

Biblioteca
STEPHEN HAWKING

EDICIÓN DE

STEPHEN HAWKING

EL UNIVERSO EN UNA CÁSCARA DE NUEZ

CRÍTICA

EL UNIVERSO en una CÁSCARA de NUEZ

Stephen Hawking

Traducción castellana de
David Jou

CRÍTICA
BARCELONA

Primera edición: marzo de 2002

Primera edición en esta nueva presentación: enero de 2025

El universo en una cáscara de nuez

Stephen Hawking

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

Queda expresamente prohibida la utilización o reproducción de este libro o de cualquiera de sus partes con el propósito de entrenar o alimentar sistemas o tecnologías de inteligencia artificial.

Título original: *The Universe in a Nutshell*

© Stephen Hawking, 2001

Traducción de David Jou

© de las ilustraciones, Moonrunner Design Ltd. UK and The Book Laboratoryä Inc., 2001

© Editorial Planeta, S. A., 2025

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. 22.746-2024

Impresión y encuadernación: Arteos Digital

Printed in Spain - Impreso en España



•

Índice

<i>Prefacio</i>	9
1. Breve historia de la relatividad	13
2. La forma del tiempo	41
3. El universo en una cáscara de nuez	79
4. Prediciendo el futuro	113
5. Protegiendo el pasado	147
6. ¿Será nuestro futuro como <i>Star Trek</i> o no?	173
7. Los nuevos universos membrana	193
 <i>Glosario</i>	 223
<i>Sugerencias de lecturas adicionales</i>	235
<i>Créditos de las fotografías</i>	237
<i>Índice onomástico</i>	239

Breve historia de la relatividad

Cómo Einstein formuló las bases de las dos teorías fundamentales del siglo XX: la relatividad general y la teoría cuántica



Professor Einstein

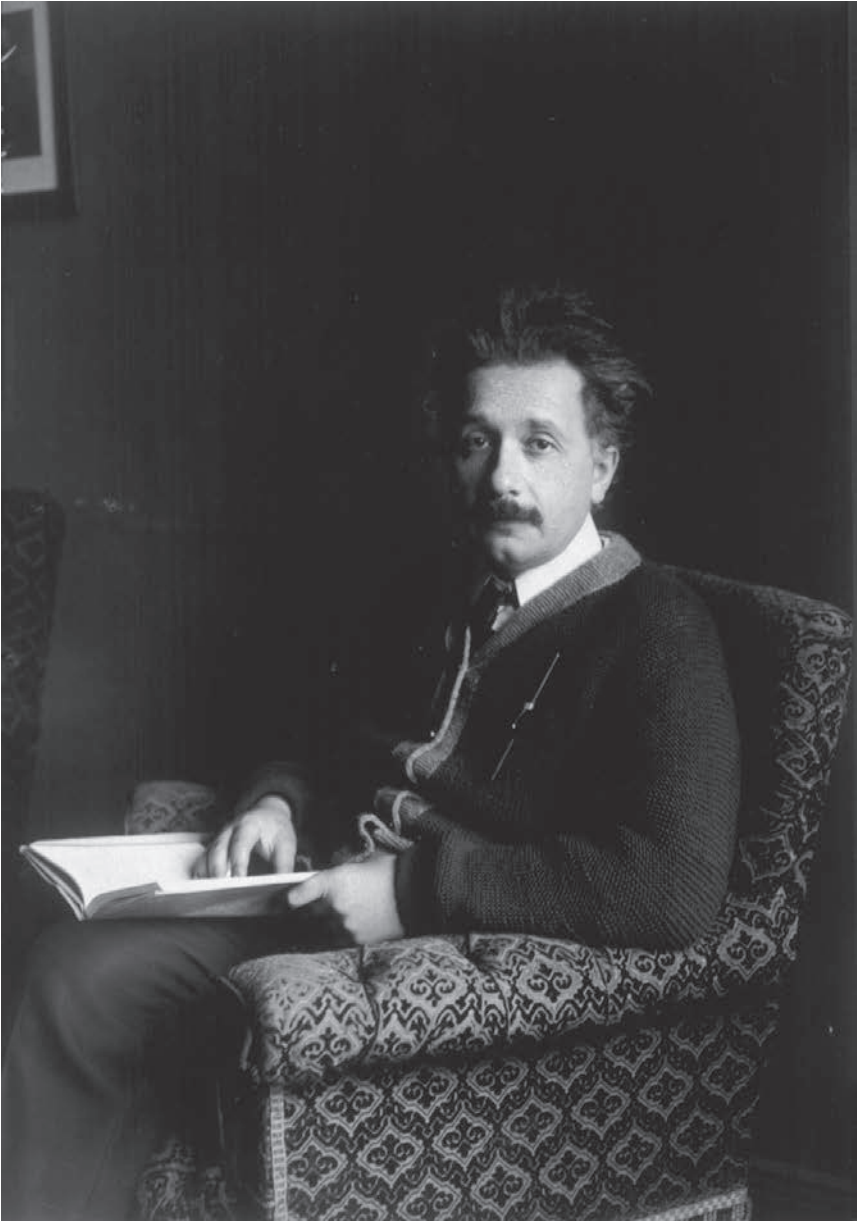
Albert Einstein™

LOW

A handwritten signature in dark ink, reading "A. Einstein". The signature is written in a cursive, flowing style, with the first letter 'A' being particularly large and stylized. The ink appears slightly faded or greyed out.

Albert Einstein, el descubridor de las teorías especial y general de la relatividad, nació en Ulm (Alemania), en 1879, pero al año siguiente la familia se desplazó a Múnich, donde su padre, Hermann, y su tío, Jakob, establecieron un pequeño y no demasiado próspero negocio de electricidad. Albert no fue un niño prodigio, pero las afirmaciones de que sacaba muy malas notas escolares parecen ser una exageración. En 1894, el negocio paterno quebró y la familia se trasladó a Milán. Sus padres decidieron que debería quedarse para terminar el curso escolar, pero Albert odiaba el autoritarismo de su escuela y, al cabo de pocos meses, la dejó para reunirse con su familia en Italia. Posteriormente completó su educación en Zúrich, donde se graduó en la prestigiosa Escuela Politécnica Federal, conocida como ETH, en 1900. Su talante discutidor y su aversión a la autoridad le impidieron ser demasiado apreciado por los profesores de la ETH y ninguno de ellos le ofreció un puesto de asistente, que era la vía normal para empezar una carrera académica. Dos años después, consiguió un puesto de trabajo en la oficina suiza de patentes en Berna. Fue mientras ocupaba este puesto que, en 1905, escribió tres artículos que le establecieron como uno de los principales científicos del mundo e inició dos revoluciones conceptuales —revoluciones que cambiaron nuestra comprensión del tiempo, del espacio y de la propia realidad.

Hacia finales del siglo XIX, los científicos creían hallarse próximos a una descripción completa de la naturaleza. Ima-



Albert Einstein en 1920,
Albert Einstein™

ginaban que el espacio estaba lleno de un medio continuo denominado el «éter». Los rayos de luz y las señales de radio eran ondas en este éter, al igual que el sonido consiste en ondas de presión en el aire. Todo lo que faltaba para una teoría completa eran mediciones cuidadosas de las propiedades elásticas del éter. De hecho, avanzándose a tales mediciones, el laboratorio Jefferson de la Universidad de Harvard fue construido sin ningún clavo de hierro, para no interferir con las delicadas mediciones magnéticas. Sin embargo, los diseñadores olvidaron que los ladrillos rojizos con que están contruidos el laboratorio y la mayoría de los edificios de Harvard contienen grandes cantidades de hierro. El edificio todavía se utiliza en la actualidad, aunque en Harvard no están aún muy seguros de cuánto peso puede sostener el piso de una biblioteca sin clavos de hierro que lo sostengan.

Hacia finales del siglo, empezaron a aparecer discrepancias con la idea de un éter que lo llenara todo. Se creía que la luz se propagaría por el éter con una velocidad fija, pero que si un observador viajaba por el éter en la misma dirección que la luz, la velocidad de ésta le parecería menor, y si viajaba en dirección opuesta a la de la luz, su velocidad le parecería mayor (Fig. 1.1).

Sin embargo, una serie de experimentos no consiguió confirmar esta idea. Los experimentos más cuidadosos y precisos fueron los realizados por Albert Michelson y Edward Morley



Fig. 1.1. TEORÍA DEL ÉTER FIJO

Si la luz fuera una onda en un material elástico llamado «éter», su velocidad debería parecer mayor a un observador en una nave espacial que se desplazara hacia la luz (a), y menor a un observador que viajara en la misma dirección que la luz (b).

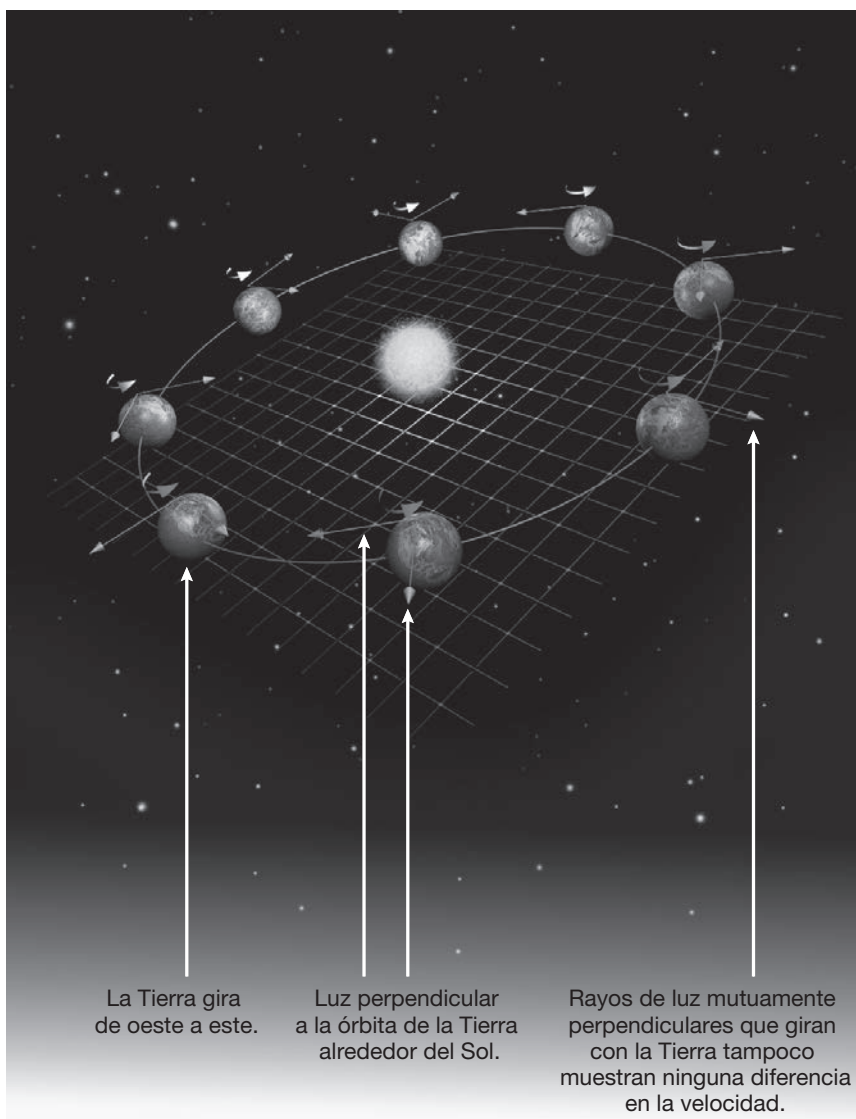


Fig. 1.2. No se halló ninguna diferencia entre la velocidad de la luz en la dirección de la órbita de la Tierra y en la dirección perpendicular a la misma.

en la Case School of Applied Science, en Cleveland (Ohio), en 1887, en que compararon la velocidad de la luz de dos rayos mutuamente perpendiculares. Cuando la Tierra gira sobre su eje y alrededor del Sol, el aparato se desplaza por el éter con

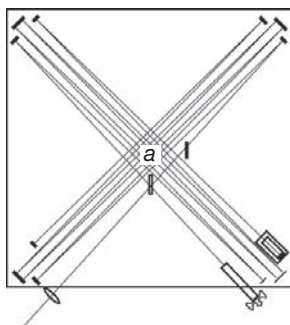
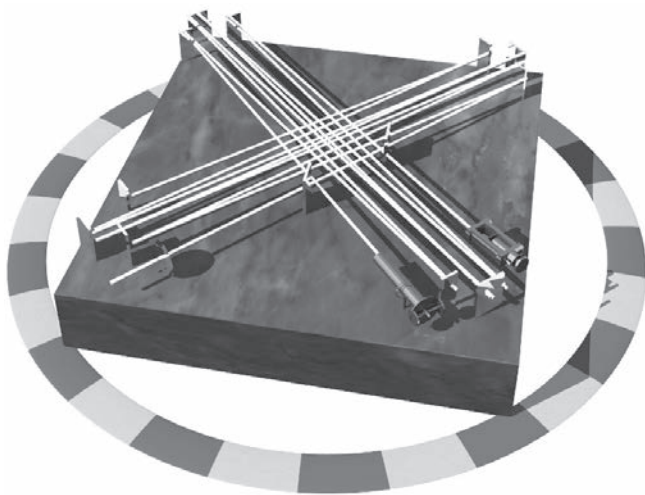


Fig. 1.3. MIDIENDO LA VELOCIDAD DE LA LUZ

En el interferómetro de Michelson-Morley, la luz de una fuente es bifurcada en dos rayos mediante un espejo semiplataado (a). Ambos rayos se desplazan en direcciones perpendiculares y, a continuación, se combinan en un solo rayo haciéndolos incidir de nuevo en el espejo semiplataado. Una diferencia en la velocidad de la luz en ambas direcciones significaría que las crestas de la onda de un rayo podrían llegar al mismo tiempo que los valles de la onda del otro y cancelarse mutuamente.

Abajo: Diagrama del experimento, reconstruido a partir del que apareció en el Scientific American en 1887.

rapidez y dirección variables (Fig. 1.2). Pero Michelson y Morley no observaron diferencias diarias ni anuales entre las velocidades de ambos rayos de luz. Era como si ésta viajara siempre con la misma velocidad con respecto al observador,

fuera cual fuera la rapidez y la dirección en que éste se estuviera moviendo (Fig. 1.3, véase la página 19).

Basándose en el experimento de Michelson-Morley, el físico irlandés George FitzGerald y el físico holandés Hendrik Lorentz sugirieron que los cuerpos que se desplazan por el éter se contraerían y el ritmo de sus relojes disminuiría. Esta contracción y esta disminución del ritmo de los relojes sería tal que todos los observadores medirían la misma velocidad de la luz, independientemente de su movimiento respecto al éter. (FitzGerald y Lorentz todavía lo consideraban como una sustancia real.) Sin embargo, en un artículo publicado en junio de 1905, Einstein subrayó que si no podemos detectar si nos movemos o no en el espacio, la noción de un éter resulta redundante. En su lugar, formuló el postulado de que las leyes de la ciencia deberían parecer las mismas a todos los observadores que se movieran libremente. En particular, todos deberían medir la misma velocidad de la luz, independientemente de la velocidad con que se estuvieran moviendo. La velocidad de la luz es independiente del movimiento del observador y tiene el mismo valor en todas direcciones.

Ello exigió abandonar la idea de que hay una magnitud universal, llamada «tiempo», que todos los relojes pueden medir. Por el contrario, cada observador tendría su propio tiempo personal. Los tiempos de dos personas coincidirían si ambas estuvieran en reposo la una respecto a la otra, pero no si estuvieran desplazándose la una con relación a la otra.

Esto ha sido confirmado por numerosos experimentos, en uno de los cuales se hizo volar alrededor de la Tierra y en sentidos opuestos dos relojes muy precisos que, al regresar, indicaron tiempos ligerísimamente diferentes (Fig. 1.4). Ello podría sugerir que, si quisiéramos vivir más tiempo, deberíamos mantenernos volando hacia el este, de manera que la velocidad del avión se sumara a la de la rotación terrestre. Sin embargo, la pequeña fracción de segundo que ganaríamos así, la perderíamos de sobra por culpa de la alimentación servida en los aviones.

El postulado de Einstein de que las leyes de la naturaleza deberían tener el mismo aspecto para todos los observadores que se movieran libremente constituyó la base de la teoría de

la relatividad, llamada así porque suponía que sólo importa el movimiento relativo. Su belleza y simplicidad cautivaron a muchos pensadores, pero también suscitó mucha oposición. Einstein había destronado dos de los absolutos de la ciencia del siglo XIX: el reposo absoluto, representado por el éter, y el tiempo absoluto o universal que todos los relojes deberían medir. A mucha gente esta idea le resultó inquietante. Se preguntaban si implicaba que *todo* era relativo, que no había reglas morales absolutas. Esta desazón perduró a lo largo de las décadas de 1920 y 1930. Cuando Einstein fue galardonado con el premio Nobel de física en 1921, la citación se refirió a trabajos importantes, pero comparativamente menores (respecto a otras de sus aportaciones), también desarrollados en 1905.

El reloj que va en el avión
que vuela hacia el oeste
indica un tiempo más largo
que el reloj idéntico que viaja
en la dirección opuesta.



Fig. 1.4. Una versión de la paradoja de los gemelos (Fig. 1.5, véase la página 22) ha sido sometida a prueba experimentalmente haciendo volar dos relojes muy precisos en sentidos opuestos alrededor del mundo. Cuando se volvieron a encontrar, el reloj que había viajado hacia el este indicaba un tiempo ligeramente más corto.



Fig. 1.5. PARADOJA DE LOS GEMELOS

En la teoría de la relatividad, cada observador tiene su propia medida del tiempo. Ello puede conducir a la llamada «paradoja de los gemelos». Uno de los gemelos (a) parte a un viaje espacial durante el cual se desplaza con una velocidad próxima a la de la luz (c), en tanto que su hermano (b) se queda en la Tierra. Debido a su movimiento, el tiempo transcurre más lentamente en la nave espacial que para el gemelo que permanece en la Tierra. Por ello, a su regreso, el viajero espacial (a2) constata que su hermano (b2) es más viejo que él. Aunque ello parece desafiar el sentido común, diversos experimentos han corroborado que, efectivamente, el gemelo viajero permanecería más joven.

No se hizo mención alguna a la relatividad, que era considerada demasiado controvertida. (Todavía recibo dos o tres cartas por semana contándome que Einstein estaba equivocado.) No obstante, la teoría de la relatividad es completamente acepta-

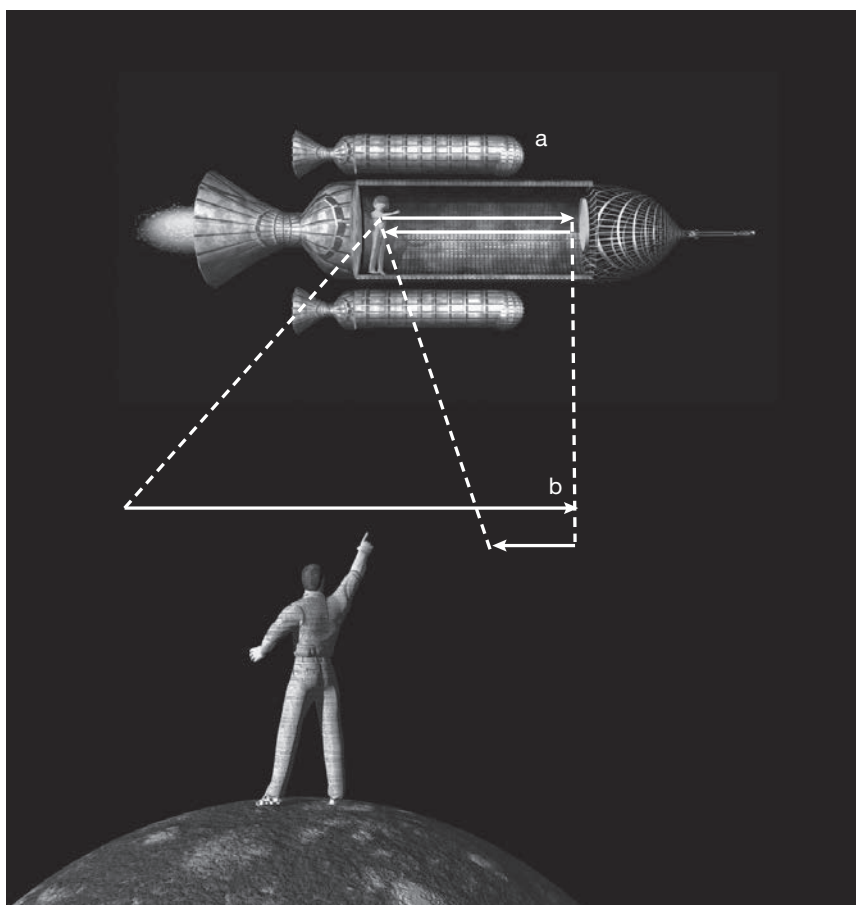


Fig. 1.6. Una nave espacial pasa cerca de la Tierra de izquierda a derecha con una velocidad igual a las cuatro quintas partes de la velocidad de la luz.

En un extremo de la cabina se emite un pulso, que se refleja en el otro extremo (a).

La luz es observada por personas que se hallan en la Tierra y por otras que se encuentran en la nave. Debido al movimiento de ésta, no miden la misma distancia para el recorrido de la luz reflejada (b). Por lo tanto, tampoco deben de estar de acuerdo en el tiempo que ha tardado la luz en su recorrido, ya que, según el postulado de Einstein, la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores que se mueven libremente.

da en la actualidad por la comunidad científica, y sus predicciones han sido verificadas en incontables aplicaciones.

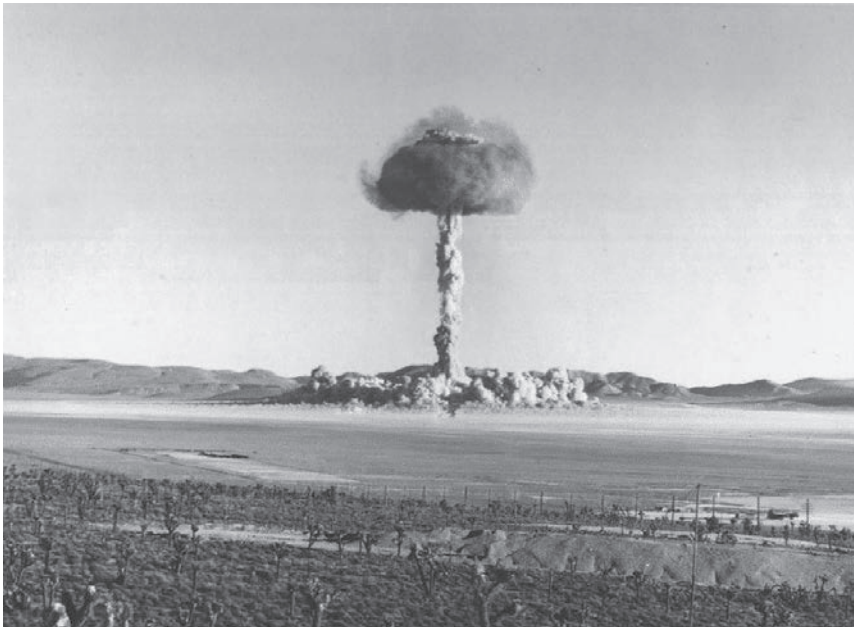
Una consecuencia muy importante de la relatividad es la relación entre masa y energía. El postulado de Einstein de que la



Fig. 1.7

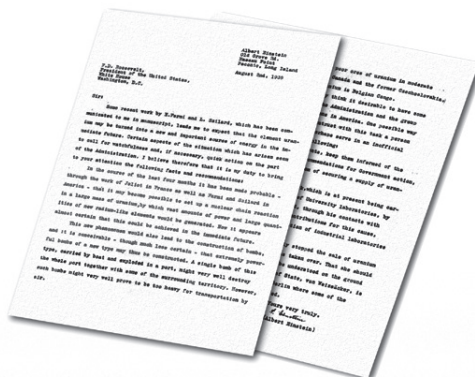
velocidad de la luz debe ser la misma para cualquier espectador implica que nada puede moverse con velocidad mayor que ella. Lo que ocurre es que si utilizamos energía para acelerar algo, sea una partícula o una nave espacial, su masa aumenta, lo cual hace más difícil seguirla acelerando. Acelerar una partícula hasta la velocidad de la luz sería imposible, porque exigiría una cantidad infinita de energía. La masa y la energía son equivalentes, tal como se resume en la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$ (Fig. 1.7). Es, probablemente, la única ecuación de la física reconocida en la calle. Entre sus consecuencias se cuenta el advertir que si un núcleo de uranio se fisiona en dos núcleos con una masa total ligeramente menor, liberará una tremenda cantidad de energía (véase la página 26, Fig. 1.8).





LA PROFÉTICA CARTA DE EINSTEIN AL PRESIDENTE ROOSEVELT EN 1939

En el curso de los últimos cuatro meses se ha ido haciendo más y más probable —con los trabajos de Joliot en Francia y de Fermi y Szilard en América— que pueda conseguirse producir una reacción en cadena en una gran masa de uranio, mediante la cual se liberarían elevadísimas potencias y se generarían nuevos elementos parecidos al radio. Parece casi seguro que ello se podría lograr en un futuro próximo. Este nuevo fenómeno también podría conducir a la fabricación de bombas, y resulta, pues, concebible —aunque mucho menos seguro— que puedan construirse bombas de un nuevo tipo, extremadamente poderosas.



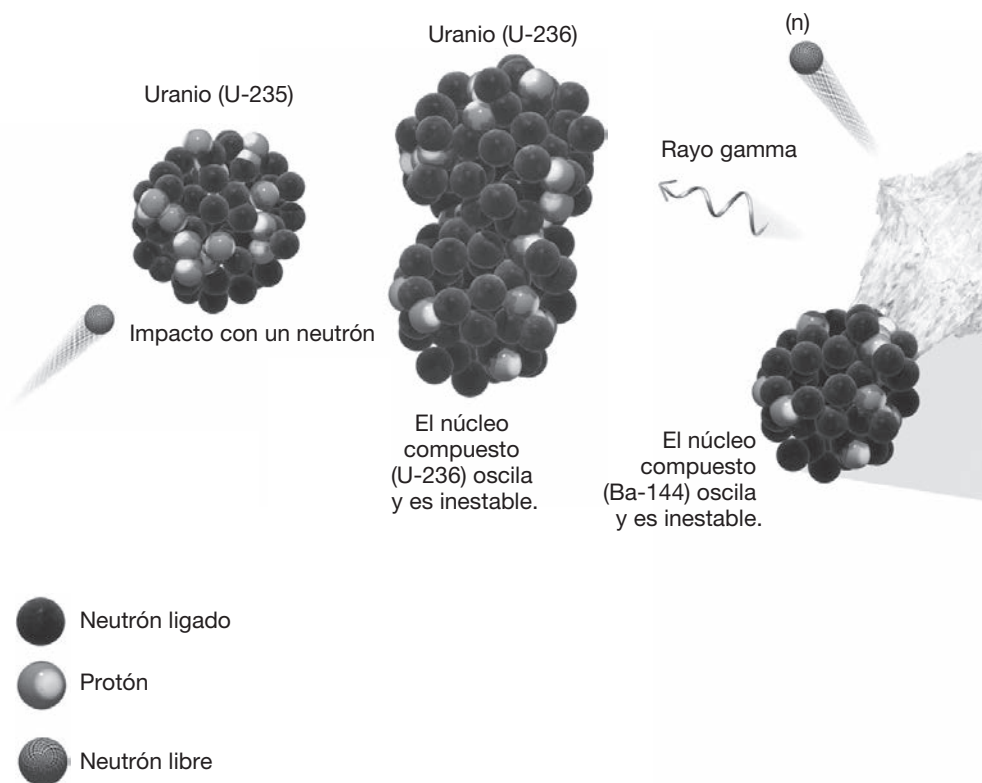


Fig. 1.8. ENERGÍA NUCLEAR DE ENLACE

Los núcleos están formados por protones y neutrones que se mantienen unidos por la fuerza nuclear fuerte. Pero la masa del núcleo siempre es menor que la suma de las masas individuales de los protones y neutrones que lo forman. La diferencia proporciona una medida de la energía nuclear de enlace que mantiene la cohesión de los núcleos. Esta energía de enlace puede ser calculada mediante la relación de Einstein energía nuclear de enlace = Δmc^2 , donde Δm es la diferencia entre la masa del núcleo y la suma de las masas de sus componentes. La liberación de esta energía potencial produce la devastadora potencia explosiva de las armas nucleares.

En 1939, cuando se empezaba a vislumbrar la perspectiva de otra guerra mundial, un grupo de científicos conscientes de estas implicaciones persuadieron a Einstein de que dejara a un lado sus escrúpulos pacifistas y apoyara con su autoridad una carta al presidente Roosevelt urgiendo a los Estados Unidos a emprender un programa de investigación nuclear.

Esto condujo al proyecto Manhattan y, en último término,

El núcleo compuesto (Kr-89) oscila y es inestable.

La ecuación de Einstein entre la energía (E), la masa (m) y la velocidad de la luz (c) es tal que una diminuta cantidad de masa equivale a una enorme cantidad de energía $E=mc^2$.

La fisión produce un promedio de 24 neutrones y una energía de 215 MeV.

(n) neutrones que pueden iniciar una reacción en cadena.

Rayo gamma

REACCIÓN EN CADENA

Un neutrón de la fisión del U-235 original choca contra otro núcleo. Ello produce, a su vez, la fisión de éste y se inicia una reacción en cadena de ulteriores colisiones. Si la reacción se automantiene, se denomina «crítica» y la masa de U-235 correspondiente recibe el nombre de «masa crítica».

a las bombas que explotaron sobre Hiroshima y Nagasaki en 1945. Algunas personas han acusado a Einstein de la bomba porque descubrió la relación entre masa y energía; pero esto sería como acusar a Newton de los accidentes de aviación porque descubrió la gravedad. Einstein no participó en el proyecto Manhattan y quedó horrorizado por el lanzamiento de la bomba.



Fig. 1.9. Un observador en una caja cerrada no puede notar la diferencia entre estar en un ascensor parado en la Tierra (a) o estar acelerado en un cohete en el espacio libre (b). Si se apaga el motor del cohete (c), se siente como si el ascensor estuviera en caída libre (d).

Con sus artículos revolucionarios de 1905, la reputación científica de Einstein quedó bien establecida, pero hasta 1909 no le fue ofrecido un puesto en la Universidad de Zúrich, que le permitió dejar la oficina suiza de patentes. Dos años después, se trasladó a la universidad alemana de Praga, pero regresó a Zúrich en 1912, esta vez a la ETH. A pesar de que el antisemitismo estaba muy extendido en gran parte de Europa, incluso en las universidades, él se había convertido en una figura académica muy apreciada. Le llegaron ofertas de Viena y de Utrecht,



Fig. 1.10

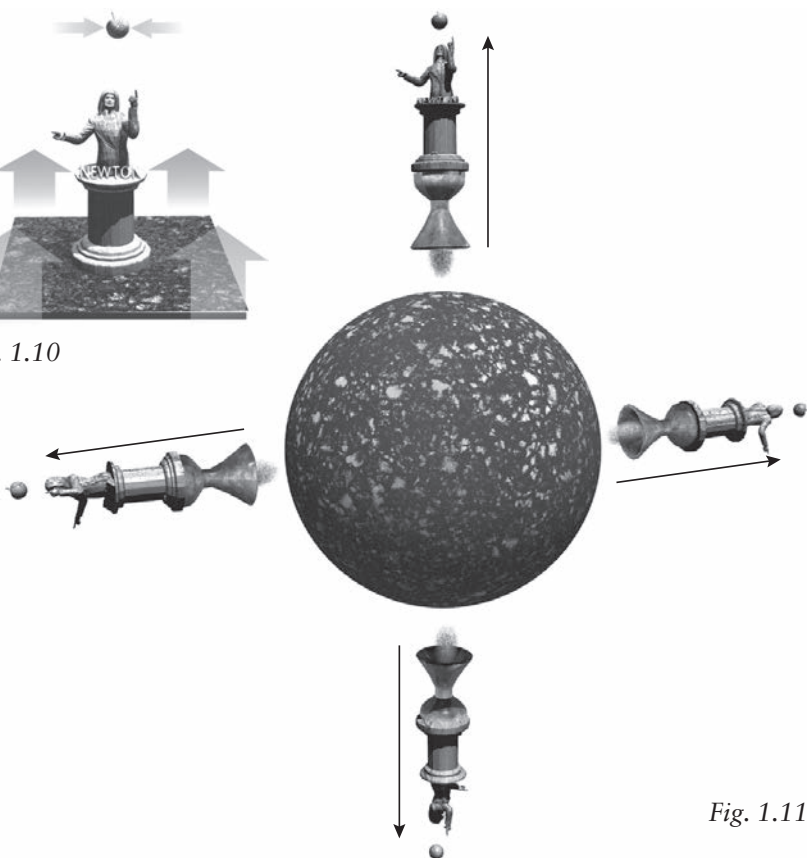


Fig. 1.11

Si la Tierra fuera plana (Fig.1.10), tanto podríamos decir que la manzana cayó sobre Newton debido a la gravedad terrestre, como porque Newton y la Tierra se estaban acelerando hacia arriba. Esta equivalencia no vale en el caso de la Tierra esférica (Fig. 1.11) porque personas en las antípodas deberían estar acelerándose en sentidos opuestos y, al mismo tiempo, no deberían alejarse entre sí. Einstein superó esta dificultad haciendo que el espacio y el tiempo estuvieran curvados.

pero decidió aceptar una plaza de investigador en la Academia Prusiana de Ciencias en Berlín, porque le liberaba de las tareas docentes. Se desplazó a Berlín en abril de 1914 y poco después se reunieron con él su mujer y sus dos hijos. Sin embargo, el matrimonio no funcionaba demasiado bien, y su familia no tardó en regresar a Zúrich. Aunque les visitó en algunas ocasiones, Einstein y su mujer acabaron por divorciarse. Más tarde, Einstein se casó con su prima Elsa, que vivía en Berlín. El he-

cho de que pasara los años de guerra como un soltero, sin obligaciones domésticas, podría ser una de las razones por las cuales este período le resultó tan productivo científicamente.

Aunque la teoría de la relatividad encajaba muy bien con las leyes que gobiernan la electricidad y el magnetismo, no resultaba compatible con la teoría de Newton de la gravitación. De esta ley se sigue que si se modifica la distribución de materia en una región del espacio, el cambio del campo gravitatorio debería notarse inmediatamente por doquier en el universo. Ello no sólo significaría la posibilidad de enviar señales con velocidad mayor que la de la luz (lo cual está prohibido por la relatividad); para saber qué significa instantáneo también exigiría la existencia de un tiempo absoluto o universal, que la relatividad había abolido en favor de un tiempo personal.

Einstein ya era consciente de esta dificultad en 1907, cuando todavía estaba en la oficina de patentes de Berna, pero hasta que estuvo en Praga en 1911 no empezó a pensar seriamente en ella. Cayó en la cuenta de que hay una relación profunda entre aceleración y campo gravitatorio. Alguien que se hallara en el interior de una caja cerrada, como por ejemplo un ascensor, no podría decir si ésta estaba en reposo en el

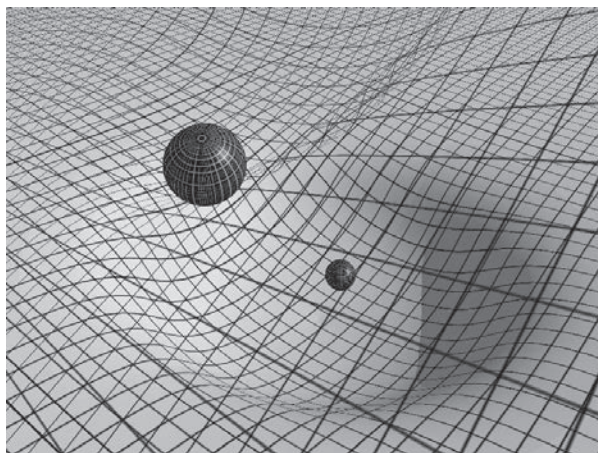


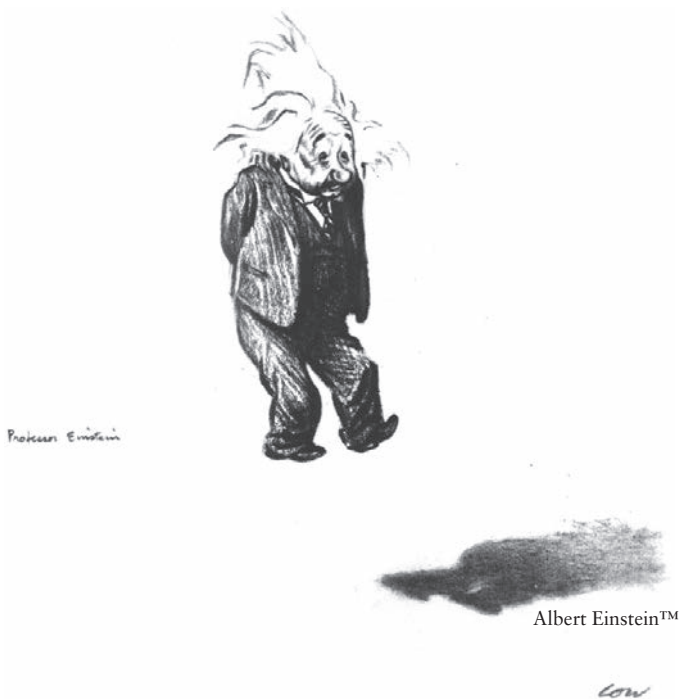
Fig. 1.12. EL ESPACIO-TIEMPO SE CURVA

La aceleración y la gravedad sólo pueden ser equivalentes si un cuerpo pesado deforma el espacio-tiempo, curvando así las trayectorias de los objetos en sus proximidades.

campo gravitatorio terrestre o si estaba siendo acelerada por un cohete en el espacio libre. (Naturalmente, esto pasaba antes de la época de *Star Trek*, por lo cual Einstein imaginó la gente en ascensores y no en naves espaciales.) Pero no podemos acelerar o caer libremente mucho tiempo en un ascensor sin que se produzca un desastre (Fig. 1.9).

Si la Tierra fuera plana, tanto podríamos decir que la manzana cayó sobre la cabeza de Newton debido a la gravedad o debido a que Newton y la superficie de la Tierra se estaban acelerando hacia arriba (Fig. 1.10). No obstante, esta equivalencia entre aceleración y gravedad no parecía funcionar para una Tierra esférica —ya que observadores que estuvieran en las antípodas deberían estar acelerándose en sentidos opuestos, pero permaneciendo a la vez a la misma distancia entre sí (Fig. 1.11).

Pero a su regreso a Zúrich en 1912, Einstein tuvo la idea genial de que esa equivalencia funcionaría si la geometría del espacio-tiempo fuera curva en lugar de plana, como se había supuesto hasta entonces. Su idea consistió en que la masa y la



energía deformarían el espacio-tiempo en una manera todavía por determinar. Los objetos como las manzanas o los planetas intentarían moverse en líneas rectas por el espacio-tiempo, pero sus trayectorias parecerían curvadas por un campo gravitatorio porque el espacio-tiempo es curvo (Fig. 1.12).

Con la ayuda de su amigo Marcel Grossmann, Einstein estudió la teoría de las superficies y los espacios curvados que había sido desarrollada anteriormente por Georg Friedrich Riemann como un trabajo de matemáticas abstractas; a Riemann ni se le había ocurrido que pudiera resultar relevante en el mundo real. En 1913, Einstein y Grossmann escribieron un artículo conjunto en que propusieron la idea de que lo que consideramos fuerzas gravitatorias son sólo una expresión del hecho de que el espacio-tiempo es curvo. Sin embargo, debido a un error de Einstein (que era muy humano y por lo tanto falible), no pudieron hallar las ecuaciones que relacionan la curvatura del espacio-tiempo con su contenido de masa y energía. Einstein siguió trabajando en el problema en Berlín, sin estorbos domésticos y casi sin ser afectado por la guerra, hasta que finalmente dio con las ecuaciones correctas en noviembre de 1915. Había hablado de sus ideas con el matemático David Hilbert durante una visita a la Universidad de Gotinga, en verano de 1915, y éste halló independientemente las mismas ecuaciones unos pocos días antes que Einstein. Sin embargo, como el mismo Hilbert admitió, el mérito de la nueva teoría correspondía por completo a Einstein, ya que suya había sido la idea de relacionar la gravedad con la deformación del espacio-tiempo. Es un tributo al estado civilizado de la Alemania de aquel tiempo que estas discusiones e intercambios científicos pudieran seguirse realizando casi sin estorbos incluso durante la guerra. Es un contraste muy acusado con la época nazi de veinte años más tarde.

La nueva teoría del espacio-tiempo curvado fue denominada «relatividad general», para distinguirla de la teoría original sin gravedad, que fue conocida desde entonces como relatividad especial. Fue confirmada de manera espectacular en 1919, cuando una expedición británica a África occidental observó durante un eclipse una ligera curvatura de la luz de una estrella

al pasar cerca del Sol (Fig. 1.13). Ello constituía una evidencia directa de que el espacio y el tiempo son deformados, y provocó el mayor cambio en nuestra percepción del universo desde que Euclides escribió sus *Elementos de geometría* hacia 300 a. C.

En la teoría general de la relatividad de Einstein, el espacio y el tiempo pasaron a ser de un mero escenario pasivo en que se producen los acontecimientos a participantes activos en la dinámica del universo. Ello condujo a un gran problema que se ha mantenido en la frontera de la física durante el siglo xx. El universo está lleno de materia, y ésta deforma el espacio-tiempo de tal suerte que los cuerpos se atraen. Einstein halló que sus ecuaciones no admitían ninguna solución que describiera un universo estático, invariable en el tiempo. En vez de abandonar este universo perdurable, en que tanto él como la mayoría de la gente creían, trucó sus ecuaciones añadiéndoles un término denominado «constante cosmológica», que cur-

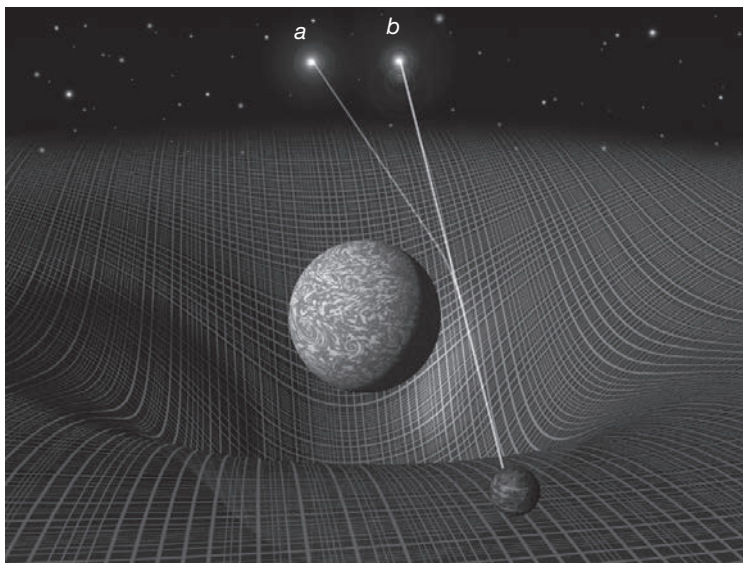


Fig. 1.13. LA LUZ SE CURVA

La luz de una estrella se curva al pasar cerca del Sol debido a la forma en que la masa de éste curva el espacio-tiempo (a). Ello produce una ligera desviación en la posición aparente de la estrella con respecto a la posición en que la vemos desde la Tierra (b), como puede ser comprobado en los eclipses.

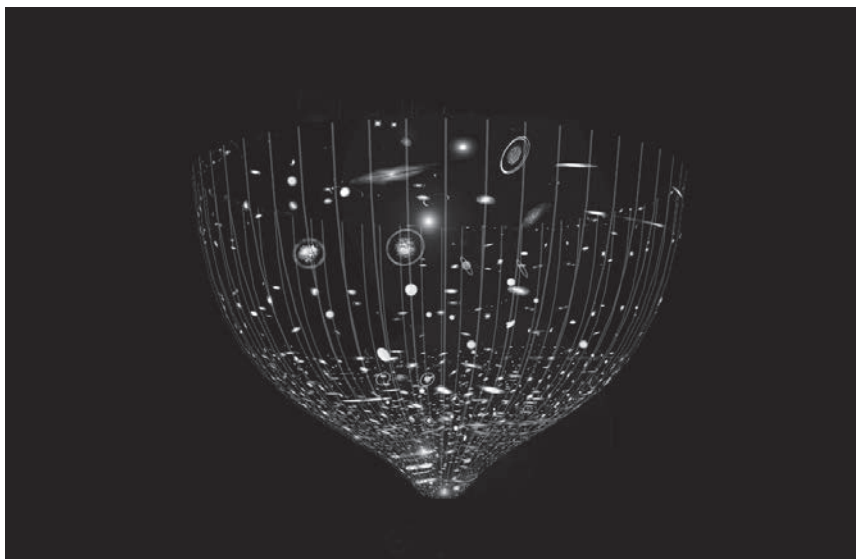
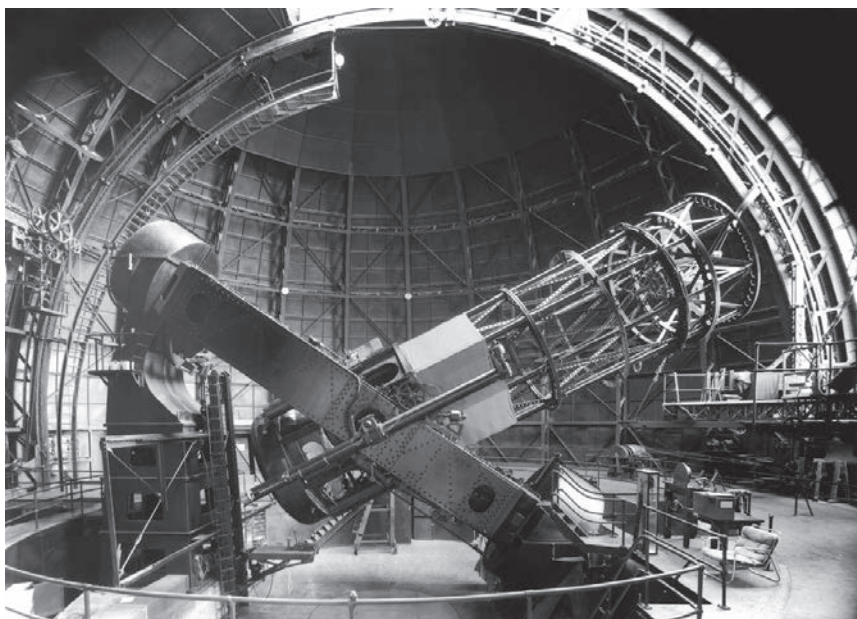


Fig. 1.14. Observaciones de las galaxias indican que el universo se va expandiendo: la distancia entre casi cualquier par de galaxias va aumentando.

vaba el espacio-tiempo en el sentido opuesto, de manera que los cuerpos se repelían. El efecto repulsivo de la constante cosmológica podría cancelar el efecto atractivo de la materia, y permitir así una solución estática para el universo. Ésta fue una de las grandes oportunidades perdidas de la física teórica. Si Einstein se hubiera atendido a sus ecuaciones originales, podría haber predicho que el universo se debe de estar expandiendo o contrayendo. Así las cosas, la posibilidad de un universo dependiente del tiempo no fue tomada seriamente en consideración hasta las observaciones de los años 1920 en el telescopio de 100 pulgadas del Monte Wilson.

Estas observaciones revelaron que cuanto más lejos se hallan las otras galaxias, con mayor velocidad se separan de nosotros. El universo se está expandiendo, y la distancia entre dos galaxias cualesquiera aumenta regularmente con el tiempo (Fig. 1.14). Este descubrimiento eliminó la necesidad de una constante cosmológica que proporcionara una solución estática para el universo. Años después, Einstein dijo que la constante cosmológica había sido el mayor error de su vida.



El telescopio Hooker de 100 pulgadas del observatorio del Monte Wilson.

Ahora, en cambio, parece que podría no haberse tratado de un error, después de todo: observaciones recientes, descritas en el capítulo 3, sugieren que podría haber, en efecto, una pequeña constante cosmológica.

La relatividad general cambió completamente los análisis sobre el origen y el destino del universo. Un universo estático habría podido existir desde siempre, o podría haber sido creado hace cierto tiempo en su estado presente. Sin embargo, si las galaxias se están separando, significa que en el pasado deberían haber estado más juntas. Hace unos quince mil millones de años, tendrían que haber estado las unas sobre las otras y la densidad debería haber sido muy elevada. Este estado fue denominado «átomo primordial» por el sacerdote católico Georges Lemaître, que fue el primero que investigó el origen del universo que actualmente denominamos *big bang* o gran explosión inicial.

Parece que Einstein nunca se tomó en serio la gran explosión. Aparentemente, pensaba que el modelo sencillo de un universo en expansión uniforme dejaría de ser válido si se re-

trotrajeran los movimientos de las galaxias, y que las pequeñas velocidades laterales de éstas habrían evitado que llegaran a chocar las unas con las otras. Pensaba que el universo debería haber tenido una fase previa de contracción y que habría rebotado hacia la presente expansión al llegar a una densidad relativamente moderada. Sin embargo, actualmente sabemos que para que las reacciones nucleares en el universo primitivo hubieran podido producir las cantidades de elementos ligeros que observamos a nuestro alrededor, la densidad debería haber sido al menos de unas diez toneladas por centímetro cúbico, y que la temperatura tendría que haber alcanzado los diez mil millones de grados. Además, observaciones del fondo de microondas indican que la densidad llegó probablemente a un billón de billones de billones de billones de billones de billones (un 1 seguido de 72 ceros) de toneladas por centímetro cúbico. También sabemos hoy en día que la teoría general de la relatividad de Einstein no permite que el universo rebote desde una fase de contracción a la expansión actual. Como veremos en el capítulo 2, Roger Penrose y yo conseguimos demostrar que la relatividad general predice que el universo comenzó con la gran explosión, de manera que la teoría de Einstein implica que el tiempo tuvo un comienzo, aunque a él nunca le gustó esta idea.

Einstein fue todavía más renuente a admitir que la relatividad general prediga que el tiempo se acabará en las estrellas muy pesadas cuando lleguen al fin de sus vidas y no produzcan ya suficiente calor para contrarrestar la fuerza de su propia gravedad, que intenta comprimirlas. Einstein pensaba que esas estrellas alcanzarían un estado final, pero hoy sabemos que ninguna configuración puede representar el estado final de las estrellas de masa superior a dos veces la masa del Sol. Tales estrellas continuarán encogiéndose hasta convertirse en agujeros negros, regiones del espacio-tiempo tan deformadas que la luz no puede escapar de ellas (Fig. 1.15).

Penrose y yo demostramos que la relatividad general predice que el tiempo dejará de transcurrir en el interior de los agujeros negros, tanto para la estrella como para el desafortunado astronauta que caiga en su interior. Pero tanto el co-

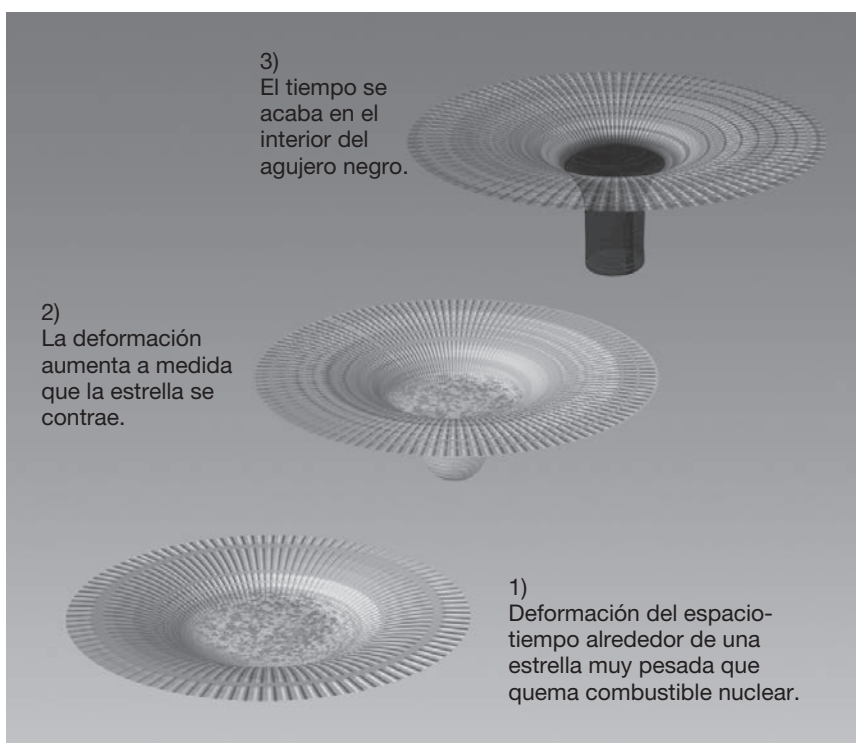


Fig. 1.15. Cuando una estrella muy pesada agota su combustible nuclear, pierde calor y se contrae. La deformación del espacio-tiempo se hace tan grande que se forma un agujero negro, del cual la luz no puede escapar. En el interior del agujero negro, el tiempo llega a su fin.

mienzo como el final del tiempo serían situaciones en que las ecuaciones de la relatividad general no estarían definidas. Así pues, la teoría no podría predecir a qué conduciría la gran explosión. Algunos vieron esto como una indicación de la libertad de Dios para empezar el universo en la forma que quisiera, pero otros (incluido yo) creen que el comienzo del universo debería ser gobernado por las mismas leyes que lo rigen en los otros instantes. Hemos hecho algunos progresos hacia este objetivo, tal como veremos en el capítulo 3, pero todavía no comprendemos por completo el origen del universo.

El motivo de que la relatividad general deje de ser válida en la gran explosión inicial es su incompatibilidad con la teoría cuántica, la otra gran revolución conceptual de comienzos del



Albert Einstein con un muñeco que le representa, poco después de llegar a Estados Unidos.



siglo xx. El primer paso hacia la teoría cuántica se dio en 1900 cuando Max Planck, en Berlín, descubrió que la radiación de un cuerpo al rojo era explicable si la luz sólo podía ser emitida y absorbida en paquetes discretos, llamados cuantos. En uno de sus revolucionarios artículos, escrito en 1905 cuando trabajaba en la oficina de patentes, Einstein demostró que la hipótesis cuántica de Planck podría explicar lo que se conoce como «efecto fotoeléctrico», la manera en que algunos metales desprenden electrones al ser iluminados. Este efecto constituye la base de los modernos detectores de luz y cámaras de televisión, y por este trabajo Einstein recibió el premio Nobel de física.

Einstein siguió trabajando en la idea cuántica durante 1920, pero quedó profundamente turbado por el trabajo de Werner Heisenberg en Copenhague, Paul Dirac en Cambridge y Erwin Schrödinger en Zúrich, que desarrollaron una nueva imagen de la realidad llamada «mecánica cuántica». Las partículas pequeñas ya no tenían una posición y una velocidad bien definidas, sino que cuanto mayor fuera la precisión con que se determinara su posición, menor sería la precisión con que po-

dríamos determinar su velocidad, y viceversa. Einstein quedó escandalizado por este elemento aleatorio e impredecible en las leyes básicas, y nunca llegó a aceptar por completo la mecánica cuántica. Sus sentimientos se resumen en su famosa frase: «Dios no juega a los dados». La mayoría de los restantes científicos, sin embargo, aceptaron la validez de las nuevas leyes cuánticas porque explicaban un amplio dominio de fenómenos que no quedaban descritos previamente, y por su acuerdo excelente con las observaciones. Esas leyes constituyen la base de los modernos desarrollos en química, biología molecular y electrónica, y el fundamento de la tecnología que ha transformado el mundo en el último medio siglo.

En diciembre de 1932, consciente de que Hitler y los nazis llegarían al poder, Einstein abandonó Alemania y cuatro meses después renunció a su ciudadanía. Pasó los últimos veinte años de su vida en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, en Nueva Jersey.

En Alemania, los nazis orquestaron una campaña contra la «ciencia judía» y los muchos científicos alemanes de origen judío; ésta es, en parte, la razón por la cual Alemania no consiguió construir la bomba atómica. Einstein y la relatividad fueron los principales blancos de dicha campaña. Cuando le informaron de la publicación de un libro titulado *100 autores contra Einstein*, replicó: «¿Por qué cien? Si estuviera equivocado, bastaría con uno solo». Tras la segunda guerra mundial, urgió a los aliados a establecer un gobierno mundial que controlara la bomba atómica. En 1948, le fue ofrecida la presidencia del nuevo estado de Israel, pero la declinó. En cierta ocasión dijo: «La política es para el momento, pero una ecuación es para la eternidad». Las ecuaciones de Einstein de la relatividad general constituyen su mejor recuerdo y epitafio, y deberían durar tanto como el universo.

El mundo ha cambiado mucho más en los últimos cien años que en cualquier siglo precedente. La razón de ello no han sido las nuevas doctrinas políticas o económicas, sino los grandes desarrollos auspiciados por los progresos en las ciencias básicas. ¿Quién podría simbolizar mejor que Einstein tales progresos?