una fuerza que los había atraído entre sí mientras caminaban hacia el norte. Esta es una forma de entender la situación, pero, obviamente, existe otra explicación: la superficie de la Tierra es curva. La Tierra hace prácticamente lo mismo mientras gira alrededor del Sol.

Para entender mejor de qué estamos hablando, fijémonos de nuevo en uno de nuestros intrépidos caminantes sobre la superficie terrestre. Como antes, se le pide que camine siempre en línea recta. A escala local, puede seguir esta instrucción sin ninguna confusión, porque en cualquier punto de la Tierra puede suponer que la geometría euclidiana es perfectamente válida y, en consecuencia, tiene muy clara la idea de una línea recta. Aun así, su recorrido acaba siendo circular, aunque podamos pensar que el círculo está compuesto por innumerables pequeñas líneas rectas. Volvamos ahora al caso de la gravedad y el espacio-tiempo. La idea de una línea recta a través del espacio-tiempo curvo es completamente análoga a la de una línea recta sobre la superficie terrestre. La dificultad surge porque el espacio-tiempo es una «superficie» tetradimensional, mientras que la superficie terrestre tiene solo dos dimensiones. Pero, una vez más, la dificultad tiene más que ver con lo limitada que es nuestra imaginación que con una mayor complejidad matemática. De hecho, las matemáticas de la geometría sobre la superficie de una esfera no son más difíciles que las de la geometría en el espacio-tiempo. Partiendo de la idea de las líneas rectas (también llamadas geodésicas) en el espacio-tiempo, nos atreveremos a sugerir cómo funciona la gravedad. Hemos visto que podemos hacer que la gravedad desaparezca a cambio de introducir el espacio-tiempo curvo, y que, localmente, este es el espacio-tiempo «plano» de Minkowski. A estas alturas del libro, sabemos muy bien cómo se mueven los objetos en un entorno como ese. Por ejemplo, si una partícula está en reposo seguirá así (a menos que aparezca algo que la empuje o tire de ella). Eso significa que sigue una trayectoria espaciotemporal en la que se desplaza únicamente a lo largo del eje temporal. De la misma manera, los objetos que se mueven con velocidad constante seguirán moviéndose en la misma dirección y a la misma velocidad (a menos, de nuevo, que aparezca algo que los empuje o tire de ellos). En este caso, se moverán trazando líneas rectas inclinadas respecto al eje temporal en el diagrama espaciotemporal. Así, en cada uno de los diminutos pedazos de espacio-tiempo, todos los objetos deberían describir líneas rectas, a menos que sobre ellos actúe alguna influencia externa. La imagen completa de la gravedad se pone de manifiesto cuando unimos todos los pequeños pedazos, pues es en ese momento cuando las líneas rectas individuales se juntan para dar lugar a algo más interesante, como la órbita de un planeta alrededor del Sol. No hemos dicho cómo se han de unir los pedazos para dar lugar a la curvatura del espacio-tiempo, algo que viene exactamente determinado por la ecuación de Einstein de 1915. Pero el resultado final no podría ser mucho más sencillo: hemos hecho que la gravedad desaparezca y la hemos sustituido por geometría pura.

Por lo tanto, la gravedad es geometría y todas las cosas se mueven describiendo líneas rectas en el espacio-tiempo, a menos que algo las desvíe. Pero por cualquier punto dado del espacio-tiempo pasa un número infinito de geodésicas, exactamente igual que por cualquier punto de la superficie terrestre (o de cualquier superficie, en realidad) pasan infinitas líneas rectas. ¿Cómo calcularemos entonces la trayectoria espaciotemporal que seguirá un objeto? La respuesta es muy sencilla: las circunstancias son las que la dictan. Por ejemplo, la persona que camina alrededor del mundo podría echar a andar en cualquier dirección. Elige qué camino seguir. De la misma manera, si se deja caer cerca de la superficie terrestre un objeto que estaba inicialmente en reposo, empezará a describir una geodésica, mientras que si otro objeto se lanza, la geodésica que describa será diferente. Si conocemos la dirección en la que se mueve un objeto a través del espacio-tiempo en un punto determinado, sabremos por tanto cuál es su trayectoria completa. Más aún, todos los objetos que se mueven en esa misma dirección describen necesariamente la misma trayectoria, con independencia de sus propiedades internas (como la masa o la carga eléctrica). Simplemente siguen una línea recta, eso es todo. Así, la imagen de la gravedad que ofrece el espacio-tiempo curvo recoge perfectamente el principio de equivalencia que tanto intrigó a Einstein.

Nuestras cavilaciones sobre la naturaleza del espacio y del tiempo nos han llevado a entender que la Tierra no hace otra cosa que caer en línea recta alrededor del Sol. Lo único que sucede es que esta línea recta se encuentra en un espacio-tiempo curvo, y se manifiesta como una órbita (casi) circular en el espacio. No hemos llegado a demostrar que el Sol deforma el espacio-tiempo de tal manera que la Tierra cae describiendo una geodésica cuya sombra en el espacio tridimensional es (casi) circular. Y no lo hemos hecho simplemente porque requiere demasiadas matemáticas. También requiere que hagamos una afirmación sobre la manera en que los objetos curvan el espacio-tiempo, algo que hemos tratado de evitar. La complejidad matemática es la razón principal por la que Einstein tardó diez años en desarrollar la teoría. La relatividad general es bastante sencilla conceptualmente, pero matemáticamente es difícil, aunque no cabe duda de que esta dificultad no empaña su belleza. De hecho, muchos físicos consideran que la teoría de la relatividad general de Einstein es la más bella de todas nuestras teorías de la naturaleza.

Es muy probable que hayas caído en la cuenta de que nada de lo que hemos dicho se refería a ningún tipo de objeto en concreto. En particular, la propia luz también debería moverse a través del espacio-tiempo según una geodésica. En cada uno de los pedazos de espacio-tiempo que atraviesa, la luz se desplaza a lo largo de una de las líneas de 45 grados que hemos visto en el capítulo 4, pero, cuando unimos todos los pedazos, obtenemos una trayectoria que se curva en el espacio. Esta curvatura simplemente refleja la manera en que la presencia de masa y de energía hace que el espacio-tiempo se combe. Igual que en el caso de la órbita terrestre alrededor del Sol, su trayectoria a través del espacio es una sombra de su geodésica tetradimensional. El alcance del principio de equivalencia y de la curvatura de la luz que este implica queda de manifiesto en el siguiente experimento mental.

Imagina que estás en la Tierra y disparas un haz de láser en dirección horizontal. ¿Qué le sucede? El principio de equivalencia nos da la respuesta: la luz cae hacia el suelo con la misma velocidad exactamente que cualquier otro objeto que, partiendo del reposo, se soltase en el preciso momento en que se dispara el láser. Einstein predice que, si Galileo hubiese dispuesto de un láser y lo hubiese disparado horizontalmente desde la Torre Inclinada de Pisa en el mismo instante en que dejó caer la bola de cañón, el haz de láser habría llegado al suelo a la vez que la bola. El problema con este experimento en la práctica es que la curvatura de la superficie terrestre hace que esta se aleje muy rápidamente y el láser nunca llegaría a tocar el suelo, porque este se acabaría antes. Si, en lugar de lo anterior, imaginamos que la Tierra es plana, el problema desaparece y cabría esperar que el láser llegase al suelo exactamente a la vez que la bola de cañón, aunque a muchísima distancia de esta. De hecho, si la bola tardase un segundo en caer, el láser tocaría el suelo a una distancia de un segundo luz de la torre, que equivale a prácticamente 300.000 kilómetros.

No cabe duda de que la descripción de la gravedad como geometría es enormemente satisfactoria y permite sacar conclusiones sorprendentes, pero, como hemos venido repitiendo a lo largo del libro, carecería de utilidad en última instancia si no diese lugar a predicciones que puedan ser comprobadas experimentalmente. Por fortuna para Einstein, solo tuvo que esperar cuatro años para ver cómo se confirmaban sus insólitas predicciones.

La primera gran prueba de la nueva teoría de Einstein llegó en 1919, cuando Arthur Eddington, Frank Dyson y Charles Davidson publicaron un trabajo titulado «A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919» («Una determinación de la desviación de la luz por el campo gravitatorio solar, a partir de las observaciones realizadas durante el eclipse total del 29 de mayo de 1919»). El trabajo se publicó en las *Philosophical Transactions* de la Royal Society de Londres y contiene estas palabras imperecederas: «Ambos apuntan a la desviación total de 1,75 segundos de arco que predice la teoría de la relatividad general de Einstein». De la noche a la mañana, Einstein se convirtió en una superestrella global. Los nada desdeñables esfuerzos de Eddington, Dyson y Davidson habían refrendado su esotérica teoría sobre el espacio-tiempo curvo: para ver el eclipse tuvieron que organizar expediciones a Sobral, en Brasil, y Príncipe, en la costa occidental de África. El eclipse les permitió observar las estrellas que normalmente quedan ocultas por la luz del Sol. La luz de estas estrellas es la más apropiada para comprobar la teoría de Einstein, ya que es la que debería sufrir una mayor desviación, pues la curvatura del espacio-tiempo es mayor cuanto más cerca está uno del Sol. Básicamente, Eddington, Dyson y Davidson querían ver si variaba la posición de las estrellas a medida que el Sol se desplazaba por el firmamento. En un sentido muy literal, el Sol hace que el espacio-tiempo se curve y actúa como una lente que distorsiona la distribución de las estrellas en el firmamento.

Hoy en día, la teoría de Einstein se ha comprobado con gran precisión gracias a unos de los objetos más extraordinarios del universo: las estrellas de neutrones giratorias llamadas púlsares. Las estrellas de neutrones y los púlsares, de los que ya hemos hablado al final del capítulo 6, abundan en el universo. De entre todos los objetos que podemos estudiar en detalle desde la Tierra utilizando telescopios, las estrellas de neutrones giratorias destacan porque nos permiten observar distorsiones importantes del espacio-tiempo con un preciso patrón temporal, cuya estabilidad está a la altura de los mejores relojes atómicos. Si quisiésemos imaginar un objeto que nos ofreciese un entorno ideal en el que poner a prueba la teoría general de la relatividad, nos costaría encontrar uno mejor que el púlsar. Los púlsares marcan su patrón temporal mediante la emisión de haces de ondas de radio mientras giran. Puedes imaginártelo como un faro, cuyo fino haz de luz barre el horizonte alrededor de una vez por segundo. Estos objetos maravillosos y útiles fueron descubiertos accidentalmente en 1967 por Jocelyn Bell Burnell y Tony Hewish. Te preguntarás cómo es posible toparse con una estrella de neutrones por accidente. La respuesta es que Bell Burnell estaba buscando fluctuaciones en la intensidad de las ondas de radio emitidas por objetos lejanos llamados cuásares. Se sabía que las fluctuaciones se debían a los vientos solares que soplan en el espacio interestelar. Como buena científica, Bell siempre estaba buscando cosas interesantes en sus datos y, una noche de noviembre, detectó una señal regular que, naturalmente, tanto ella como su director de tesis, Hewish, supusieron que era de origen humano. Observaciones posteriores los convencieron de que no podía ser así, y de que la señal debía provenir de una fuente extraterrestre. «Me fui a casa esa noche muy contrariada —contaría más tarde Bell sobre sus observaciones—. Ahí estaba yo, tratando de sacar una tesis doctoral mediante la aplicación de una técnica nueva, y a unos estúpidos hombrecitos verdes se les tenía que ocurrir elegir mi antena y mi frecuencia para comunicarse con nosotros».

Aunque los púlsares son bastante habituales en el universo, solo conocemos un caso de dos púlsares que orbiten uno alrededor del otro. Los radioastrónomos probaron su existencia en 2004, y observaciones posteriores han dado lugar a la comprobación más precisa de la teoría de Einstein que se ha llevado a cabo hasta la fecha.

El púlsar doble es algo extraordinario. Ahora sabemos que está formado por dos estrellas de neutrones que distan alrededor de un millón de kilómetros entre sí. Imagina la violencia de un sistema así. Dos estrellas, cada una con la masa del Sol comprimida en el tamaño de una ciudad, que rotan cientos de veces por segundo y se persiguen mutuamente a una distancia apenas tres veces mayor que la que separa a la Tierra de la Luna. La ventaja de poder utilizar dos púlsares para comprobar la teoría de Einstein es que las ondas de radio que emite uno de ellos a veces pasan muy cerca del otro. Esto significa que el haz de ondas de radio extremadamente periódico atraviesa una región del espacio-tiempo de gran curvatura, lo que lo ralentiza. Observaciones detalladas permiten medir el retardo y así confirmar la teoría de Einstein.

Otra ventaja del sistema del púlsar doble es que las estrellas, al orbitar la una alrededor de la otra, inducen ondulaciones en el espacio-tiempo que se propagan hacia fuera. Las ondulaciones detraen energía del movimiento rotatorio del par de estrellas, lo que provoca que estas se vayan acercando poco a poco en un movimiento en espiral. Estas ondulaciones se denominan ondas gravitatorias, y su existencia constituye otra predicción de la teoría de Einstein (en la gravitación newtoniana no existen). En lo que supone uno de los mayores éxitos de la ciencia experimental, utilizando el telescopio Parkes (de 64 metros), en Australia, el telescopio Lovell (de 76 metros), situado en Jodrell Bank, en el Reino Unido, y el Green Bank (de 100 metros), ubicado en Virginia Occidental, han medido la velocidad a la que las dos estrellas del púlsar se acercan en su movimiento en espiral, obteniendo un valor de tan solo 7 milímetros al día, que concuerda con la predicción de la relatividad general. La hazaña es asombrosa. Se trata de estrellas de neutrones giratorias que orbitan la una alrededor de la otra a una distancia de un millón de kilómetros entre sí, y a 2.000 años luz de la Tierra. Su comportamiento se predijo milimétricamente aplicando una teoría desarrollada en 1915 por un hombre que quería entender por qué dos pedazos de materia que se habían soltado desde una torre inclinada en Pisa tres siglos antes habían llegado al suelo en el mismo instante.

Por muy ingeniosas y misteriosas que resulten las mediciones del púlsar doble, la relatividad general también se deja notar aquí en la Tierra en un fenómeno mucho más ordinario. El correcto funcionamiento del sistema de satélites GPS, que cubre todos los rincones del mundo, depende de la precisión de las teorías de Einstein. Se trata de una red de veinticuatro satélites, cada uno de los cuales orbita alrededor de la Tierra a 20.000 kilómetros de altitud y completa dos vueltas al planeta por día. Los satélites incorporan relojes de alta precisión que utilizan para «triangular» posiciones en la Tierra. En sus órbitas a gran altitud, los relojes experimentan un campo gravitatorio más débil, lo que significa que para ellos la curvatura del espacio-tiempo es distinta que para relojes similares que se encuentren en la Tierra. Este efecto hace que los relojes se adelanten unos 45 microsegundos cada día. Aparte del efecto gravitatorio, debido a la alta velocidad a la que se desplazan los satélites (alrededor de 14.000 kilómetros por hora), la dilatación temporal que predice la teoría especial de Einstein hace que los relojes se retrasen 7 microsegundos al día. En conjunto, los dos efectos resultan en un adelanto neto de 38 microsegundos al día. No parece mucho, pero ignorarlo llevaría en unas pocas horas a un fallo total del sistema GPS. La luz recorre unos 30 centímetros en un nanosegundo, que es una milmillonésima de segundo. Por tanto, 38 microsegundos equivalen a desviaciones de unos 10 kilómetros en la posición cada día, lo que haría que la navegación no fuese precisa en absoluto. La solución es muy sencilla: los relojes de los satélites se retrasan 38 microsegundos cada día, lo que permite que el sistema funcione con imprecisiones del orden de metros, en lugar de kilómetros.

El adelanto de los relojes de los satélites GPS respecto a los de la superficie terrestre se puede entender fácilmente utilizando lo que hemos aprendido en este capítulo. De hecho, la aceleración de los relojes es en realidad una consecuencia del principio de equivalencia. Para entender cómo se produce, retrocedamos en el tiempo hasta 1959, y entremos en un laboratorio de la Universidad de Harvard. Robert Pound y Glen Rebka se han propuesto diseñar un experimento para «dejar caer» luz desde lo alto de su laboratorio hasta el sótano, 22,5 metros más abajo. Si la luz cae siguiendo estrictamente el principio de equivalencia, entonces, al caer, su energía debería aumentar exactamente en la misma proporción que para cualquier otro objeto que cayese.[17] Necesitamos saber qué le sucede a la luz a medida que va ganando energía. En otras palabras, ¿qué es lo que Pound y Rebka esperarían encontrar cuando la luz llegase al extremo inferior de su laboratorio? Solo hay una manera de que se incremente la energía de la luz. Sabemos que su velocidad no puede aumentar, porque ya alcanza el límite de velocidad universal, pero sí puede hacerlo su frecuencia. Recuerda que podemos pensar que la luz sigue un movimiento ondulatorio, una serie de picos y valles como los de las ondas que se producen en el agua cuando lanzamos una piedra a un estanque en reposo. La frecuencia de las ondas es simplemente el número de picos (o valles) que pasan por un determinado punto cada segundo, y estos picos y valles se pueden utilizar para marcar el paso de un reloj. En particular, en el experimento de Pound y Rebka podríamos imaginar a Pound sentado junto a la fuente de luz en lo alto de la torre. Puede contar cuántos picos de luz se emiten por cada latido de su corazón. Supongamos ahora que en el sótano Rebka está sentado junto a una fuente de luz idéntica. También él puede contar cuántos picos se corresponden con cada latido de su corazón, y debería obtener el mismo resultado que su colega, porque los relojes de las fuentes de luz son idénticos, y los corazones también. Vale, solo obtendrán exactamente el mismo número si tienen corazones realmente idénticos, cosa que no sucederá, pero, para nuestro razonamiento, podemos suponer que sus corazones laten al unísono. Pensemos ahora en cómo ve Rebka, sentado en el sótano, la luz que proviene de la fuente que maneja Pound en lo alto. Como la energía de la luz ha aumentado, y con ella su frecuencia, Rebka verá que los picos se suceden más rápido de lo que lo harían si tuviese la fuente de luz al lado. Pero los picos están sincronizados con el corazón de su colega, lo que significa que según Rebka, que está en el sótano, el corazón de Pound estaría latiendo a mayor velocidad, y por tanto envejecería más rápido. El efecto es minúsculo, equivalente a un adelanto de un 1 segundo cada 13 millones de años. El hecho de que Pound y Rebka lograsen diseñar un experimento capaz de detectarlo demuestra su habilidad y su ingenio. Esta aceleración del tiempo es precisamente la que se produce en los relojes de los satélites GPS. Están a una altitud muy superior a los 22,5 metros del laboratorio de

Harvard, pero la idea fundamental es la misma: los relojes van más rápido cuando los campos gravitatorios son más débiles.

La teoría de la relatividad general de Einstein, maravillosamente confirmada por los experimentos, ha hecho que veamos el espacio-tiempo no como una combinación invariable del espacio y el tiempo, sino como una entidad más dinámica, que puede verse afectada por la presencia de materia y, puesto que, gracias a $E = mc^2$, sabemos que la masa y la energía son intercambiables, también por la de energía. A su vez, la estructura dinámica del espacio-tiempo rige la manera en que los objetos se mueven en él. Ya no podemos pensar en el espacio como un escenario inerte en el que las cosas suceden, y en el tiempo como el avance inmutable y absoluto de un reloj gigante en el firmamento. Quizá la lección más importante que pueda extraerse de esta revisión radical es que no conviene extrapolar nuestras experiencias cotidianas más allá de su ámbito natural. ¿Por qué razón deberían los objetos que se mueven muy rápido seguir las mismas leyes que los objetos con los que nos encontramos en la vida diaria, que se mueven a velocidades bajas? En el mismo sentido, ¿por qué habríamos de poder inferir el comportamiento de objetos muy masivos a partir del estudio de los muy ligeros?

Parece evidente que nuestras experiencias cotidianas no nos han servido bien como guías y, como Einstein nos ha hecho ver, la imagen de la naturaleza a un nivel más fundamental es mucho más elegante. Al combinar conceptos tan dispares como la masa y la energía, el espacio y el tiempo, y, en última instancia, la gravedad, las teorías especial y general de Einstein perdurarán eternamente como dos de los mayores logros del intelecto humano. Es muy posible que, en el futuro, nuevas ideas, basadas en nuevas observaciones y experimentos, hagan necesaria una revisión de los planteamientos que hemos presentado aquí. De hecho, muchos físicos ya vislumbran un nuevo orden, en su búsqueda de teorías más precisas y de más amplio alcance. La lección de humildad de que no debemos extrapolar más allá de las pruebas que tengamos no se limita a la relatividad. El otro gran avance de la física del siglo XX fue el descubrimiento de la teoría cuántica, que rige el comportamiento de todos los objetos a escala atómica, o más pequeña aún. Nadie habría podido imaginar nunca cómo funciona la naturaleza a distancias pequeñas basándose únicamente en la experiencia cotidiana. Para los seres humanos, cuyas observaciones directas se limitan a las «cosas grandes», la teoría cuántica es completamente contraria a nuestra intuición, pero es tan determinante para una parte tan importante de nuestras vidas en este siglo XXI, desde las imágenes médicas a las últimas tecnologías de computación, que hemos de aceptarla, tanto si nos gusta como si no.

Hoy en día los físicos se enfrentan a un dilema. La teoría de la relatividad general de Einstein, nuestra mejor teoría de la gravitación, no encaja con la teoría cuántica. Alguna de las dos, o ambas, han de revisarse. ¿«Se descompone» el espacio-tiempo a escalas diminutas? Quizá ni siquiera existe como tal, sino que es tan solo una ilusión creada por el creciente conjunto de «cosas que pasan». ¿Son los objetos fundamentales de la naturaleza diminutas vibraciones de energía llamadas cuerdas? ¿O la solución se encuentra en otra teoría aún por descubrir? Esta es la frontera de la física fundamental y, para quienes la pueblan, dirigir su mirada hacia lo desconocido es emocionante y apasionante.

Al terminar un libro sobre las teorías de la relatividad de Einstein, es muy fácil contribuir al desafortunado culto a la personalidad que rodea al gran hombre, pero no es esa nuestra intención. De hecho, es probable que ese culto dificulte el progreso en el futuro, porque puede dar la impresión de que la ciencia es el coto privado de superhombres dotados de mentes privilegiadas a las que el resto de nosotros no tenemos acceso. Nada más lejos de la realidad. La relatividad no fue obra de un solo hombre, aunque un libro dedicado a ella pueda a veces dar esa impresión. Einstein fue sin duda uno de los grandes practicantes del arte de la ciencia, pero, como hemos repetido a lo largo del libro, llegó a su revisión radical del espacio y el tiempo gracias a la curiosidad y el ingenio de muchos otros. No fue una anomalía de la naturaleza, ni su inteligencia era sobrenatural. Fue simplemente un gran científico que hizo lo que hacen los científicos: se tomó en serio las cosas sencillas y llevó hasta el final sus consecuencias lógicas. Su genio radica en asumir con todas sus consecuencias la constancia de la velocidad de la luz, resultante de las ecuaciones de Maxwell, y el principio de equivalencia, ya enunciado por Galileo.

Esperamos haber escrito un libro que permita que los no científicos comprendan las hermosas teorías de Einstein. Esta comprensión está al alcance de los no expertos porque la ciencia en realidad no es tan difícil. Si partimos desde el lugar apropiado, el camino hacia una comprensión más profunda de la naturaleza se recorre con pasos pequeños y cuidadosos. La ciencia es fundamentalmente una tarea modesta, y esta modestia es la clave de su éxito. Las teorías de Einstein inspiran respeto porque, hasta donde sabemos, son correctas, pero no son libros sagrados. Se mantendrán en pie, por decirlo claramente, hasta que aparezca algo mejor. Asimismo, a las grandes mentes científicas no se las venera como profetas, sino como diligentes mediadores en nuestra comprensión de la naturaleza. Algunos de sus nombres son muy populares, pero, por brillante que sea su reputación, ninguna puede mantener sus teorías a salvo de la severa crítica de los experimentos. La naturaleza no respeta las reputaciones. Galileo, Newton, Faraday, Maxwell, Einstein, Dirac, Feynman, Glashow, Salam, Weinberg… todos son grandes, pero los cuatro primeros solo tuvieron razón de manera aproximada, y es probable que el resto corran la misma suerte a lo largo del siglo XXI.

Pese a lo anterior, no nos cabe absolutamente ninguna duda de que las teorías especial y general de la relatividad de Einstein se recordarán siempre como dos de los mayores logros del intelecto humano, en buena medida porque ponen de manifiesto lo potente que puede llegar a ser nuestra imaginación. A partir de una inspirada combinación de pensamiento puro y unos pocos datos experimentales, un hombre fue capaz de cambiar nuestra manera de entender el tejido mismo del universo. Que la física de Einstein sea satisfactoria tanto estética como filosóficamente, a la par que extremadamente útil, nos ofrece una importante lección, cuyo verdadero significado rara vez se aprecia. La ciencia en todo su esplendor es el fruto de mentes curiosas con libertad para soñar, capacidad técnica y disciplina de pensamiento. Si la sociedad en la que floreció Einstein hubiese decidido que necesitaba una nueva fuente de energía para satisfacer las necesidades de sus ciudadanos, no parece posible imaginar que algún político iluminado hubiese destinado fondos públicos a la exploración de la naturaleza del espacio y el tiempo. Pero, como hemos visto, fue precisamente este camino el que condujo a $E = mc^2$ y permitió encontrar la llave con la que liberar el potencial del núcleo atómico. Partiendo de la idea más sencilla —que la velocidad de un haz de luz debe ser la misma para cualquiera en el universo— se descubrió un tesoro de riquezas. «Partiendo de la idea más sencilla»… si tuviésemos que escribir un epitafio para las mayores hazañas científicas de la humanidad, podría perfectamente comenzar con estas seis palabras. El deleite en la observación y el estudio de los detalles más pequeños y aparentemente insignificantes de la naturaleza ha llevado una y otra vez a las conclusiones más majestuosas. Estamos rodeados de maravillas y, si somos capaces de abrir nuestros ojos y nuestras mentes para verlas, nuestras posibilidades son ilimitadas. A Albert Einstein se le recordará mientras los seres humanos sigan existiendo en el universo, como fuente de inspiración y como ejemplo para todos los que sienten la curiosidad natural de entender el mundo que los rodea.

Autores

BRIAN COX. (Chadderton, Inglaterra, 3 de marzo de 1968). Físico teórico en la Universidad de Manchester, trabaja con el acelerador y colisionador de partículas en el experimento ATLAS del CERN, en Ginebra, y es investigador de la Royal Society. Se ha convertido en una voz fundamental como divulgador científico en el Reino Unido, donde presenta programas sobre ciencia en la BBC con gran éxito de audiencia. Cox y Forshaw han publicado conjuntamente *The Quantum Universe: Everything that Can Happen Does Happen*(2011). Cox también es coautor, junto a Andrew Cohen, de *Wonders of the Universe* (2011) y *Wonders of the Solar System* (2010).

JEFF FORSHAW. Profesor de física teórica en la Universidad de Manchester, especializado en física de partículas elementales. Fue premiado con la medalla del Institute of Physics Maxwell en 1999 por su valiosa contribución en el campo de la física teórica. Ha publicado dos libros de texto: *Quantum Chromodynamics and the Pomeron*, junto a Douglas A. Ross (1997), y *Dynamics and Relativity*, con Gavin Smith (2009).

Notas

[1] Tras los experimentos de Michelson y Morley, ha habido muchos más intentos de detectar el éter, pero todos han dado resultados negativos.
[2] Un nanosegundo es una milésima parte de un microsegundo, es decir, 0,000000001 segundos.
[3] La caja está sellada únicamente para evitar que nos distraiga la idea de que podríamos mirar por la ventana del tren para saber si nos estamos moviendo. Evidentemente, es algo irrelevante: mirar por la ventana solo nos permitiría confirmar que nos movemos respecto al suelo del exterior.
[4] Puedes comprobarlo tú mismo, sabiendo que la circunferencia de un círculo es igual al diámetro multiplicado por π (pi), y que π es aproximadamente igual a 3,142.
[5] GMT (Greenwich Mean Time, «tiempo medio de Greenwich») es el tiempo solar medio en el Real Observatorio de Greenwich, en Londres, que por convención está a 0 grados de longitud. (*N. del T.*)
[6] Puntos de la Tierra que supuestamente resuenan con «energía psíquica».
[7] La bola no tiene nada de particular, podría tratarse de cualquier otro objeto**.**
[8] Es decir, proporciona casi el mismo valor que la expresión exacta: $\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$.
[9] Eso no es estrictamente así. La masa puede tomar también un valor apenas 0,000006 eV/c^2 por encima de su valor mínimo. Esa minúscula diferencia es muy importante para los radioastrónomos pero, en lo que a nosotros respecta, supondremos que está tan cerca del mínimo valor posible que la diferencia no es significativa.
[10] La energía que se lleva el fotón es igual a 13,6 eV menos 10,2 eV, es decir, 3,4 eV.
[11] $10^1 = 10$, $10^2 = 100$, etcétera. Por lo tanto, 10^{26} es igual a 100.000.000.000.000.000.000.000.000, lo que pone de manifiesto la razón por la que se inventó una notación más compacta.
[12] $10^{-1} = 0{,}1$, $10^{-2} = 0{,}01$, etcétera. Por lo tanto, 10^{-27} tiene veintiséis ceros tras la coma decimal.
[13] Es posible calcular un límite superior para la masa de las estrellas de neutrones de manera análoga al límite de Chandrasekhar para la de una enana blanca, esto es, suponiendo que, para que formen una estrella de neutrones, los neutrones no pueden alcanzar velocidades cercanas a la de la luz.
[14] Gluón» proviene de la palabra *glue*, que significa «pegamento» en inglés. (*N. del T.*)
[15] En sentido estricto, se trata de un neutrino electrónico, porque se produce junto con un antielectrón
[16] En realidad se mueve trazando una elipse, una circunferencia ligeramente achatada, pero muy similar a un círculo.
[17] Si sabes que la energía potencial es igual a «mgh», puedes ver fácilmente que el pequeño incremento es igual a gh/c^2, donde g es la aceleración debida a la gravedad y h la altura de la caída.