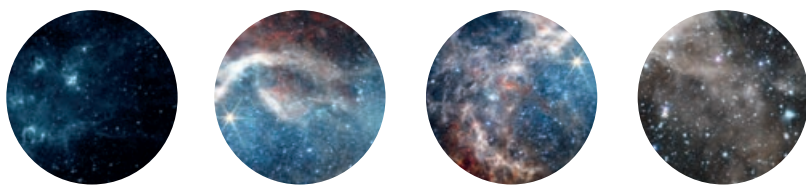


Prólogo de Stephen Hawking

KIP S. THORNE
AGUJEROS
NEGROS
Y TIEMPO
CURVO



EL ESCANDALOSO LEGADO DE EINSTEIN

CRÍTICA

Agujeros negros y tiempo curvo

El escandaloso legado de Einstein

Kip S. Thorne

Presentación de
Stephen Hawking

Traducción castellana de
Javier García Sanz

Crítica
Barcelona

Primera edición: abril de 1995

Primera edición en esta nueva presentación: septiembre de 2024

Agujeros negros y tiempo curvo

Kip S. Thorne

La lectura abre horizontes, iguala oportunidades y construye una sociedad mejor.

La propiedad intelectual es clave en la creación de contenidos culturales porque sostiene el ecosistema de quienes escriben y de nuestras librerías. Al comprar este libro estarás contribuyendo a mantener dicho ecosistema vivo y en crecimiento.

En **Grupo Planeta** agradecemos que nos ayudes a apoyar así la autonomía creativa de autoras y autores para que puedan continuar desempeñando su labor.

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

Título original: *Black Holes and Time Wraps*

© Kip S. Thorne, 1994

Publicado por acuerdo con Harold Ober Associates Inc. Agency
e International Editors' Co.

© de la traducción, Javier García Sanz, 1995

Se han realizado todos los esfuerzos para contactar, identificar y recabar la autorización de los propietarios de los copyrights. Con todo, si no se ha conseguido la autorización o el crédito correcto, el editor ruega que le sea comunicado y se corregirá en ediciones posteriores.

© Editorial Planeta, S. A., 2024

Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)

Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

editorial@ed-critica.es

www.ed-critica.es

ISBN: 978-84-9199-617-0

Depósito legal: B. 12.393-2024

Impresión y encuadernación: Arteos Digital

Printed in Spain - Impreso en España



La relatividad del espacio y del tiempo

*donde Einstein destruye
las ideas newtonianas
del espacio y del tiempo absolutos¹*

13 de abril de 1901

Profesor Wilhelm Ostwald
Universidad de Leipzig
Leipzig, Alemania

Estimado Herr Profesor:

Le ruego disculpe a un padre que es tan atrevido como para dirigirse a usted, estimado Herr Profesor, en interés de su hijo.

Empezaré diciéndole que mi hijo Albert tiene 22 años, que estudió en el Politécnico de Zurich durante 4 años, y que el pasado verano superó con brillantes notas los exámenes para obtener su título en matemáticas y física. Desde entonces ha estado tratando sin éxito de obtener un puesto como ayudante, lo que le permitiría continuar su formación en física teórica y experimental. Todos aquellos en situación de emitir un juicio, elogian su talento; en cualquier caso, puedo asegurarle que es extraordinariamente estudioso y diligente y se dedica con gran amor a su ciencia.

Por todo ello, mi hijo se siente profundamente disgustado debido a su actual falta de empleo; tiene la idea de que ha equivocado el camino en su carrera y cada vez se encierra más en sí mismo. Además, está agobiado por la idea de que representa una carga para nosotros, gente de medios modestos.

Puesto que es a usted, altamente reconocido Herr Profesor, a quien mi hijo parece admirar y estimar por encima de cualquier otro estudioso actualmente en activo en la física, es a usted a quien me he tomado la libertad de dirigirme con la humilde petición de que lea su artículo publicado en los *Annalen für Physik* y le escriba, si es posible, algunas palabras de ánimo para que pueda recuperar su alegría de vivir y trabajar.

Si, además, usted pudiera asegurarle un puesto como ayudante para ahora mismo o para el próximo otoño, mi gratitud no tendría límites.

Le ruego una vez más que perdone mi atrevimiento al escribirle, y también me tomo la libertad de mencionar que mi hijo no sabe nada de este paso poco usual que he dado.

Quedo, altamente estimado Herr Profesor, suyo afectísimo

HERMANN EINSTEIN²

Rcalmente era un periodo de depresión para Albert Einstein. Habían pasado ocho meses desde que se graduó en el Politécnico de Zurich a la edad de 21 años, y no encontraba trabajo. Se sentía un fracasado.

En el Politécnico (normalmente llamado el «ETH» por sus iniciales alemanas), Einstein había sido alumno de algunos de los más reputados físicos y matemáticos del mundo, pero no se había llevado bien con ellos. En el mundo académico de comienzos de siglo, donde la mayoría de los Profesores (con una P mayúscula) pedían y esperaban respeto, Einstein no les concedía mucho. Desde su infancia se había rebelado contra la autoridad, cuestionándose todo y no aceptando nunca nada sin comprobar su verdad por sí mismo. «El respeto irreflexivo por la autoridad es el mayor enemigo de la verdad»,³ afirmaba. Heinrich Weber, el más famoso de sus dos profesores de física en el ETH, se quejaba con exasperación: «Usted es un muchacho inteligente, Einstein, un muchacho muy inteligente. Pero tiene un gran defecto: no deja que nadie le diga nada». Su otro profesor de física, Jean Pernet, le preguntó por qué no estudiaba medicina, derecho o filología en lugar de física. «Usted puede hacer lo que le guste —le dijo Bernet—, sólo quiero advertirle por su propio interés.»

Einstein no hacía nada por mejorar las cosas con su actitud displicente hacia los programas de estudio. «Uno tenía que empollarse todo ese material para los exámenes, le gustase o no», dijo más tarde. Su profesor de matemáticas, Hermann Minkowski, de quien oiremos hablar mucho en el capítulo 2, estaba tan harto de la actitud de Einstein que le calificó de «zángano».

Pero Einstein no era un zángano. Simplemente era selectivo. Estudió exhaustivamente algunas partes del programa; y otras las ignoró, prefiriendo emplear su tiempo en estudio y reflexión autodidacta. Pensar era divertido, alegre y satisfactorio; por sí mismo pudo aprender la «nueva» física, la física que Heinrich Weber omitía en sus lecciones.

El espacio y el tiempo absolutos de Newton, y el éter

La «vieja» física, la física que Einstein *pudo* aprender de Weber, era un gran cuerpo de conocimientos al que llamaré *física newtoniana*, no porque Isaac Newton fuera el responsable de toda ella (no lo era), sino porque sus fundamentos fueron establecidos por Newton en el siglo xvii.

A finales del siglo xix, todos los fenómenos dispares del Universo físico podían explicarse de una forma muy bella a partir de un puñado de sencillas leyes

físicas newtonianas. Por ejemplo, todos los fenómenos en los que estaba implicada la gravedad podían explicarse por las *leyes newtonianas del movimiento y de la gravedad*:

- Todo objeto se mueve uniformemente en línea recta a menos que sobre él actúe alguna fuerza.
- Cuando una fuerza actúa, la velocidad del objeto cambia a un ritmo proporcional a la fuerza e inversamente proporcional a su masa.
- Entre dos objetos cualesquiera en el Universo actúa una fuerza gravitatoria que es proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

Manipulando matemáticamente* estas tres leyes, los físicos del siglo XIX podían explicar las órbitas de los planetas alrededor del Sol, las órbitas de los satélites alrededor de los planetas, el flujo y reflujo de las mareas oceánicas, y la caída de los graves; e incluso podían saber cuánto pesaban el Sol y la Tierra. Análogamente, manipulando un conjunto sencillo de leyes eléctricas y magnéticas, los físicos podían explicar los relámpagos, los imanes, las ondas de radio y la propagación, difracción y reflexión de la luz.

La fama y la fortuna esperaban a quienes pudieran aplicar las leyes de Newton a la tecnología. Manipulando matemáticamente las leyes newtonianas del calor, James Watt concibió cómo se podría convertir una primitiva máquina de vapor diseñada por otros en un dispositivo práctico que llegó a llevar su nombre. Apoyándose firmemente en la manera de Joseph Henry de entender las leyes de la electricidad y el magnetismo, Samuel Morse diseñó su provechosa versión del telégrafo.

Tanto los inventores como los físicos estaban orgullosos de la perfección de sus conocimientos. Cualquier cosa en los cielos y en la Tierra parecía obedecer a las leyes de la física newtoniana, y el dominio de las leyes proporcionaba a los seres humanos un dominio de su entorno —y quizá un día llegarían a dominar el Universo entero.

Einstein pudo aprender todas estas viejas y bien establecidas leyes newtonianas, y sus aplicaciones tecnológicas, en las clases de Heinrich Weber, y las aprendió bien. De hecho, en sus primeros años en el ETH, Einstein sentía entusiasmo por Weber. En febrero de 1898 escribió a Mileva Marić, la única mujer compañera de curso en el ETH (y de quien estaba enamorado): «las lecciones de Weber son magistrales. Espero ansioso cada una de sus clases».³

Pero en su cuarto año en el ETH, Einstein llegó a sentirse muy insatisfecho. Weber explicaba sólo la *vieja* física. Ignoraba completamente algunos de los desarrollos más importantes de las últimas décadas, incluyendo el descubrimiento por parte de James Clerk Maxwell de un nuevo conjunto de elegantes leyes del

* Los lectores que deseen comprender lo que se entiende por «manipulando matemáticamente» las leyes de la física encontrarán una discusión en las notas al final del libro.⁴

electromagnetismo a partir de las cuales se podían deducir *todos* los fenómenos electromagnéticos: el comportamiento de los imanes, las descargas eléctricas, los circuitos eléctricos, las ondas de radio o la luz. Einstein tuvo que aprender por su cuenta las leyes unificadoras del electromagnetismo de Maxwell, leyendo libros actualizados escritos por físicos de otras universidades, y presumiblemente no dudó en informar a Weber de su insatisfacción. Sus relaciones con Weber se deterioraron.

Visto retrospectivamente, resulta evidente que de todas las cosas que Weber ignoró en sus lecciones, la más importante era la creciente evidencia de grietas en los fundamentos de la física newtoniana, unos fundamentos cuyo cemento y ladrillos eran los conceptos del espacio y del tiempo absolutos de Newton.

El *espacio absoluto* de Newton era el espacio de la experiencia cotidiana, con sus tres dimensiones: este-oeste, norte-sur, arriba-abajo. Resultaba obvio, por la experiencia cotidiana, que existe uno y sólo un espacio semejante. Es un espacio compartido por toda la humanidad, por el Sol, por todos los planetas y estrellas. Cada uno de nosotros se mueve en este espacio en trayectorias y con velocidades propias, pero nuestra experiencia del espacio es la misma, independientemente de nuestro movimiento. Este espacio nos proporciona nuestra sensación de longitud, anchura y altura; y de acuerdo con las leyes de Newton, todos nosotros, independientemente de nuestro movimiento, estaremos de acuerdo en la longitud, anchura y altura de un objeto, con tal de que hagamos medidas suficientemente precisas.

El *tiempo absoluto* de Newton era el tiempo de la experiencia cotidiana, el tiempo que fluye inexorablemente hacia adelante a medida que envejecemos, el tiempo medido por los relojes de alta calidad y por la rotación de la Tierra y el movimiento de los planetas. Es un tiempo cuyo flujo es experimentado en común por toda la humanidad, por el Sol, por todos los planetas y por todas las estrellas. Según Newton, todos nosotros, independientemente de nuestro movimiento, estaremos de acuerdo en el período de una órbita planetaria o en la duración del discurso de algún político, con tal de que utilicemos relojes suficientemente precisos para medir la órbita o el discurso.

Si los conceptos de espacio y tiempo absolutos de Newton se derrumbaran, todo el edificio de las leyes físicas newtonianas se vendría abajo. Afortunadamente, año tras año, década tras década, siglo tras siglo, los conceptos fundamentales de Newton habían permanecido firmes dando lugar a un triunfo científico tras otro, desde el dominio de los planetas al dominio de la electricidad o el dominio del calor. No había indicio de ninguna grieta en los fundamentos; no hasta 1881, cuando Albert Michelson comenzó a medir la propagación de la luz.

Parecía obvio, y las leyes newtonianas así lo exigían, que si se mide la velocidad de la luz (o de cualquier otra cosa) el resultado debe depender del movimiento de quien mide. Si quien mide está en reposo en el espacio absoluto, entonces debería ver la misma velocidad de la luz en todas las direcciones. Por el contrario, si quien mide se está moviendo a través del espacio absoluto, pongamos por caso hacia el este, entonces debería ver más lenta la luz que se pro-

paga hacia el este y más rápida la luz que se propaga hacia el oeste, de la misma forma que una persona situada en un tren que viaja hacia el este ve más lentos los pájaros que vuelan hacia el este y más rápidos los que vuelan hacia el oeste.

En el caso de los pájaros es el aire el que determina la velocidad de su vuelo. Al batir sus alas en el aire, los pájaros de cada especie se mueven con la misma velocidad máxima a través del aire, independientemente de la dirección de su vuelo. Análogamente, para la luz existía una sustancia, llamada *éter*, que determinaba la velocidad de propagación de acuerdo con las leyes de la física newtoniana. Al batir sus campos eléctrico y magnético en el éter, la luz se propaga siempre con la misma velocidad universal a través del éter, independientemente de su dirección de propagación. Y puesto que el éter (según los conceptos newtonianos) está en reposo en el espacio absoluto,⁶ alguien que esté en reposo medirá la misma velocidad de la luz en todas las direcciones, mientras que alguien que esté en movimiento medirá diferentes velocidades de la luz según la dirección.

Ahora bien, la Tierra se mueve a través del espacio absoluto, aunque sólo fuera por su movimiento alrededor del Sol: en enero se mueve en una dirección; en junio, seis meses después, se mueve en la dirección opuesta. Por consiguiente, nosotros en la Tierra mediremos una velocidad de la luz diferente en direcciones diferentes, y las diferencias cambiarán con las estaciones —aunque sólo de forma muy ligera (alrededor de 1 parte en 10.000), porque la Tierra se mueve muy lentamente comparada con la luz.

Verificar esta predicción suponía un desafío apasionante para los físicos experimentales. Albert Michelson, un norteamericano de 28 años, aceptó el desafío en 1881, utilizando una técnica experimental exquisitamente precisa (actualmente llamada «interferometría Michelson»; capítulo 10) que él había inventado.⁷ Pero por mucho que lo intentara, Michelson no pudo encontrar ninguna evidencia de la más mínima variación de la velocidad de la luz con la dirección. La velocidad resultaba ser la misma en *todas* las direcciones y en *todas* las estaciones del año en sus experimentos iniciales de 1881, y también resultó ser la misma en los experimentos posteriores, y mucho más precisos, que realizó en 1887 en Cleveland, Ohio, en colaboración con un químico, Edward Morley. Michelson reaccionó con una mezcla de regocijo por su descubrimiento y consternación por sus consecuencias. Heinrich Weber y la mayoría de los físicos de la década de 1890 reaccionaron con escepticismo.

Era fácil ser escéptico. Los experimentos interesantes suelen ser terriblemente difíciles; tan difíciles, de hecho, que por mucho cuidado que se ponga en su realización, pueden dar resultados erróneos. Simplemente una pequeña anomalía en el aparato, o una minúscula fluctuación incontrolada de la temperatura, o una inesperada vibración en el suelo en que se asienta, podría alterar el resultado final del experimento. Por ello, no es sorprendente que los físicos actuales, al igual que los físicos de finales del siglo pasado, se vean enfrentados en ocasiones a experimentos terriblemente difíciles que entran en conflicto entre sí o en conflicto con nuestras profundas creencias sobre la naturaleza del Universo y sus leyes físicas. Ejemplos recientes los constituyen los experimen-

tos que pretendían descubrir una «quinta fuerza» (una fuerza no presente en las actuales y muy satisfactorias leyes físicas estándar) frente a otros experimentos que niegan que semejante fuerza exista; asimismo, los experimentos que afirman haber descubierto la «fusión fría» (un fenómeno prohibido por las leyes estándar, si los físicos entienden estas leyes correctamente) frente a otros experimentos que niegan que tal fusión fría tenga lugar. Casi siempre los experimentos que amenazan nuestras profundas creencias resultan ser falsos; sus resultados radicales son artificios debidos a errores experimentales. No obstante, ocasionalmente son correctos y señalan el camino hacia una revolución en nuestra comprensión de la naturaleza.

Una marca de un físico sobresaliente es su capacidad para «oler» qué experimentos son dignos de confianza y cuáles no; de cuáles hay que preocuparse y cuáles hay que ignorar. Conforme la tecnología mejora y los experimentos se repiten una y otra vez, la verdad resplandece finalmente; pero si uno está tratando de contribuir al progreso de la ciencia, y si quiere colocar su propio imprimátur en los descubrimientos mayores, entonces uno necesita adivinar antes, y no después, qué experimentos son dignos de crédito.

Varios físicos sobresalientes de finales de siglo examinaron el experimento de Michelson-Morley y llegaron a la conclusión de que los detalles internos del aparato y el exquisito cuidado con que fue realizado constituían un argumento muy convincente. Decidieron que este experimento «olía bien»; algo podría estar mal en los fundamentos de la física newtoniana. Por el contrario, Heinrich Weber y muchos otros confiaban en que, pasado un tiempo y tras un esfuerzo experimental adicional, todo volvería a su cauce; la física newtoniana triunfaría al final como ya lo había hecho tantas veces antes. Sería incluso inapropiado mencionar este experimento en una lección en la universidad; no había que confundir a las mentes jóvenes.⁸

El físico irlandés George F. Fitzgerald fue el primero en aceptar al pie de la letra el experimento de Michelson-Morley y en especular acerca de sus implicaciones. Comparándolo con otros experimentos,⁹ llegó a la conclusión radical de que el fallo residía en la comprensión que tenían los físicos del concepto de «longitud» y que, por consiguiente, debía haber algo erróneo en el concepto de espacio absoluto de Newton. En un corto artículo publicado en 1889 en la revista norteamericana *Science*, escribió:

He leído con interés el experimento extraordinariamente delicado de los señores Michelson y Morley ... Su resultado parece contrario al de otros experimentos ... Yo sugeriría que prácticamente la única hipótesis que puede reconciliar esta contradicción es que la longitud de los cuerpos materiales cambia, dependiendo de cómo se mueven a través del éter [a través del espacio absoluto], en una cantidad que depende del cuadrado del cociente entre sus velocidades y la de la luz.

Una minúscula (cinco partes por mil millones) contracción de la longitud en la dirección del movimiento de la Tierra podría realmente dar cuenta del resultado negativo del experimento de Michelson-Morley.¹⁰ Pero esto exigía un

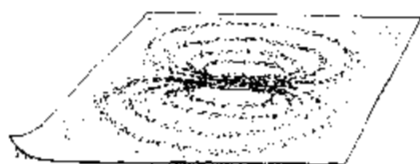
rechazo de la comprensión de los físicos acerca del comportamiento de la materia: ninguna fuerza conocida podía hacer que los objetos se contrajesen en la dirección de su movimiento, ni siquiera en una cantidad tan mínima. Si los físicos entendían correctamente la naturaleza del espacio y la naturaleza de las fuerzas moleculares en el interior de los cuerpos sólidos, entonces los cuerpos sólidos que se movieran con velocidad uniforme tendrían siempre la misma forma y el mismo tamaño con respecto al espacio absoluto, independientemente de la velocidad con que se movieran.

Hendrik Lorentz en Amsterdam también creyó en el experimento de Michelson-Morley, y se tomó en serio la sugerencia de Fitzgerald de que los objetos en movimiento se contraen. Al enterarse de ello, Fitzgerald escribió a Lorentz manifestando su satisfacción, puesto que «aquí más bien se han reído de mi opinión». En busca de una comprensión más profunda, Lorentz —e independientemente Henri Poincaré en París, y Joseph Larmor en Cambridge— reexaminaron las leyes del electromagnetismo y advirtieron una peculiaridad que encajaba con la idea de contracción de la longitud de Fitzgerald:

Si se expresan las leyes del electromagnetismo de Maxwell en términos de campos eléctrico y magnético medidos en reposo en el espacio absoluto, las leyes toman una forma matemática especialmente simple y muy bella. Por ejemplo, una de las leyes dice simplemente: «las líneas de campo magnético, tal como las ve cualquiera que esté en reposo en el espacio absoluto, no tienen extremos» (véase la figura 1.1a, b). Sin embargo, si se expresan las leyes de Maxwell en términos de los campos ligeramente diferentes medidos por una persona en movimiento, entonces las leyes aparecen mucho más complicadas y feas. En particular, la ley de «ausencia de extremos» se transforma en: «vistas por alguien en movimiento, la mayoría de las líneas de campo magnético no tienen extremos, pero unas pocas quedan cortadas por el movimiento y, de esta forma, adquieren extremos. Además, cuando la persona en movimiento agita el imán se cortan nuevas líneas de campo, luego se cierran, luego se cortan de nuevo, luego se vuelven a cerrar» (véase la figura 1.1c).¹¹

El nuevo descubrimiento matemático de Lorentz, Poincaré y Larmor era una forma de hacer que las leyes del electromagnetismo apareciesen bellas para la persona en movimiento, y de hecho pareciesen idénticas a las leyes utilizadas por una persona en reposo en el espacio absoluto: «las líneas de campo magnético nunca terminan en ningún punto, bajo ninguna circunstancia». ¿Podía hacerse que las leyes tomaran esta forma bella suponiendo, contrariamente a los preceptos newtonianos, que todos los objetos en movimiento se contraen a lo largo de su dirección de movimiento en la cantidad exacta que Fitzgerald necesitaba para explicar el experimento de Michelson-Morley?

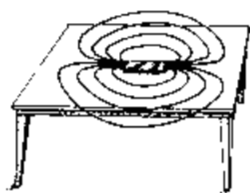
Si la contracción de Fitzgerald hubiera sido la única «física nueva» que se necesitaba para hacer que las leyes del electromagnetismo fueran universalmente simples y bellas, Lorentz, Poincaré y Larmor, con su fe intuitiva en que las leyes de la física *debían ser* bellas, podrían haber dejado de lado los preceptos newtonianos y haber creído firmemente en la contracción. Sin embargo, la contracción no era suficiente por sí misma. Para hacer que las leyes fuesen bellas,



a



b En reposo en el espacio absoluto



c Sobre la Tierra en movimiento



1.1. Una de las leyes electromagnéticas de Maxwell, tal como se entendía dentro del marco de la física newtoniana en el siglo XIX: a) el concepto de una línea de campo magnético: cuando se coloca una barra magnética bajo una hoja de papel y se esparcen limaduras de hierro sobre la hoja, las limaduras señalan las líneas de campo de la barra magnética. Cada línea de campo sale del polo norte del imán, se curva rodeando al imán y vuelve a entrar en él por el polo sur, y entonces viaja a través del imán hasta el polo norte, donde se empalma consigo misma. La línea de campo es, por lo tanto, una curva cerrada, algo parecido a una goma elástica sin ningún extremo. La afirmación de que «las líneas de campo magnético nunca tienen extremos» es la ley de Maxwell en su forma más simple y bella. b) Según la física newtoniana, esta versión de la ley de Maxwell es correcta independientemente de lo que se haga con el imán (por ejemplo, incluso si uno lo agita violentamente) siempre que uno esté en reposo en el espacio absoluto. Ninguna línea de campo magnético tiene nunca ningún extremo, desde el punto de vista de alguien en reposo. c) Cuando es estudiada por alguien situado en la superficie de la Tierra y moviéndose a través del espacio absoluto, la ley de Maxwell es mucho más complicada, según la física newtoniana. Si el imán de la persona en movimiento reposa en una mesa, entonces algunas de sus líneas de campo (aproximadamente una de cada cien millones) tendrá extremos. Si la persona agita el imán violentamente, líneas de campo adicionales (una de cada billón) será cortada temporalmente por la agitación, y luego se reempalmará, luego se cortará, y luego volverá a empalmarse. Aunque una línea de campo en cien millones o un billón con extremos era algo demasiado pequeño para ser distinguido en cualquier experimento de física en el siglo XIX, el hecho de que las leyes de Maxwell predijeran tal cosa parecía bastante complicado y feo para Lorentz, Poincaré y Larmor.

también había que suponer que el tiempo fluía más lentamente cuando lo mide alguien que se mueve a través del Universo que cuando lo mide alguien en reposo; el movimiento «dilata» el tiempo.¹²

Ahora bien, las leyes de la física newtoniana eran inequívocas: el tiempo es *absoluto*. Fluye uniforme e inexorablemente al mismo ritmo universal, independientemente de cómo se mueva cada uno. Si las leyes newtonianas eran correctas, entonces el movimiento no puede producir una dilatación del tiempo como tampoco puede producir que las longitudes se contraigan. Por desgracia, los relojes de la última década del siglo XIX eran muy poco precisos para revelar la verdad; y, a la vista de los triunfos científicos y tecnológicos de la física newtoniana, triunfos basados firmemente sobre la idea del tiempo absoluto, nadie estaba dispuesto a afirmar con convicción que el tiempo realmente se dilata. Lorentz, Poincaré y Larmor divagaban.

Einstein, todavía un estudiante en Zurich, no estaba aún listo para abordar estas excitantes cuestiones, pero ya comenzaba a pensar sobre ellas. En agosto de 1899 escribió a su amiga Mileva Marić (con quien tenía un romance en ciernes): «Cada vez estoy más convencido de que la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, tal como se presenta hoy día, no es correcta».¹³ Durante los siguientes seis años, a medida que sus cualidades como físico maduraban, meditaría sobre esta cuestión y la realidad de la contracción de las longitudes y la dilatación del tiempo.¹⁴

Weber, por el contrario, no mostró ningún interés en tales cuestiones especulativas. Siguió explicando la física newtoniana como si todo estuviese en perfecto orden, como si no hubiera ningún indicio de grietas en los fundamentos de la física.

Cuando se acercaba al final de sus estudios en el ETH, Einstein supuso ingenuamente que, puesto que era inteligente y no le había ido nada mal en sus cursos (una nota media de 4,91 sobre 6,00) se le ofrecería el puesto de ayudante en física en el ETH bajo la dirección de Weber, y podría utilizarlo como era habitual como un trampolín hacia el mundo académico. Como ayudante podría empezar a hacer investigación por su cuenta, lo que le llevaría en unos pocos años al grado de doctor.

Pero no iba a ser así. De los cuatro estudiantes que superaron sus exámenes finales en el programa combinado de física y matemáticas en agosto de 1900, tres obtuvieron puestos de ayudante en el ETH trabajando con matemáticos; el cuarto, Einstein, no obtuvo nada. Weber contrató como ayudante a dos estudiantes de ingeniería en lugar de a Einstein.

Einstein siguió intentándolo. En septiembre, un mes después de su graduación, solicitó un puesto vacante de ayudante en matemáticas en el ETH. Fue rechazado. En el invierno y la primavera siguientes solicitó un puesto a Wilhelm Ostwald en Leipzig, y a Heike Kamerlingh Onnes en Leiden. Parece que de ellos ni siquiera recibió nunca una respuesta de cortesía —aunque su carta a Onnes se exhibe ahora orgullosamente en un museo en Leiden, y aunque Ostwald iba a ser diez años más tarde el primero en proponer a Einstein para un

Premio Nobel. Ni siquiera la carta que el padre de Einstein dirigió a Ostwald parece haber tenido respuesta.

El 27 de marzo de 1901 Einstein escribió a la insolente y temperamental Mileva Marić,¹⁵ con quien su romance se había intensificado: «Estoy absolutamente convencido de que la culpa es de Weber ... no tiene sentido escribir a ningún otro profesor porque éste seguramente se dirigirá a Weber para pedirle información sobre mí, y Weber volverá a dar otra mala recomendación». ¹⁶ El 14 de abril de 1901, Einstein escribió a un íntimo amigo, Marcel Grossmann: «Podría haber encontrado [un puesto de ayudante] hace tiempo si no hubiese sido por los manejos de Weber. En cualquier caso, no dejo piedra sin remover y no pierdo mi sentido del humor ... Dios creó al burro con una piel dura». ¹⁷

Necesitaba una piel dura. No sólo estaba buscando un trabajo infructuosamente sino que sus padres se oponían vehementemente a sus planes de casarse con Mileva, y su relación con ella se estaba volviendo turbulenta. La madre de Einstein escribió acerca de Mileva: «Esta señorita Marić me está causando las horas más amargas de mi vida; si de mí dependiera haría todo lo posible para barrerla de nuestro horizonte, realmente me disgusta». ¹⁸ Y Mileva escribió de la madre de Einstein: «Parece que esta señora se haya fijado como objetivo de su vida el amargar no sólo la mía sino también la de su hijo ... ¡Nunca hubiera creído que pudiera existir alguien tan malvado y sin corazón!». ¹⁹

Einstein deseaba desesperadamente escapar de la dependencia financiera de sus padres y disponer de la tranquilidad y libertad de espíritu necesarias para dedicar la mayor parte de su energía a la física. Quizá esto podía conseguirse por algún otro medio que no fuera un puesto de ayudante en la universidad. Su título en el ETH le cualificaba para enseñar en un *gymnasium* (instituto de enseñanza media), de modo que se orientó hacia este objetivo: a mediados de mayo de 1901 consiguió un trabajo temporal en un instituto técnico en Winterthur, Suiza, sustituyendo a un profesor de matemáticas que tenía que cumplir parte de su servicio militar.

Einstein escribió a su antiguo profesor de historia en el ETH, Alfred Stern: «No puedo ocultar mi alegría por [este puesto en la enseñanza] porque hoy he recibido la noticia de que todo ha quedado arreglado definitivamente. No tengo la más mínima idea de quién pudo ser la persona humanitaria que me recomendó allí, porque por lo que me han dicho yo no estoy en las listas de honor de ninguno de mis antiguos profesores». ²⁰ El trabajo en Winterthur, al que siguió en el otoño de 1901 otro puesto de enseñanza temporal en un instituto en Schaffhausen, Suiza, y más tarde, en junio de 1902, un trabajo como «experto técnico de tercera clase» en la Oficina Suiza de Patentes en Berna, le proporcionó independencia y estabilidad.

A pesar de las continuas agitaciones en su vida personal (largas separaciones de Mileva; una hija ilegítima con Mileva en 1902, a la que parece que cedieron en adopción, quizá para no poner en peligro las posibilidades de una carrera de Einstein en la tranquila Suiza; ²¹ su matrimonio con Mileva, a pesar de la violenta oposición de sus padres), Einstein mantuvo un espíritu optimista y permaneció con su cabeza bastante despejada para pensar, y pensar profun-



Izquierda: Einstein sentado en su mesa de trabajo en la oficina de patentes de Berna, Suiza, c. 1905. (Cortesía de los Archivos Albert Einstein de la Universidad Hebrea de Jerusalén.) *Derecha:* Einstein con su esposa, Mileva, y su hijo Hans Albert, c. 1904. (Cortesía del Schweizerisches Literaturarchiv/Archiv der Einstein-Gesellschaft, Berna.)

damente, sobre física: entre 1901 y 1904 puso a prueba sus capacidades como físico en la investigación teórica sobre la naturaleza de las fuerzas intermoleculares en líquidos, tales como el agua, y en metales, y en la investigación sobre la naturaleza del calor. Sus nuevas ideas, que eran fundamentales, fueron publicadas en una serie de cinco artículos en la más prestigiosa revista de física de principios de siglo: los *Annalen der Physik*.

El trabajo en la oficina de patentes de Berna era muy apropiado para poner a prueba las capacidades de Einstein. En el trabajo se le planteaba el desafío de imaginar si los inventos sometidos a patente funcionarían —una tarea a menudo deliciosa y que agudizaba su mente. Y el trabajo le dejaba libres la mitad de sus horas de vigilia y todo el fin de semana. Pasó muchas de estas horas estudiando y pensando sobre física,²² con frecuencia en medio de un caos familiar.

Su capacidad para concentrarse a pesar de las distracciones fue descrita por un estudiante que le visitó en su casa varios años después de su matrimonio con Mileva: «Él estaba sentado en su estudio frente a un montón de papeles

lentos de fórmulas matemáticas. Mientras escribía con la mano derecha y sostenía a su hijo más pequeño en su mano izquierda, siguió respondiendo a las preguntas de su hijo mayor Alberto que estaba jugando con sus bloques de construcción. Con las palabras "Espera un minuto, casi he acabado", me dejó al cuidado de los niños durante unos instantes y siguió trabajando».²³

En Berna, Einstein estaba aislado de los demás físicos (aunque hizo algunos amigos íntimos no físicos con quienes podía discutir de ciencia y filosofía). Para la mayoría de los físicos, tal aislamiento hubiera sido desastroso. La mayoría de ellos requieren contacto continuo con colegas que trabajan en problemas similares para no perderse en direcciones improductivas en su investigación. Pero el intelecto de Einstein era diferente; trabajaba más provechosamente aislado que en el medio estimulante de otros físicos.

A veces le servía de ayuda hablar con otros, no porque le ofreciesen algunas ideas profundas o alguna nueva información, sino porque al explicar las paradojas y los problemas a los demás podía clarificarlos en su propia mente. Particularmente importante fue la ayuda de Michele Angelo Besso, un ingeniero italiano que había sido compañero de curso de Einstein en el ETH y que ahora estaba trabajando con él en la oficina de patentes. Einstein dijo de Besso: «No podría haber encontrado mejor tabla armónica en toda Europa».²⁴

El espacio y el tiempo relativos de Einstein, y la velocidad absoluta de la luz

La ayuda de Michele Angelo Besso resultó especialmente importante en mayo de 1905, cuando Einstein, después de concentrarse durante varios años en otras cuestiones de física, volvió a las leyes electrodinámicas de Maxwell y sus sorprendentes ideas sobre la contracción de la longitud y la dilatación del tiempo. La investigación de Einstein para dar sentido a estas ideas estaba estancada por un bloqueo mental. Para acabar con este bloqueo buscó la ayuda de Besso. Como recordaba más tarde: «Fue un día muy hermoso cuando visité [a Besso] y empecé a hablar con él en estos términos: "Recientemente se me planteó una cuestión que no podía comprender. Por ello he venido hoy aquí a discutir sobre este tema". Ensayando muchos argumentos con él, de repente pude comprender la cuestión. Al día siguiente le visité de nuevo y le dije antes de saludarle: "Gracias. He resuelto el problema por completo"».

La solución de Einstein: *No existe tal cosa como un espacio absoluto. No existe tal cosa como un tiempo absoluto. Los fundamentos de toda la física newtoniana se agrietaban. Y lo mismo sucedía con el éter: no existe.*

Al rechazar el espacio absoluto, Einstein vació de cualquier significado la noción de «estar en reposo en el espacio absoluto». No hay manera, afirmó, de medir el movimiento de la Tierra a través del espacio absoluto, y por esto es por lo que el experimento de Michelson-Morley dio el resultado que dio. Sólo se puede medir la velocidad de la Tierra *relativa a otros objetos físicos* tales como el Sol o la Luna, de la misma forma que sólo se puede medir la velocidad

de un tren relativa a objetos físicos tales como el suelo o el aire. Pero ni para la Tierra ni para el tren ni para ninguna otra cosa existe ningún patrón de movimiento absoluto; el movimiento es puramente «relativo».

Al rechazar el espacio absoluto, Einstein también rechazaba la idea de que todos, independientemente de nuestro movimiento, debemos estar de acuerdo en la longitud, altura y anchura de una mesa o un tren o cualquier otro objeto. Por el contrario, insistía Einstein, *la longitud, la altura y la anchura son conceptos «relativos»*. Dependen del movimiento relativo del objeto que se está midiendo respecto a la persona que hace la medida.

Al rechazar el tiempo absoluto, Einstein rechazaba la noción de que todos, independientemente de nuestro movimiento, debemos sentir el flujo del tiempo de la misma manera. *El tiempo es relativo*, afirmaba Einstein. Cada persona que sigue su propia trayectoria debe experimentar un flujo del tiempo diferente de otros que siguen trayectorias diferentes.

Es difícil no sentirse marcado cuando uno se encuentra con estas afirmaciones. Si son correctas, no sólo derriban los cimientos de todo el edificio de la ley física newtoniana, sino que también nos privan de nuestras nociones cotidianas y de sentido común del espacio y del tiempo.

Pero Einstein no era sólo un destructor. También era un creador. Nos ofreció unos nuevos cimientos para reemplazar a los antiguos, unos cimientos muy firmes y, como después se vio, en un acuerdo mucho más perfecto con el Universo.

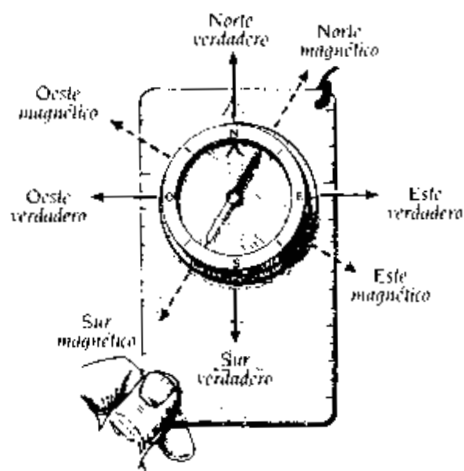
La nueva base de Einstein consistía en dos nuevos principios fundamentales:

- *El principio del carácter absoluto de la velocidad de la luz*: cualquiera que pueda ser su naturaleza, el espacio y el tiempo deben estar constituidos de tal forma que hagan que la velocidad de la luz sea absolutamente la misma en todas direcciones, y absolutamente independiente del movimiento de la persona que la mide.

Este principio es una rotunda afirmación de que el experimento de Michelson-Morley era correcto y que, cualquiera que sea la precisión que puedan alcanzar en el futuro los instrumentos para medir la luz, siempre continuarán dando el mismo resultado: una velocidad de la luz universal.

- *El principio de relatividad*: cualquiera que pueda ser su naturaleza, las leyes de la física deben tratar todos los estados de movimiento en pie de igualdad.

Este principio supone un rotundo rechazo del espacio absoluto: si las leyes de la física no tratan a todos los estados de movimiento (por ejemplo, el del Sol y el de la Tierra) en pie de igualdad, entonces, utilizando las leyes de la física, los físicos serían capaces de escoger algún estado de movimiento «privilegiado» (por ejemplo, el del Sol) y definirlo como el estado de «reposo absoluto».



1.2. El norte magnético es una mezcla del norte verdadero y el este verdadero, y el norte verdadero es una mezcla del norte magnético y el oeste magnético.

El espacio absoluto sería entonces reintroducido en la física. Volveremos a esta cuestión más adelante en este mismo capítulo.

A partir del carácter absoluto de la velocidad de la luz, Einstein dedujo, mediante un elegante argumento lógico descrito en el recuadro 1.1, que si usted y yo nos movemos con movimiento mutuamente relativo, *lo que yo llamo espacio debe ser una mezcla de su espacio y su tiempo, y lo que usted llama espacio debe ser una mezcla de mi espacio y mi tiempo.*

Esta «mezcla de espacio y tiempo» es análoga a la mezcla de las direcciones en la Tierra. La naturaleza nos ofrece dos modos de calcular las direcciones, uno ligado al eje de rotación de la Tierra y el otro ligado a su campo magnético. En Pasadena, California, el norte magnético (la dirección que marca la aguja de una brújula) está desplazado hacia el este respecto del norte verdadero (la dirección en la que apunta el eje de giro de la Tierra, es decir, la del Polo Norte) alrededor de 20 grados (véase la figura 1.2). Esto significa que para viajar en la dirección del norte magnético, hay que viajar una parte (alrededor del 80 por 100) en la dirección del norte verdadero y una parte (alrededor de un 20 por 100) hacia el este verdadero. En este sentido, *el norte magnético es una mezcla del norte verdadero y el este verdadero*; análogamente, el norte verdadero es una mezcla del norte magnético y el oeste magnético.

Para entender la mezcla análoga de espacio y tiempo (*su espacio es una mezcla de mi espacio y mi tiempo, y mi espacio es una mezcla de su espacio y su tiempo*), imagínese que es el propietario de un potente automóvil deportivo. A usted le gusta conducir su automóvil por Colorado Boulevard en Pasadena, a gran velocidad y a altas horas de la noche, cuando yo, un policía, estoy durmiendo. En la bota de su automóvil coloca usted una serie de petardos, uno

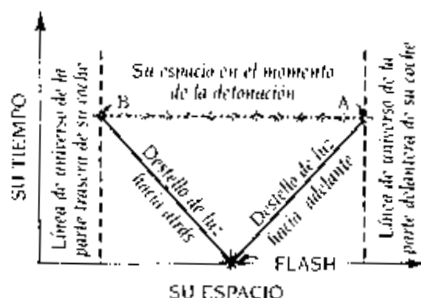
RECUADRO 1.1

Demostración de Einstein de la mezcla del espacio y el tiempo

El principio de Einstein del carácter absoluto de la velocidad de la luz obliga a la mezcla del espacio y el tiempo; en otras palabras, obliga a la relatividad de la simultaneidad: sucesos que son simultáneos vistos por usted (que yacen en su espacio en un instante específico de su tiempo) cuando su coche deportivo viaja a gran velocidad por Colorado Boulevard, no son simultáneos vistos por mí, en reposo en el puesto de policía. Probaré esto utilizando las palabras descriptivas que acompañan a los diagramas espacio-temporales mostrados más abajo. Esta demostración es esencialmente la misma que la ideada por Einstein en 1905.²⁵

Coloque una lámpara de flash en medio de su automóvil. Dispare el flash. Éste envía un destello de luz hacia la parte delantera de su coche, y un destello hacia la parte trasera de su coche. Puesto que los dos destellos se emiten simultáneamente, recorren la misma distancia tal como usted la mide en su automóvil, y puesto que viajan a la misma velocidad (la velocidad de la luz es absoluta), deben llegar simultáneamente a la parte delantera y a la parte trasera de su coche desde su punto de vista; véase el diagrama izquierdo más abajo. Los dos sucesos de la llegada de los destellos (llamémosles *A* al que tiene lugar en la parte delantera de su automóvil y *B* al que tiene lugar en su parte trasera) son por lo tanto simultáneos desde su punto de vista, y resultan coincidir con las detonaciones de los petardos de la figura 1.3, tal como usted los ve.

A continuación, examinemos los destellos de luz y sus sucesos de llegada *A* y *B* desde mi punto de vista, cuando su automóvil pasa frente a mí; véase el diagrama derecho más abajo. Desde mi punto de vista, la parte trasera de su automóvil se está moviendo hacia adelante, hacia el destello de luz que viaja hacia atrás, y de este modo ambos se encuentran (suceso *B*) antes vistos por mí que vistos por usted. Análogamente, la parte delantera de su coche se está moviendo hacia adelante, alejándose del destello dirigido hacia adelante, y por lo tanto éstos se encuentran (suceso *A*) más tarde vistos por mí que vistos por



usted. (Estas conclusiones descansan de forma crucial en el hecho de que las velocidades de los dos destellos de luz son las mismas vistas por mí; es decir, descansan en el carácter absoluto de la velocidad de la luz.) Por consiguiente, yo considero que el suceso *B* ocurre antes que el suceso *A*; y análogamente, yo veo que los petardos próximos a la parte trasera de su automóvil detonan antes que los que están próximos a la parte delantera.

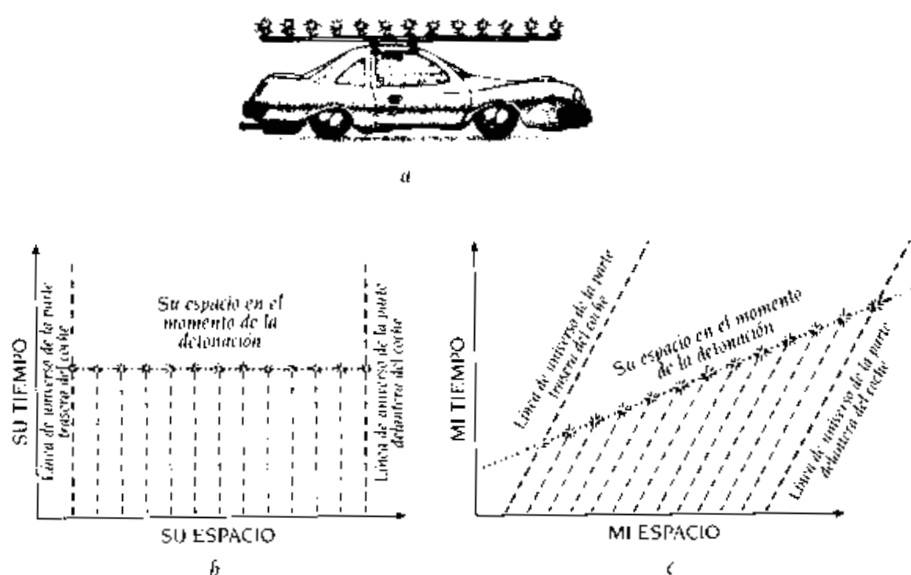
Nótese que las localizaciones de las detonaciones (su espacio en un instante específico de su tiempo) son las mismas en los diagramas espacio-temporales superiores que en la figura 1.3. Esto justifica la afirmación de la mezcla del espacio y el tiempo discutida en el texto.

justo sobre el parachoques delantero, otro sobre el trasero, y otros muchos en medio (véase la figura 1.3a). Usted hace que los petardos exploten simultáneamente tal como los ve usted, en el preciso instante en que pasa frente a mi puesto de policía.

La figura 1.3b muestra esto desde su punto de vista. En el eje vertical se representa el flujo del tiempo medido por usted («su tiempo»). En el eje horizontal se representa la distancia a lo largo de su coche, desde la parte trasera hasta la delantera, tal como usted la mide («su espacio»). Puesto que todos los petardos están en reposo en su espacio (es decir, tal como usted los ve), todos ellos seguirán en las mismas posiciones horizontales en el diagrama en el curso de su tiempo. Las líneas de trazos, una para cada petardo, muestran esto. Estas líneas se extienden en vertical hacia arriba en el diagrama, indicando que no hay ningún movimiento espacial hacia la derecha o hacia la izquierda conforme pasa el tiempo, y luego terminan abruptamente en el instante en que explotan los petardos. Cada suceso correspondiente a una detonación se muestra como un asterisco.

Esta figura se denomina *diagrama espacio-temporal* porque representa el espacio en horizontal y el tiempo en vertical; las líneas de trazos se denominan *líneas de universo* porque muestran por qué lugar del Universo pasan los petardos conforme transcurre el tiempo. Haremos gran uso de los diagramas espacio-temporales y de las líneas de universo a lo largo de este libro.

Si uno se mueve horizontalmente en el diagrama (figura 1.3b), se está moviendo por el espacio en un instante fijo de su tiempo (de usted). Por esta razón, es conveniente pensar que cada línea horizontal del diagrama está mostrando el espacio tal como usted lo ve («su espacio») en un instante dado de su tiempo. Por ejemplo, la línea horizontal de puntos es su espacio en el instante de la detonación de los petardos. Cuando uno se mueve hacia arriba en línea vertical en el diagrama, se está moviendo a través del tiempo manteniendo una posición fija en su espacio. Por esta razón, es conveniente pensar que cada línea vertical en el diagrama espacio-temporal (por ejemplo, cada línea de universo de un petardo) muestra el flujo de su tiempo en una posición dada en su espacio.



1.3. a) Su coche deportivo circulando a gran velocidad por Colorado Boulevard con petardos atados a su baca. b) Diagrama espacio-temporal mostrando el movimiento y detonación de los petardos desde su punto de vista (viajando en el coche). c) Diagrama espacio-temporal mostrando el movimiento y detonación de los mismos petardos desde mi punto de vista (en reposo en el puesto de la policía).

Si yo no estuviera dormido en el puesto de policía, dibujaría un diagrama espacio-temporal bastante diferente para mostrar su automóvil, sus petardos y la detonación (figura 1.3c). Yo representaría el flujo del tiempo, medido por mí, en vertical, y la distancia a lo largo de Colorado Boulevard en horizontal. Conforme pasa el tiempo, cada petardo se desplaza por Colorado Boulevard con su automóvil a gran velocidad y, correspondientemente, las líneas de universo de los petardos se inclinan hacia la derecha en el diagrama: en el instante de su detonación, cada petardo está mucho más hacia la derecha en Colorado Boulevard que en instantes anteriores.

Ahora bien, la sorprendente conclusión del argumento lógico de Einstein (recuadro 1.1) es que el carácter absoluto de la velocidad de la luz exige que los petardos *no* hagan detonación simultáneamente tal como yo los veo, incluso si detonan simultáneamente tal como usted los ve. Desde mi punto de vista el petardo que está situado más atrás en su coche detona primero, y el que está situado más adelante detona el último. Correspondientemente, la línea de puntos que llamamos «su espacio en el instante de la detonación» (figura 1.3b) está inclinada en mi diagrama espacio-temporal (figura 1.3c).

De la figura 1.3c resulta evidente que, para moverme a través de su espacio en su instante de detonación (a lo largo de la línea de detonación de puntos), yo debo moverme tanto a través de mi espacio como de mi tiempo. En este sen-

tido, su espacio es una mezcla de mi espacio y mi tiempo. Precisamente en este mismo sentido es en el que se puede afirmar que el norte magnético es una mezcla del norte verdadero y el este verdadero (compárese la figura 1.3c con la figura 1.2).

Usted podría estar tentado de afirmar que esta «mezcla de espacio y tiempo» es simplemente una forma egocéntrica y complicada de decir que «la simultaneidad depende del estado de movimiento de cada uno». Ciertamente. Sin embargo, los físicos, construyendo sobre los cimientos de Einstein, han encontrado que esta forma de pensar es muy poderosa. Les ha ayudado a descifrar el legado de Einstein (sus nuevas leyes de la física), y a descubrir en este legado un conjunto de fenómenos aparentemente insólitos: agujeros negros, agujeros de gusano, singularidades, distorsiones del tiempo y máquinas del tiempo.

A partir del carácter absoluto de la velocidad de la luz y del principio de relatividad, Einstein dedujo otras características notables del espacio y del tiempo. En los términos de la historia anterior:

- Einstein dedujo que, cuando usted se mueve velozmente hacia el este por Colorado Boulevard, yo debo ver su espacio y cualquier cosa que esté en reposo en él (su automóvil, sus petardos y usted mismo) contraídos en la dirección este-oeste, pero no en las direcciones norte-sur o arriba-abajo. Esta era la contracción inferida por Fitzgerald, pero puesta ahora sobre una base firme: la contracción es debida a la naturaleza peculiar del espacio y el tiempo, y no se debe a ninguna fuerza física que actúe sobre la materia en movimiento.
- Análogamente, Einstein dedujo que, cuando usted se mueve velozmente hacia el este, debe ver mi espacio y todo lo que esté en reposo en él (mi puesto de policía, mi mesa y yo mismo) contraídos en la dirección este-oeste, pero no en las direcciones norte-sur o arriba-abajo. Puede parecer enigmático que usted me vea contraído y yo le vea contraído, pero de hecho no podría ser de otra forma: ello deja su estado de movimiento y el mío en pie de igualdad, de acuerdo con el principio de relatividad.
- Einstein también dedujo que, cuando usted pasa velozmente, yo veo su flujo del tiempo frenado, es decir, dilatado. El reloj del salpicadero de su automóvil parece andar más lentamente que mi reloj situado en la pared del puesto de policía. Usted habla más lentamente, su cabello crece más lentamente, usted envejece más lentamente que yo.
- Análogamente, de acuerdo con el principio de relatividad, cuando usted pasa velozmente frente a mí, usted ve mi flujo de tiempo frenado. Ve que el reloj en la pared en mi puesto de policía anda más lentamente que el de su salpicadero. A usted le parece que yo hablo más lentamente, que mi cabello crece más lentamente y que yo envejezco más lentamente que usted.

¿Cómo puede ser que yo vea que su tiempo fluye más lentamente, mientras que usted ve que el mío es más lento? ¿Cómo es esto lógicamente posible? ¿Y

cómo puedo yo ver su espacio contraído mientras que usted ve mi espacio contraído? La respuesta radica en la relatividad de la simultaneidad. Usted y yo discrepamos al decir que sucesos en diferentes posiciones en nuestros espacios respectivos son simultáneos, y este desacuerdo resulta encajar con nuestros desacuerdos sobre el flujo del tiempo y la contracción del espacio de la manera precisa para hacer que todo siga siendo lógicamente consistente. Para demostrar esta consistencia, no obstante, necesitaría más páginas de las que quisiera emplear, de modo que les remito, para una demostración, al capítulo 3 de Taylor y Wheeler (1992).

¿Cómo es posible que nosotros, como seres humanos, no hayamos notado nunca este extraño comportamiento del espacio y el tiempo en nuestras vidas cotidianas? La respuesta radica en nuestra lentitud. Nosotros siempre nos movemos unos con respecto a otros a velocidades mucho menores que la de la luz (299.792 kilómetros por segundo). Si su automóvil se desplazase por Colorado Boulevard a 150 kilómetros por hora, yo vería su flujo del tiempo dilatado y su espacio contraído en, aproximadamente, una parte en cien billones (1×10^{-14}), algo demasiado pequeño para que lo notemos. Por el contrario, si su automóvil pasase frente a mí a un 87 por 100 de la velocidad de la luz, entonces (utilizando instrumentos de respuesta muy rápida) yo vería que su flujo del tiempo es dos veces más lento que el mío, mientras que usted vería que mi flujo del tiempo es dos veces más lento que el suyo; análogamente, yo vería todas las cosas en su coche con una longitud mitad de la normal en la dirección este-oeste, y usted vería cualquier cosa en mi puesto de policía con una longitud mitad de la normal en la dirección este-oeste. De hecho, en el siglo xx que termina se ha llevado a cabo una amplia variedad de experimentos que han verificado que el espacio y el tiempo se comportan precisamente de esta forma.²⁶

¿Cómo llegó Einstein a semejante descripción radical del espacio y el tiempo?

No lo hizo a partir del examen de resultados experimentales. Los relojes de su época eran demasiado imprecisos para mostrar, a las bajas velocidades alcanzables, cualquier dilatación del tiempo o cualquier desacuerdo sobre la simultaneidad, y las reglas de medir eran demasiado imprecisas para mostrar contracciones de la longitud. Los únicos experimentos relevantes eran aquellos pocos, tales como el experimento de Michelson-Morley, que sugerían que la velocidad de la luz en la superficie de la Tierra debería ser la misma en todas las direcciones. ¡Realmente eran datos muy escasos sobre los que basar una revisión tan radical de las nociones de espacio y tiempo! Además, Einstein prestó poca atención a estos experimentos.

En lugar de ello, Einstein confió en su propia intuición acerca de cómo *deberían* comportarse las cosas. Tras mucha reflexión, se le hizo *intuitivamente obvio* que la velocidad de la luz debe ser una constante universal, independiente de la dirección e independiente del movimiento de cada uno. Sólo entonces, razonó él, podrían las leyes electromagnéticas de Maxwell hacerse uniformemente simples y bellas (por ejemplo, «las líneas de campo magnético nunca tienen extremos»), y estaba firmemente convencido de que en cierto sentido pro-

fundo el Universo insiste en tener leyes simples y bellas. Por lo tanto, introdujo como un nuevo principio sobre el que basar toda la física su principio del carácter absoluto de la velocidad de la luz.

Este principio por sí mismo, sin ninguna otra cosa más, ya garantizaba que el edificio de las leyes físicas construido sobre los cimientos de Einstein diferiría profundamente del de Newton. *Un físico newtoniano, que supone que el espacio y el tiempo son absolutos, está obligado a concluir que la velocidad de la luz es relativa —depende del estado de movimiento de cada uno (como muestra la analogía del pájaro y el tren que se expuso antes en este capítulo). Einstein, al suponer que la velocidad de la luz es absoluta, estaba obligado a concluir que el espacio y el tiempo son relativos: dependen del estado de movimiento de cada uno. Habiendo deducido que el espacio y el tiempo son relativos, Einstein fue impulsado por su búsqueda de la simplicidad y la belleza a su principio de relatividad:²⁷ ningún estado de movimiento debe ser privilegiado frente a ningún otro; todos los estados de movimiento deben ser iguales a los ojos de la ley física.*

No sólo los experimentos fueron de poca importancia en la construcción einsteiniana de un nuevo fundamento para la física; tampoco las ideas de los otros físicos fueron importantes. Prestó poca atención al trabajo de los demás. Ni siquiera parece haber leído algunos de los artículos técnicos importantes sobre el espacio, el tiempo y el éter que Hendrik Lorentz, Henri Poincaré, Joseph Larmor y otros escribieron entre 1896 y 1905.

En sus artículos, Lorentz, Poincaré y Larmor andaban a tientas hacia la misma revisión de nuestras nociones del espacio y el tiempo que Einstein, pero andaban a tientas entre una niebla de concepciones erróneas que les imponía la física newtoniana. Einstein, por el contrario, fue capaz de desprenderse de todas las falsas concepciones newtonianas. Su convicción de que el Universo ama la simplicidad y la belleza, y su disposición a guiarse por esta convicción, incluso si eso significaba destruir los fundamentos de la física newtoniana, le condujeron, con una claridad de ideas que otros no podían encajar, a su nueva descripción del espacio y el tiempo.

El principio de relatividad jugará más adelante un papel importante en este libro. Por esta razón dedicaré algunas páginas a una explicación más profunda de dicho principio.

Una explicación más profunda requiere el concepto de *sistema de referencia*. Un sistema de referencia es un laboratorio que contiene todos los aparatos de medida que uno pudiera necesitar para cualquier medida que desee hacer. El laboratorio y todos sus aparatos deben moverse juntos por el Universo; todos ellos deben compartir el mismo movimiento. De hecho, el movimiento del sistema de referencia es realmente la cuestión central. Cuando un físico habla de «diferentes sistemas de referencia», el énfasis se pone en los diferentes estados de movimiento y no en diferentes aparatos de medida en los laboratorios.

El laboratorio de un sistema de referencia y sus aparatos no necesitan ser reales. Pueden ser perfectamente constructos imaginarios, existentes sólo en la

mente del físico que se quiere plantear alguna cuestión tal como: «Si estuviera en una nave espacial flotando a través del cinturón de asteroides, y fuera a medir el tamaño de algún asteroide particular, ¿cuál sería la respuesta?». Los físicos se imaginan a sí mismos en un sistema de referencia (laboratorio) ligado a su nave espacial y utilizando los aparatos de dicho sistema para hacer la medida.

Einstein no expresó su principio de relatividad en términos de sistemas de referencia arbitrarios, sino en términos de unos sistemas bastante especiales: sistemas (laboratorios) que se mueven libremente por su propia inercia, que no son empujados ni atraídos por ninguna fuerza y que, por consiguiente, continúan para siempre en el mismo estado de movimiento uniforme en el que empezaron. Einstein denominó *inerciales* a tales sistemas porque su movimiento está gobernado solamente por su propia inercia.

Un sistema de referencia ligado a un cohete a reacción (un laboratorio en el interior del cohete) *no* es inercial, porque su movimiento está afectado por el empuje del cohete tanto como por su inercia. El empuje impide que el movimiento del sistema sea uniforme. Un sistema de referencia ligado a la lanzadera espacial cuando hace su entrada en la atmósfera de la Tierra tampoco es inercial, porque la fricción entre la pared de la lanzadera y las moléculas de aire de la Tierra frena la lanzadera y hace que su movimiento no sea uniforme.

Lo que es más importante, cerca de cualquier cuerpo masivo tal como la Tierra, *todos* los sistemas de referencia están atraídos por la gravedad. No hay ninguna forma de proteger un sistema de referencia (o cualquier otro objeto) de la atracción de la gravedad. Por lo tanto, al restringirse a sistemas inerciales Einstein renunció a considerar, en 1905, situaciones físicas en las que la gravedad es importante;* en efecto, él idealizó nuestro Universo como uno en el que no había ninguna gravedad. Idealizaciones extremas como ésta son fundamentales para el progreso en física; se omiten, conceptualmente, aspectos del Universo que son difíciles de tratar, y sólo después de obtener algún control intelectual sobre los restantes aspectos más fáciles de tratar se vuelve a los más difíciles. Einstein alcanzó el control intelectual sobre un Universo idealizado sin gravedad en 1905. Entonces emprendió la tarea más difícil de comprender la naturaleza del espacio y el tiempo en nuestro Universo real dotado de gravedad, una tarea que finalmente le obligaría a concluir que la gravedad distorsiona el espacio y el tiempo (capítulo 2).

Una vez entendido el concepto de sistema de referencia inercial, estamos listos para una formulación más precisa y más profunda del principio de relatividad de Einstein: *Formúlese cualquier ley de la física en términos de medidas realizadas en un sistema de referencia inercial. Entonces, cuando se reformula en*

* Esto significa que hice una pequeña trampa al utilizar un coche deportivo a gran velocidad, que experimenta la gravedad de la Tierra, en mi ejemplo anterior. Sin embargo, resulta que puesto que la atracción gravitatoria de la Tierra es perpendicular a la dirección de movimiento del automóvil (dirección hacia abajo frente a dirección horizontal), aquélla no afecta a ninguna de las cuestiones discutidas en la historia del coche deportivo.

términos de medidas en cualquier otro sistema inercial, dicha ley de la física debe tomar exactamente la misma forma matemática y lógica que en el sistema original. En otras palabras, las leyes de la física no deben proporcionar ningún medio para distinguir un sistema de referencia inercial (un estado de movimiento uniforme) de cualquier otro.

Dos ejemplos de leyes físicas harán esto más claro:

- «Cualquier objeto libre (sobre el que no actúan fuerzas) que está inicialmente en reposo en un sistema de referencia inercial permanecerá siempre en reposo; y cualquier objeto libre que inicialmente se está moviendo en un sistema de referencia inercial continuará moviéndose para siempre, a lo largo de una línea recta con velocidad constante.» Si (como es el caso) tenemos fuertes razones para creer que esta versión relativista de la primera ley del movimiento de Newton es verdadera en al menos un sistema de referencia inercial, entonces el principio de relatividad insiste en que debe ser verdadera en todos los sistemas de referencia inerciales independientemente de su situación en el Universo e independientemente de la velocidad con que se muevan.
- Las leyes de Maxwell del electromagnetismo deben tomar la misma forma en todos los sistemas de referencia. No lo hacían así cuando la física se construía sobre bases newtonianas (las líneas de campo magnético podían tener extremos en algunos sistemas pero no en otros), y este fallo era profundamente perturbador para Lorentz, Poincaré, Larmor y Einstein. En opinión de Einstein era absolutamente inaceptable que las leyes fueran simples y bellas en un sistema, el del éter, pero complejas y feas en todos los sistemas que se mueven con respecto al éter. Al reconstruir los fundamentos de la física, Einstein hizo posible que las leyes de Maxwell tomaran la misma forma simple y bella (por ejemplo, «las líneas de campo magnético nunca tienen extremos») en todos y cada uno de los sistemas de referencia inerciales —de acuerdo con su principio de relatividad.

El principio de relatividad es realmente un *metaprincipio* en el sentido de que no es en sí mismo una ley de la física, sino que es más bien una pauta o regla (afirmaba Einstein) que deben obedecer *todas* las leyes de la física, no importa cuáles puedan ser estas leyes, ni tampoco si son leyes que gobiernan la electricidad y el magnetismo, o los átomos y moléculas, o las máquinas de vapor y los automóviles deportivos. La potencia de este metaprincipio es impresionante. Toda nueva ley que se proponga debe ser confrontada con él. Si la nueva ley supera el test (si la ley es la misma en todos los sistemas de referencia inerciales), entonces la ley tiene alguna esperanza de describir el comportamiento de nuestro Universo. Si no supera el test, entonces no tiene ninguna esperanza, afirmaba Einstein; debe ser rechazada.

Toda nuestra experiencia acumulada en los casi 100 años transcurridos desde 1905 sugiere que Einstein estaba en lo cierto. Todas las leyes nuevas que han

sido acertadas en la descripción del Universo real han resultado obedecer al principio de relatividad de Einstein. Este metaprincipio se ha consagrado como un regidor de la ley física.

En mayo de 1905, una vez que su discusión con Michele Angelo Besso había desatascado su bloqueo mental y le había permitido abandonar el espacio y el tiempo absolutos, Einstein sólo necesitó unas pocas semanas de reflexión y cálculo para establecer su nueva base para la física, y deducir sus consecuencias con respecto a la naturaleza del espacio, el tiempo, el electromagnetismo y los comportamientos de los objetos a alta velocidad. Dos de las consecuencias eran espectaculares: la masa puede transformarse en energía (lo que llegó a ser la base de la bomba atómica; véase el capítulo 6), y la inercia de cada objeto debe aumentar de forma tan rápida, conforme su velocidad se aproxima a la velocidad de la luz, que por mucha que sea la fuerza con que uno empuja al objeto, nunca podrá conseguir que éste alcance o sobrepase la velocidad de la luz («nada puede viajar más rápido que la luz»).*

A finales de junio, Einstein escribió un artículo técnico describiendo estas ideas y sus consecuencias y lo envió a los *Annalen der Physik*. Su artículo llevaba el título algo trivial de «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento». Pero no era ni mucho menos trivial. Un examen rápido mostraba que Einstein, el «experto técnico de tercera clase» de la Oficina de Patentes de Suiza, planteaba una base completamente nueva para la física, proponía un metaprincipio al que todas las leyes físicas futuras debían obedecer, revisaba radicalmente nuestros conceptos de espacio y tiempo y derivaba consecuencias espectaculares. Las nuevas bases de Einstein y sus consecuencias pronto iban a ser conocidas como *relatividad especial* («especial» porque describe correctamente el Universo sólo en aquellas situaciones especiales en que la gravedad es poco importante).

El artículo de Einstein fue recibido en las oficinas de los *Annalen der Physik*, en Leipzig, el 30 de junio de 1905. Fue examinado por un evaluador para juzgar su exactitud e importancia, fue considerado aceptable y fue publicado.²⁸

En las semanas posteriores a su publicación, Einstein esperó con expectación una respuesta de los grandes físicos del momento. Su punto de vista y sus conclusiones eran tan radicales y tenían tan poca base experimental que él esperaba una fuerte crítica y controversia. En lugar de ello, se encontró con un silencio sepulcral. Finalmente, muchas semanas más tarde, llegó una carta de Berlín: Max Planck pedía aclaraciones sobre algunas cuestiones técnicas del artículo. ¡Einstein estaba más que contento! Recibir la atención de Planck, uno de los más reputados de entre todos los físicos vivos, era profundamente satisfactorio. Y cuando Planck siguió utilizando al año siguiente el principio de relatividad de Einstein como una herramienta capital en su propia investigación, Einstein se animó más todavía. La aprobación de Planck, la aprobación gradual de otros físicos destacados y, lo que es más importante, su propia auto-

* Pero véase la advertencia que se hace en el capítulo 14.

confianza suprema le mantuvieron firme durante los veinte años siguientes en los que la controversia que él había esperado se desató realmente en torno a su teoría de la relatividad. La controversia era tan fuerte aún en 1922 que, cuando el secretario de la Academia Sueca de Ciencias informó por telegrama a Einstein que había ganado el Premio Nobel, el telegrama afirmaba explícitamente que la relatividad *no* estaba entre los trabajos que le habían valido el premio.

La controversia cesó finalmente en los años treinta, cuando la tecnología avanzó lo suficiente para hacer posibles verificaciones experimentales aproximadas de las predicciones de la relatividad especial. Ahora, en los años noventa, no cabe ninguna duda: todos los días más de 10^{17} electrones en los aceleradores de partículas de la Universidad de Stanford, la Universidad de Cornell y otros muchos lugares son lanzados a velocidades tan elevadas como 0,9999999995 veces la velocidad de la luz; y su comportamiento a estas velocidades ultraaltas está en completo acuerdo con las leyes de la física tal como las describe la relatividad especial de Einstein. Por ejemplo, la inercia de los electrones aumenta conforme se acercan a la velocidad de la luz, lo que impide que la puedan alcanzar alguna vez; y cuando los electrones chocan con algún blanco, producen partículas de alta velocidad, llamadas mesones mu, que viven sólo durante 2,22 microsegundos medidos en su propio tiempo, aunque, debido a la dilatación del tiempo, viven durante 100 microsegundos o más medidos según el tiempo de los físicos que están en reposo en el laboratorio.

La naturaleza de la ley física

¿Significa el triunfo de la relatividad especial de Einstein que debemos abandonar totalmente las leyes de la física newtoniana? Obviamente no. Las leyes newtonianas siguen utilizándose ampliamente en la vida cotidiana, en la mayoría de los campos de la ciencia y en la mayor parte de la tecnología. No prestamos atención a la dilatación del tiempo cuando planeamos un viaje en avión, y los ingenieros no se preocupan por la contracción de la longitud cuando diseñan un avión. La dilatación y la contracción son demasiado pequeñas para que se las tome en consideración.

Por supuesto, *podríamos* utilizar, si quisiéramos, las leyes de Einstein en lugar de las leyes de Newton en la vida de cada día. Las dos dan casi exactamente las mismas predicciones para todos los efectos físicos, puesto que la vida diaria implica velocidades relativas que son muy pequeñas comparadas con la velocidad de la luz.

Las predicciones de Einstein y Newton empiezan a diferir fuertemente sólo cuando las velocidades relativas se aproximan a la velocidad de la luz. Entonces y sólo entonces debemos abandonar las predicciones de Newton y atenernos estrictamente a las de Einstein.

Este es un ejemplo de una pauta muy general, que nos encontraremos de nuevo en capítulos futuros. Es una pauta que se ha repetido una y otra vez en la historia de la física del siglo xx: un conjunto de leyes (en nuestro caso las

leyes newtonianas) es ampliamente aceptado al principio, porque concuerda muy bien con el experimento. Pero luego los experimentos se hacen más precisos y este primer conjunto de leyes resulta funcionar bien sólo en un dominio limitado, su *dominio de validez* (para las leyes de Newton, el dominio de velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz). Entonces los físicos se esfuerzan, experimental y teóricamente, para comprender qué está pasando en el límite de dicho dominio de validez, y finalmente formulan un nuevo conjunto de leyes que es muy acertado dentro, cerca y más allá del límite (en el caso de Newton, la *relatividad especial de Einstein*, válida a velocidades próximas a la de la luz tanto como a bajas velocidades). Luego el proceso se repite. Nos encontraremos con la repetición en próximos capítulos: el fracaso de la relatividad especial cuando la gravedad se hace importante, y su reemplazo por un nuevo conjunto de leyes llamado *relatividad general* (capítulo 2); el fracaso de la relatividad general cerca de la singularidad interna de un agujero negro, y su reemplazo por un nuevo conjunto de leyes denominado *gravedad cuántica* (capítulo 13).

Se ha dado una característica sorprendente en cada transición de un viejo conjunto de leyes a otro nuevo: en cada caso, los físicos (si eran suficientemente inteligentes) no necesitaban ninguna guía experimental que les dijera dónde empezaría a fallar el viejo conjunto, es decir, que les indicara el límite de su dominio de validez. Ya hemos visto esto para la física newtoniana: las leyes de la electrodinámica de Maxwell no encajaban bien con el espacio absoluto de la física newtoniana. En reposo en el espacio absoluto (en el sistema del éter), las leyes de Maxwell eran simples y bellas —por ejemplo, las líneas de campo magnético no tienen extremos. En los sistemas en movimiento se vuelven complicadas y feas —las líneas de campo magnético tienen a veces extremos. Sin embargo, las complicaciones tienen una influencia despreciable sobre el resultado de los experimentos cuando los sistemas se mueven, con relación al espacio absoluto, a velocidades pequeñas comparadas con la de la luz; entonces casi ninguna línea de campo tiene extremos. Sólo a velocidades que se aproximan a la de la luz era previsible que las feas complicaciones tuvieran una influencia suficientemente grande como para ser medidas con facilidad: montones de extremos. De este modo, era razonable sospechar, incluso en ausencia del experimento de Michelson-Morley, que el dominio de validez de la física newtoniana podría ser el de velocidades pequeñas comparadas con la de la luz, y que las leyes newtonianas podrían venirse abajo a velocidades próximas a la de la luz.

Análogamente, veremos en el capítulo 2 cómo la relatividad especial predice su propio fallo en presencia de gravedad; y en el capítulo 13, veremos cómo la relatividad general predice su propio fallo cerca de una singularidad.

Al contemplar la secuencia anterior de conjuntos de leyes (física newtoniana, relatividad especial, relatividad general, gravedad cuántica), y una secuencia similar de leyes que gobiernan la estructura de la materia y las partículas elementales, la mayoría de los físicos tienden a creer que estas secuencias están convergiendo hacia un conjunto de leyes últimas que verdaderamente gobiernan el Universo, leyes que *obligan* al Universo a comportarse como lo hace,

que *obligan* a la lluvia a condensarse en las ventanas, *obligan* al Sol a quemar combustible nuclear, *obligan* a los agujeros negros a producir ondas gravitatorias cuando colisionan, y así sucesivamente.

Se podría objetar que cada conjunto de leyes en la secuencia «tiene un aspecto» muy diferente del conjunto precedente. (Por ejemplo, el tiempo absoluto de la física newtoniana tiene un aspecto muy diferente de los muchos flujos de tiempo diferentes de la relatividad especial.) En los «aspectos» de las leyes, no hay ningún signo de convergencia. ¿Por qué, entonces, deberíamos esperar una convergencia? La respuesta es que hay que distinguir claramente entre las predicciones hechas a partir de un conjunto de leyes y las imágenes mentales que las leyes transmiten (lo que las leyes «aparentan»). Yo espero la convergencia sólo en términos de predicciones, pero esto es todo lo que finalmente cuenta. Las imágenes mentales (un tiempo absoluto en la física newtoniana frente a muchos flujos del tiempo en la física relativista) no son importantes para la naturaleza última de la *realidad*. De hecho, es posible cambiar completamente lo que un conjunto de leyes «aparenta» sin cambiar sus predicciones. En el capítulo II discutiré y daré ejemplos de este hecho notable, y explicaré sus implicaciones para la naturaleza de la realidad.

¿Por qué espero convergencia en términos de predicciones? Porque toda la evidencia de que disponemos apunta hacia ello. Cada conjunto de leyes tiene un dominio de validez más amplio que los conjuntos que le preceden: las leyes de Newton funcionan en el dominio de la vida cotidiana, pero no en los aceleradores de partículas de los físicos y tampoco en partes exóticas del Universo distante, tales como púlsares, cuásares y agujeros negros; las leyes de la relatividad general de Einstein funcionan en cualquiera de nuestros laboratorios, y en cualquier parte del Universo distante, excepto en el interior profundo de los agujeros negros y en el big bang en el que nació el Universo; podría resultar que las leyes de la gravedad cuántica (que aún no entendemos bien, ni mucho menos) funcionen absolutamente en cualquier parte.

A lo largo de este libro adoptaré, sin justificación, el punto de vista de que *existe* un conjunto final de leyes físicas (que aún no conocemos pero que podría ser la gravedad cuántica), y que estas leyes verdaderamente *gobiernan*, en todo lugar, el Universo que nos rodea. Ellas *obligan* al Universo a comportarse como lo hace. Cuando tenga que ser extremadamente preciso, diré que las leyes con las que ahora trabajamos (por ejemplo, la relatividad general) son «una aproximación a» o «una descripción aproximada de» las verdaderas leyes. Sin embargo, con frecuencia abandonaré las comillas y no distinguiré entre las verdaderas leyes y nuestras aproximaciones a ellas. En estas ocasiones afirmaré, por ejemplo, que «las leyes de la relatividad general [más bien que las verdaderas leyes] *obligan* a un agujero negro a mantener a la luz tan estrechamente en su poder que la luz no puede escapar del horizonte del agujero». Así es cómo mis colegas físicos y yo pensamos cuando nos esforzamos en comprender el Universo. Es una forma fructífera de pensar; ha ayudado a producir profundas ideas nuevas acerca de las estrellas que implosionan, los agujeros negros, las ondas gravitatorias y otros fenómenos.

Este punto de vista es incompatible con la opinión común de que los físicos trabajan con *teorías* que tratan de describir el Universo, pero que son solamente invenciones humanas y no tienen poder real sobre el Universo. La palabra *teoría*, de hecho, está tan cargada de connotaciones de provisionalidad y capricho humano que evitaré usarla siempre que sea posible. En su lugar utilizaré la expresión *ley física* con su firme connotación de algo que realmente gobierna el Universo, es decir, que verdaderamente obliga al Universo a comportarse como lo hace.