## El universo en una cáscara de nuez

**Stephen Hawking**

PREFACIO

NO HABÍA ESPERADO QUE MI LIBRO DE DIVULGACIÓN, *Historia del tiempo,* tuviera tanto éxito. Se mantuvo durante cuatro años en la lista de superventas del *London Sunday Times,* un perío­do más largo que cualquier otro libro, lo cual resulta especialmente notable para una obra científica que no era fácil. Desde entonces, la gente me estuvo preguntando cuándo escribiría una continuación. Me resistía a ello porque no quería escribir un *Hijo de la historia del tiempo,* o una *Historia del tiempo ampliada,* y porque estaba ocupado con la investi­gación. Pero fui advirtiendo que quedaba espacio para un tipo diferen­te de libro que podría resultar más fácilmente comprensible. La *Historia del tiempo* estaba organizada de manera lineal, de forma que la mayoría de los capítulos continuaba y dependía lógicamente de los anteriores. Esto resultaba atractivo para algunos lectores, pero otros quedaron en­callados en los primeros capítulos y nunca llegaron al material poste­rior, mucho más excitante. En cambio, el presente libro se parece a un árbol: los capítulos 1 y 2 forman un tronco central del cual se ramifican los demás capítulos.

La ramas son bastante independientes entre sí y pueden ser abor­dadas en cualquier orden tras haber leído el tronco central. Corres­ponden a áreas en que he trabajado o reflexionado desde la publica­ción de la *Historia del tiempo.* Por ello, presentan una imagen de algunos de los campos más activos de la investigación actual. También he in­tentado evitar una estructura demasiado lineal en el contenido de cada capítulo. Las ilustraciones y los textos al pie de ellas proporcionan una ruta alternativa al texto, tal como en la *Historia del tiempo ilustrada,* publi­cada en 1996,. y los recuadros al margen proporcionan la oportunidad de profundizar en algunos temas con mayor detalle del que habría sido posible en el texto principal.

En 1988, cuando fue publicada por primera vez la *Historia del tiempo,* la Teoría definitiva de Todo parecía estar en el horizonte. ¿Cómo ha cambiado la situación? ¿Nos hallamos más cerca de nuestro objetivo? Como veremos en este libro, hemos avanzado mucho desde entonces, pero aún queda mucho camino por recorrer y aún no pode­mos avistar su fin. Según un viejo refrán, es mejor viajar con esperanza que llegar. El afán por descubrir alimenta la creatividad en todos los campos, no sólo en la ciencia. Si llegáramos a la meta, el espíritu hu­mano se marchitaría y moriría. Pero no creo que nunca nos lleguemos a detener: creceremos en complejidad, si no en profundidad, y siempre nos hallaremos en el centro de un horizonte de posibilidades en ex­pansión.

Quiero compartir mi excitación por los descubrimientos que se están realizando y por la imagen de la realidad que va emergiendo de ellos. Me he concentrado en áreas en que yo mismo he trabajado, para poder transmitir una mayor sensación de inmediatez. Los detalles del trabajo han sido muy técnicos, pero creo que las ideas generales pue­den ser comunicadas sin excesivo bagaje matemático. Espero haberlo conseguido.

He contado con muchas ayudas al escribir este libro. Debo men­cionar, en particular, a Thomas Hertog y Neel Shearer, por su auxilio en las figuras, pies de figura y recuadros, a Ann Harris y Kitty Fergu-son, que editaron el manuscrito (o, con más precisión, los archivos de ordenador, ya que todo lo que escribo es electrónico), y a Philip Dunn del Book Laboratory and Moonrunner Design, que elaboró las ilustra­ciones. Pero, sobre todo, quiero manifestar mi agradecimiento a todos los que me han hecho posible llevar una vida bastante normal y reali­zar una investigación científica. Sin ellos, este libro no habría podido ser escrito.

Stephen Hawking *Cambridge, 2 de mayo de* 200*1*

CAPÍTULO 2

LA FORMA DEL TIEMPO

*La relatividad general de Einstein da forma al tiempo. Cómo reconciliar esto con la teoría cuántica*

¿QUÉ ES EL TIEMPO? ¿ES UNA CORRIENTE QUE FLUYE SIN PARAR Y se lleva nuestros sueños, como dice una vieja canción? ¿ O es como una vía de ferrocarril? Quizás tenga bucles y ramificacio­nes, y se pueda seguir avanzando y, aún así, regresar a alguna estación anterior de la línea.

Un autor del siglo XIX, Charles Lamb, escribió: «Nada me pro­duce tanta perplejidad como el tiempo y el espacio. Y sin embargo, nada me preocupa *menos* que el tiempo y el espacio, ya que nunca pien­so en ellos». La mayoría de nosotros no acostumbramos a preocu­parnos por el tiempo y el espacio, sean lo que sean,- pero todos nos preguntamos en alguna ocasión qué es el tiempo, cómo comenzó y adonde nos lleva.

Cualquier teoría científica seria, sobre el tiempo o cualquier otro concepto, debería en mi opinión estar basada en la forma más operati­va de filosofía de la ciencia: la perspectiva positivista propuesta por Karl Popper y otros. Según esta forma de pensar, una teoría científica es un modelo matemático que describe y codifica las observaciones que realizamos. Una buena teoría describirá un amplio dominio de fe­nómenos a partir de unos pocos postulados sencillos, y efectuará pre­dicciones definidas que podrán ser sometidas a prueba. Si las predic­ciones concuerdan con las observaciones, la teoría sobrevive a la prueba, aunque nunca se pueda demostrar que sea correcta. En cambio, si las observaciones difieren de las predicciones, debemos descartar o modificar la teoría. (Como mínimo, esto es lo que se supone que ocu­rre. En la práctica, la gente cuestiona a menudo la precisión de las ob­servaciones y la fiabilidad y el talante moral de los que las han realiza­do). Si adoptamos la perspectiva positivista, como yo hago, no podemos decir qué es realmente el tiempo. Todo lo que podemos ha­cer es describir lo que hemos visto que constituye un excelente mode­lo matemático del tiempo y decir a qué predicciones conduce.

Isaac Newton nos proporcionó el primer modelo matemático para el tiempo y el espacio en sus *Principia Mathematica,* publicados en 1687. Newton ocupó la cátedra Lucasiana de Cambridge que yo ocu­po en la actualidad, aunque en aquella época no funcionaba eléctrica­mente. En el modelo de Newton, el tiempo y el espacio constituían un fondo sobre el cual se producían los sucesos, pero que no era afec­tado por ellos. El tiempo estaba separado del espacio y era conside­rado como una línea recta, o una vía de tren, infinita en ambas di­recciones. El propio tiempo era considerado eterno, en el sentido de que siempre había existido y seguiría existiendo siempre. En cambio, mucha gente creía que el universo físico había sido crea­do más o menos en el estado presente hace tan sólo unos pocos mi­les de años. Ello desconcertaba a algunos filósofos, como el pensador alemán Immanuel Kant. Si en efecto el universo había sido creado, ¿por qué se había tenido que esperar infinitamente hasta la creación? Por otro lado, si el universo había existido siempre, ¿por qué no ha­bía ocurrido ya todo lo que tenía que ocurrir, es decir, por qué la historia no había terminado ya? En particular, ¿por qué el universo no había alcanzado el equilibrio térmico, con todas sus partes a la misma temperatura?

Kant denominó este problema «antinomia de la razón pura», por­que parecía constituir una contradicción lógica, no tenía solución. Pero resultaba una contradicción sólo dentro del contexto del modelo mate­mático newtoniano, en que el tiempo era una línea infinita, independien­te de lo que estuviera ocurriendo en el universo. Sin embargo, como vimos en el Capítulo 1, en 1915 Einstein propuso un modelo matemá­tico completamente nuevo: la teoría general de la relatividad. En los años transcurridos desde su artículo, hemos añadido algunos refina­mientos ornamentales, pero nuestro modelo de tiempo y de espacio si­gue estando basado en las propuestas de Einstein. Este capítulo y/los siguientes describirán cómo han evolucionado nuestras ideas desde el artículo revolucionario de Einstein. Se trata de la historia del éxito del trabajo de un gran número de personas, y me siento orgulloso de haber podido aportar una pequeña contribución a ella.

La relatividad general combina la dimensión temporal con las tres dimensiones espaciales para formar lo que se llama espacio-tiempo. La teoría incorpora los efectos de la gra­vedad, afirmando que la distribución de materia y energía en el univer­so deforma y distorsiona el espacio-tiempo, de manera que ya no es plano. Los objetos intentan moverse en trayectorias rectilíneas en el espacio-tiempo, pero como éste está deformado, sus trayectorias pare­cen curvadas: se mueven como si estuvieran afectados por un campo gravitatorio.

Una tosca analogía de la situación, que no debemos tomar dema­siado al pie de la letra, consiste en imaginar una lámina de goma. Pode­mos depositar sobre ella una bola grande que represente el Sol. El peso de la bola hundirá ligeramente la lámina y hará que esté curvada en las proximidades del Sol. Si ahora hacemos rodar pequeñas bolitas sobre la lámina, no la recorrerán en línea recta, sino que girarán alrededor del objeto pesado, como los planetas orbitan alrededor del Sol.

La analogía es incompleta porque en ella tan sólo está curvada una sección bidimensional del espacio (la superficie de la lámina de goma), pero el tiempo queda sin perturbar, como en la teoría newtoniana. Pero en la teoría de la relatividad, que concuerda con un gran número de experimentos, el tiempo y el espacio están inextricable­mente entrelazados. No podemos curvar el espacio sin involucrar asi­mismo al tiempo. Por lo tanto, el tiempo adquiere una forma. Al cur­var el tiempo y el espacio, la relatividad general los convierte en participantes dinámicos de lo que ocurre en el universo, en lugar de considerarlos como un mero escenario pasivo en que se suceden los acontecimientos. En la teoría newtoniana, en que el tiempo existía in­dependientemente de todo lo demás, se podía preguntar: ¿qué hacía Dios antes de crear el universo? Como dijo San Agustín, no debería­mos bromear con estas cuestiones, como el hombre que dijo «estaba preparando el infierno para los que pusieran preguntas demasiado complicadas». Es una pregunta seria que la gente se ha planteado a lo largo de todas las épocas. Según San Agustín, antes de que Dios hi­ciera el cielo y la Tierra no hacía nada en absoluto. De hecho, esta vi­sión resulta muy próxima a las ideas actuales.

En la relatividad general, el tiempo y el espacio no existen inde­pendientemente del universo o separadamente el uno del otro. Están definidos por medidas efectuadas dentro del universo, como el núme­ro de vibraciones de un cristal de cuarzo de un reloj o la longitud de una cinta métrica. Es fácilmente concebible que un tiempo definido de este modo, en el interior del universo, debe haber tenido un valor mí­nimo o un valor máximo —en otras palabras, un comienzo o un final—. No tendría sentido preguntar qué ocurrió antes del comienzo o des­pués del fin, porque tales tiempos no estarían definidos.

Claramente, resultaba importante decidir si el modelo matemáti­co de la relatividad general *predecía* que el universo, y el propio tiem­po, hubieran debido tener un comienzo o un final. El prejuicio gene­ral entre los físicos teóricos, incluido el mismo Einstein, era que el tiempo debería ser infinito en ambas direcciones. Si no, se planteaban cuestiones embarazosas sobre la creación del universo, que parecían hallarse más allá del dominio de la ciencia. Se conocían soluciones de las ecuaciones de Einstein en que el tiempo tenía un comienzo o un final, pero todas ellas eran muy especiales, con un grado muy elevado de simetría. Se creía que en los objetos reales que se colapsaran bajo la acción de su propia gravedad, la presión o los efectos de las velo­cidades laterales impedirían que toda la materia cayera al mismo pun­to y la densidad se hiciera infinita. Análogamente, si se retrotrajera la expansión del universo, se encontraría que no toda la materia del uni­verso emergería de un punto de densidad infinita. Tal punto de den­sidad infinita se denomina una singularidad y constituiría un comien­zo o un final del tiempo.

En 1963, dos científicos rusos, Evgenii Lifshitz y Isaac Khalatnikov, afirmaron haber demostrado que todas las soluciones de las ecua­ciones de Einstein que poseen una singularidad deberían tener una distribución muy especial de materia y de velocidades. La probabili­dad de que la solución que representa el universo tuviera esta dispo­sición especial era prácticamente nula. Casi ninguna de las soluciones que podrían representar el universo poseería una singularidad con una densidad infinita. Antes de la etapa de expansión del universo, debería haber habido una fase de contracción durante la cual toda la materia se fue acumulando pero sin llegar a chocar consigo misma, separán­dose de nuevo en la fase actual de expansión. Si éste fuera el caso, el tiempo seguiría para siempre, desde un pasado infinito a un futuro in­finito.

No todos quedaron convencidos por los argumentos de Lifshitz y Khalatnikov. Roger Penrose y yo adoptamos una perspectiva diferente, basada no en el estudio de soluciones detalladas, sino en la estructura global del espacio-tiempo. En la relatividad general, el espacio-tiempo es curvado no sólo por los objetos con masa, sino también por el con­tenido en energía. Esta siempre es positiva, por lo cual confiere al es­pacio-tiempo una curvatura que desvía los rayos de luz los unos hacia los otros.

Consideremos ahora el cono de luz correspondiente a nuestro pasado, es decir, las trayectorias, en el espacio-tiempo, de los rayos de luz de galaxias distantes que nos están llegando en el presen­te. En un diagrama en que el tiempo corresponda al eje vertical y el espació a los ejes perpendiculares a éste, tales trayectorias se hallan en el interior de un cono cuyo vértice, o punta, se halla en nosotros. A me­dida que vamos hacia el pasado, bajando desde el vértice del cono, ve­mos galaxias de tiempos cada vez más anteriores. Como el universo se ha estado expandiendo y todo estaba mucho más próximo entre sí, a medida que miramos un futuro más distante contemplamos regiones de densidad de materia cada vez mayor. Observamos un tenue fondo de radiación de microondas que se propaga hacia nosotros por el cono de luz del pasado y que procede de un tiempo muy anterior, cuando el universo era mucho más denso y caliente que en la actualidad. Sintonizando receptores a las diferentes frecuencias de las microondas, pode­mos medir su espectro (la distribución de la potencia en función de la frecuencia) de esta radiación. Hallamos un espectro que es caracterís­tico de la radiación de un cuerpo con una temperatura de 2,7 grados sobre el cero absoluto. Esta radiación de microondas no resulta muy adecuada para descongelar una pizza, pero el hecho de que su espec­tro concuerde tan exactamente con el de la radiación de un cuerpo a 2,7 grados nos indica que la radiación debe proceder de regiones opa­cas a las microondas.

Así pues, podemos concluir que el cono de luz de nuestro pasado debe atravesar una cierta cantidad de materia al ir retrocediendo en el tiempo. Esta cantidad de materia es suficiente para curvar el espacio-tiempo de manera que los rayos de luz de dicho cono del pasado estén curvados los unos hacia los otros.

A medida que retrocedemos en el tiempo, las secciones transver­sales del cono de luz de nuestro pasado alcanzan un tamaño máximo y empiezan a disminuir de nuevo. Nuestro pasado tiene forma de pera.

Cuando retrocedemos todavía más hacia el pasado, la densidad de energía positiva de la materia hace que los rayos de luz se curven los unos hacia los otros más fuertemente. La sección transversal del cono de luz se reducirá a tamaño cero en un tiempo finito. Ello significa que toda la materia del interior de nuestro cono de luz del pasado está atra­pada en una región cuya frontera tiende a cero. Por lo tanto, no resul­ta demasiado sorprendente que Penrose y yo lográramos demostrar que en el modelo matemático de la relatividad general, el tiempo debe haber tenido un comienzo en lo que denominamos gran explosión ini­cial o *big bang).* Argumentos análogos demuestran que el tiempo ten­dría un final, cuando las estrellas o las galaxias se colapsaran bajo la ac­ción de su propia gravedad y formaran un agujero negro. Habíamos esquivado la antinomia de la razón pura de Kant eliminando su hipó­tesis implícita de que el tiempo tenía sentido independientemente del universo. El artículo en que demostrábamos que el tiempo tuvo un co­mienzo ganó el segundo premio de un concurso patrocinado por la Gravity Research Foundation en 1968, y Roger y yo compartimos la principesca suma de 300 dólares. No creo que los otros ensayos pre­miados aquel año hayan tenido un interés demasiado duradero.

Nuestro trabajo suscitó reacciones diversas: molestó a muchos fí­sicos pero entusiasmó a los dirigentes religiosos que creían en un acto de creación, para el cual veían aquí una demostración científica. Entre tanto, Lifshitz y Khalatnikov habían quedado en una posición bastan­te embarazosa. No podían hallar argumentos contra los teoremas ma­temáticos que habíamos demostrado, pero en el sistema soviético no podían admitir que se habían equivocado y que la ciencia occidental tenía razón. Sin embargo, salvaron la situación al hallar una familia más general de soluciones con singularidad, que no eran especiales en el sentido en que lo eran sus soluciones anteriores. Ello les permitió afir­mar que las singularidades, y el comienzo o el final del tiempo, eran un descubrimiento soviético.

Muchos físicos seguían rechazando instintivamente la idea de que el tiempo tuviera un comienzo o un final. Por ello, subrayaron que no se podía esperar que el modelo matemático constituyera una buena descripción del espacio-tiempo cerca de una singularidad. La razón es que la relatividad general, que describe la fuerza gravitatoria, es una teo­ría clásica, como hemos dicho en el Capítulo 1, que no incorpora la incertidumbre de la teoría cuántica que rige todas las otras fuerzas que conocemos. Esta inconsistencia no tiene importancia en la mayor par­te del universo ni durante la mayor parte del tiempo, porque la escala correspondiente a la curvatura del espacio-tiempo es muy grande y la escala en que los efectos cuánticos empiezan a resultar relevantes es muy pequeña. Pero cerca de una singularidad ambas escalas serían comparables y los efectos gravitatorios cuánticos serían importantes. Por ello, lo que los teoremas de singularidad de Penrose y mío estable­cían realmente era que nuestra región clásica de espacio-tiempo está limitada en el pasado, y probablemente en el futuro, por regiones en que la gravedad cuántica es relevante. Para comprender el origen y el des­tino del universo, necesitamos una teoría cuántica de la gravitación, que será el tema de la mayor parte de este libro.

Las teorías cuánticas de sistemas como los átomos, con un núme­ro finito de partículas, fueron formuladas en los años 1920 por Heisenberg, Schrödinger y Dirac. (Dirac fue otro de mis antecesores en la cá­tedra de Cambridge, cuando todavía no estaba motorizada). Sin embargo, se topaba con dificultades cuando se intentaba extender las ideas cuánticas a los campos de Maxwell, que describen la electricidad, el magnetismo y la luz.

Podemos imaginar los campos de Maxwell como constituidos por ondas de diferentes longitudes de onda (la distancia entre dos crestas consecutivas de la onda). En una onda, los campos oscilan de un valor a otro como un péndulo.

Según la teoría cuántica, el estado fundamental o estado de ener­gía más baja de un péndulo no es aquél en que está en reposo hacia abajo. Este estado tendría simultáneamente una posición y una veloci­dad bien definidas, ambas de valor nulo. Ello constituiría una violación del principio de incertidumbre, que prohibe la medición precisa simul­tánea de la posición y la velocidad. La incertidumbre en la posición, multiplicada por la incertidumbre en el ímpetu (velocidad por masa) debe ser mayor que una cierta cantidad, conocida como constante de Planck —un número cuya escritura resulta demasiado larga, por lo cual utilizaremos para él un símbolo. ‘th’

Así pues, el estado fundamental o estado de energía más baja de un péndulo no tiene energía nula, como se podría haber esperado, sino que incluso en su estado fundamental un péndulo o cualquier sistema oscilante debe tener una cierta cantidad mínima de lo que se denomi­na fluctuaciones del punto cero. Estas implican que el péndulo no apuntará necesariamente hacia abajo sino que habrá una cierta proba­bilidad de hallarlo formando un pequeño ángulo con la vertical. Análogamente, incluso en el vacío o estado de energía más baja, las ondas de los campos de Maxwell no serán exactamente nulas, sino que tendrán un tamaño pequeño. Cuanto mayor sea la frecuencia (nú­mero de oscilaciones por minuto) del péndulo o de la onda, mayor será la energía de su estado fundamental.

Cálculos de las fluctuaciones del estado fundamental de los campos de Maxwell y de los electrones pusieron de manifiesto que la masa Y la carga aparentes del electrón serían infinitas, en contra de lo que in­dican las observaciones. Sin embargo, en los años 1940, los físicos Ri­chard Feynman, Julián Schwinger y Shin'ichiro Tomonaga desarrollaron un método consistente de eliminación o «sustracción» de estos infinitos para quedarse sólo con los valores finitos observados de la masa y la carga. Aún así, las fluctuaciones en el estado fundamental se­guían causando pequeños efectos que podían ser medidos y concorda­ban con las predicciones. Unos esquemas de sustracción parecidos conseguían eliminar los infinitos en el caso de los campos de Yang-Mills, en la teoría propuesta por Chen Ning Yang y Robert Mills. Di­cha teoría es una extensión de la teoría de Maxwell para describir las interacciones de otras dos fuerzas llamadas fuerza nuclear fuerte y nu­clear débil. Sin embargo, las fluctuaciones del estado fundamental tienen efectos mucho más serios en una teoría cuántica de la gravedad. De nuevo, cada longitud de onda tendría una cierta energía en el esta­do fundamental. Como no hay límite inferior al valor de las longitudes de onda de los campos de Maxwell, en cualquier región del espacio-tiempo habrá un número infinito de longitudes de onda y la energía del estado fundamental será infinita. Puesto que la densidad de energía es, tal como la materia, una fuente de gravitación, esta densidad infinita de energía implicaría que en el universo hay suficiente atracción gravitacional para curvar el espacio-tiempo en un solo punto, lo que eviden­temente no ha sucedido.

Podríamos esperar resolver el problema de esta contradicción aparente entre la observación y la teoría diciendo que las fluctuacio­nes del estado fundamental no tienen efectos gravitatorios, pero ello no funciona. Podemos detectar la energía de las fluctuaciones del es­tado fundamental en el efecto Casimir. Si tenemos un par de placas metálicas paralelas y muy próximas entre sí, su efecto es reducir lige­ramente el número de longitudes de onda que pueden caber entre las placas con respecto al número de longitudes de onda en el exte­rior. Ello significa que la densidad de energía de las fluctuaciones del estado fundamental entre las placas, aunque sigue siendo infinita, es inferior a la densidad de energía en el exterior de las mismas, en una pequeña cantidad. Esta diferencia de densidad de energía da lugar a una fuerza atractiva entre las placas, que ha sido observada experimentalmente. Como en la relatividad general las fuerzas consti­tuyen una fuente de gravitación, tal como lo es la materia, sería in­consistente ignorar los efectos gravitatorios de esta diferencia de energías.

Otra posible solución del problema consistiría en suponer que hay una constante cosmológica, como la introducida por Einstein en su intento de obtener un modelo estático del universo. Si esta constante tuviera un valor infinito negativo, podría cancelar exactamen­te el valor infinito positivo de la energía del estado fundamental en el espacio libre, pero esta constante cosmológica parece muy *ad hoc y* tendría que ser ajustada con un grado extraordinario de precisión.

Afortunadamente, en los años 1970 se descubrió un tipo total­mente nuevo de simetría que proporciona un mecanismo físico na­tural para cancelar los infinitos que surgen de las fluctuaciones del es­tado fundamental. La supersimetría constituye una característica de los modelos matemáticos modernos, que puede ser descrita de dife­rentes maneras. Una de ellas consiste en decir que el espacio-tiempo tiene otras dimensiones adicionales además de las que percibimos. Se llaman dimensiones de Grassmann, porque son expresadas en nú­meros llamados variables de Grassmann en vez de en números or­dinarios. Los números ordinarios conmutan, es decir, tanto da el orden en que los multipliquemos: 6 por 4 es lo mismo que 4 por 6, pero las variables de Grassmann anticonmutan: x por y es lo mismo que -y por x.

La supersimetría fue utilizada por primera vez para eliminar los infinitos de los campos de materia y de Yang-Mills en un espacio-tiempo en que tanto las dimensiones ordinarias como las de Grassmann eran planas, en vez de curvadas. Pero resultaba natural extenderla a si­tuaciones en que ambos tipos de dimensiones fueran curvadas. Ello condujo a diversas teorías denominadas supergravedad, con diferentes grados de supersimetría. Una consecuencia de la supersimetría es que cada campo o partícula debería tener un «supersocio» con un espín su­perior o inferior en 1/2 a su propio espín.

Las energías del estado fundamental de los bosones, campos cuyo espín es un número entero (O, 1, 2, etc) son positivas. En cambio, las energías del estado fundamental de los fermiones, campos cuyo espín es un número semientero (1/2, 3/2, etc), son negativas. Como en las teorías de supergravedad hay el mismo número de bosones que de fermiones, los infinitos de orden superior se cancelan.

Quedaba la posibilidad de que pudieran subsistir sin cancelarse algunos infinitos de órdenes inferiores. Nadie tuvo la paciencia nece­saria para calcular si estas teorías eran en verdad completamente fini­tas. Se bromeaba que un buen estudiante tardaría unos doscientos años en comprobarlo y, ¿cómo podríamos estar seguros de que no había co­metido ningún error en la segunda página de los cálculos? Aun así, ha­cia 1985 la mayoría de los especialistas creían que casi todas las teorías de supergravedad estarían libres de infinitos.

Entonces, de repente, la moda cambió. La gente empezó a decir que no había motivos para esperar que las teorías de supergravedad no contuvieran infinitos, lo cual significaba que podrían resultar fatal­mente erróneas como teorías. En su lugar, se proclamó que la única manera de combinar la gravedad con la teoría cuántica era una teoría llamada teoría supersimétrica de cuerdas. Las cuerdas, como sus ho­mologas en la vida cotidiana, son objetos unidimensionales exten­sos: sólo tienen longitud. Las cuerdas de esta teoría se mueven en el espacio-tiempo de fondo, y sus vibraciones son interpretadas como partículas.

Si la cuerdas tienen dimensiones de Grassmann y dimensiones or­dinarias, las vibraciones corresponderán a bosones y fermiones. En este caso, las energías positivas y negativas del estado fundamental se can­celarían exactamente, de manera que no habría infinitos de ningún or­den. Se dijo que las supercuerdas eran la Teoría de Todo.

Los futuros historiadores de la ciencia encontrarán interesante explorar el cambio de marea de opinión entre los físicos teóricos. Du­rante algunos años, las cuerdas reinaron sin rival y la supergravedad fue menospreciada como una simple teoría aproximada, válida tan sólo a bajas energías. El calificativo de «bajas energías» era conside­rado particularmente ominoso, aunque en este contexto bajas energías significaba que las partículas tendrían energías de al menos un mi­llón de billones la de las partículas en una explosión de TNT. Si la supergravedad era tan sólo una aproximación de baja energía, no po­día pretender ser la teoría fundamental del universo. En su lugar, se suponía que la teoría subyacente era una de las cinco posibles teorías de supercuerdas. Pero ¿cuál de estas cinco teorías describía nuestro universo? Y, ¿cómo podría formularse la teoría de cuerdas más allá de la aproximación *en* que éstas son representadas como superficies con una dimensión espacial y otra temporal, desplazándose *en* un es­pacio-tiempo plano? ¿No curvarían dichas cuerdas el espacio-tiempo de fondo?

En los años siguientes a 1985, fue haciéndose cada vez más evi­dente que la teoría de cuerdas no era la descripción completa. Para empezar, se advirtió que las cuerdas son tan sólo un miembro de una amplia clase de objetos que pueden extenderse en más de una dimen­sión. Paul Townsend, que, como yo, es miembro del Departamento de Matemáticas Aplicadas y Física Teórica de Cambridge, y a quien de­bemos muchos de los trabajos fundamentales sobre estos objetos, les dio el nombre de «p-branas». Una p-brana tiene longitud en p di­mensiones. Así pues, una p= 1 brana es una cuerda, una p = 2 brana es una superficie o membrana, y así sucesivamente. No pare­ce haber motivo alguno para favorecer el caso de las cuerdas, con p = 1, sobre los otros posibles valores de p, sino que deberíamos adoptar el principio de la democracia de las p-branas: todas las p-branas son iguales.

Todas las p-branas podían ser obtenidas como soluciones de las ecuaciones de las teorías de supergravedad en 10 o 11 dimensiones. Aunque 10 o 11 dimensiones no parecen tener nada que ver con el espacio-tiempo de nuestra experiencia, la idea era que las otras 6 o 7 di­mensiones están enrolladas con un radio de curvatura tan pequeño que no las observamos, sólo somos conscientes de las cuatro dimensiones restantes, grandes y casi planas.

Debo decir que, personalmente, me he resistido a creer en dimen­siones adicionales. Pero como soy un positivista, la pregunta «¿existen realmente dimensiones adicionales?» no tiene ningún significado para mí. Todo lo que podemos preguntar es si los modelos matemáticos con dimensiones adicionales proporcionan una buena descripción del universo. Todavía no contamos con ninguna observación que requie­ra dimensiones adicionales para ser explicada. Sin embargo, hay la posibilidad de que podamos observarlas en el Gran Colisionador de Hadrones LHC (Large Hadron Collider), de Ginebra. Pero lo que ha convencido a mucha gente, incluido yo, de que deberíamos tomarnos seriamente los modelos con dimensiones adicionales es la existencia de una red de relaciones inesperadas, llamadas dualidades, entre dichos modelos. Estas dualidades demuestran que todos los modelos son esencialmente equivalentes,- es decir, son tan sólo aspectos diferentes de una misma teoría subyacente que ha sido llamada teoría M. No con­siderar esta red de dualidades como una señal de que estamos en buen camino sería como creer que Dios puso los fósiles en las rocas para en­gañar a Darwin sobre la evolución de la vida.

Estas dualidades demuestran que las cinco teorías de supercuerdas describen la misma física, y que también son físicamente equivalentes a la supergravedad. No podemos decir que las supercuerdas sean más fundamentales que la supergravedad, o viceversa, sino que son expresiones diferentes de la misma teoría de fondo, cada una de las cuales resulta útil para cálculos en diferentes tipos de situaciones. Como las teorías de cuerdas no tienen infinitos resultan adecuadas para calcular lo que ocurre cuando unas pocas partículas de altas ener­gías colisionan entre sí y se esparcen. Sin embargo, no resultan muy útiles para describir cómo la energía de un gran número de partículas curva el universo o forma un estado ligado, como un agujero negro. Para estas situaciones es necesaria la supergravedad, que es básica­mente la teoría de Einstein de los espacio-tiempos curvados con algunos tipos adicionales de materia. Ésta es la imagen que utilizaré principal­mente en lo que sigue.

Para describir cómo la teoría cuántica configura el tiempo y el es­pacio, resulta útil introducir la idea de un tiempo imaginario. Tiempo imaginario suena a ciencia ficción, pero es un concepto matemática­mente bien definido: el tiempo expresado en lo que llamamos números imaginarios. Podemos considerar los números reales, por ejemplo 1, 2, -3,5 y otros, como la expresión de posiciones en una recta que se ex­tiende de izquierda a derecha: el cero en el centro, los números reales positivos a la derecha y los números reales negativos a la izquierda.

Los números imaginarios pueden representarse entonces como si correspondieran a las posiciones en una línea vertical: el cero seguiría estando en el centro, los números imaginarios positivos estarían en la parte superior y los imaginarios negativos en la inferior. Así pues, los números imaginarios pueden ser considerados como un nuevo tipo de números perpendiculares en cierto modo a los números reales ordi­narios. Como son una construcción matemática no necesitan una rea­lización física: no podemos tener un número imaginario de naranjas ni una tarjeta de crédito con un saldo imaginario.

Podríamos pensar que ello significa que los números imaginarios son tan sólo un juego matemático que nada tiene que ver con el mun­do real. Desde la perspectiva positivista, sin embargo, no podemos de­terminar qué es real. Todo lo que podemos hacer es hallar qué mode­los matemáticos describen el universo en que vivimos. Resulta que un modelo matemático en que intervenga un tiempo imaginario predice no sólo efectos que ya hemos observado, sino también otros efectos que aún no hemos podido observar pero en los cuales creemos por al­gunos otros motivos. Por lo tanto, ¿qué es real y qué es imaginario? ¿Está la diferencia tan sólo en nuestras mentes?

La teoría clásica (es decir, no cuántica) de la relatividad general de Einstein combinaba el tiempo real y las tres dimensiones del espa­cio en un espacio-tiempo cuadridimensional. Pero la dirección del tiempo real se distinguía de las tres direcciones espaciales,- la línea de universo o historia de un observador siempre transcurría en la direc­ción creciente del tiempo real (es decir, el tiempo siempre transcurría del pasado al futuro), pero podía aumentar o *disminuir* en cualquiera de las tres direcciones espaciales. En otras palabras, se podía invertir la di­rección en el espacio, pero no en el tiempo.

En cambio, como el tiempo imaginario es perpendicular al tiem­po real, se comporta como una cuarta dimensión espacial. Por lo tanto, puede exhibir un dominio de posibilidades mucho más rico que la vía de tren del tiempo real ordinario, que sólo puede tener un comienzo o un fin o ir en círculos. Es en este sentido imaginario que el tiempo tie­ne una forma.

Para contemplar algunas de las posibilidades, consideremos un espacio-tiempo con tiempo imaginario que tenga forma de esfera, como la superficie de la Tierra. Supongamos que el tiempo imaginario corresponda a los grados de latitud. Entonces, la historia del universo en tiempo imaginario empezaría en el polo Sur. No tendría sentido preguntar: «¿qué ocurrió antes del co­mienzo?». Tales tiempos simplemente no están definidos, como no lo están los puntos más al sur del polo Sur. El polo Sur es un punto per­fectamente regular de la superficie de la Tierra, y en él se cumplen las mismas leyes que en todos los demás puntos. Ello sugiere que, en el tiempo imaginario, el comienzo del tiempo puede ser un punto regular del espacio-tiempo, y que en él se podrían satisfacer las mismas leyes que en el resto del universo. (El origen y la evolución cuántica del uni­verso serán descritas en el capítulo siguiente).

Otro posible comportamiento puede ilustrarse suponiendo que el tiempo imaginario corresponde a los grados de longitud en la Tierra. Todos los meridianos (líneas de la misma longitud) se cortan en los po­los Norte y Sur. Así pues, en ellos el tiem­po se detiene, en el sentido que un incremento del tiempo imaginario, o de los grados de longitud, nos deja en el mismo punto. Esto se pare­ce mucho a la manera en que el tiempo real semeja detenerse en el ho­rizonte de un agujero negro. Hemos caído en la cuenta de que esta de­tención del tiempo real e imaginario (o los dos se detienen o ninguno de ellos lo hace) significa que el espacio-tiempo tiene una temperatu­ra, como descubrí en los agujeros negros. Los agujeros negros no sólo tienen una temperatura, sino que también se comportan como si tuvie­ran una magnitud denominada entropía. La entropía es una medida del número de estados internos (maneras como podríamos configurar su interior) que el agujero negro podría poseer sin parecer diferente a un observador exterior, que sólo puede observar su masa, rotación y car­ga. La entropía del agujero negro viene dada por una fórmula muy sen­cilla que descubrí en 1974. Es igual al área del horizonte del agujero negro: hay un bit de información sobre el estado interno del aguje­ro negro por cada unidad fundamental de área de su horizonte. Ello in­dica que hay una conexión profunda entre la gravedad cuántica y la termodinámica, la ciencia del calor (que incluye el estudio de la entro­pía). También sugiere que la gravedad cuántica puede exhibir la pro­piedad llamada holografía.

La información sobre los estados cuánticos en una región del es­pacio-tiempo puede ser codificada de algún modo en la frontera de dicha región, que tiene dos dimensiones menos. Algo parecido ocurre con los hologramas, que contienen una imagen tridimensional en una superficie bidimensional. Si la gravedad cuántica incorpora el principio holográfico, significa que podemos seguir la pista de lo que hay dentro de los agujeros negros. Esto es esencial si tenemos que ser capaces de predecir la radiación que sale de ellos. Si no lo podemos hacer, no po­dremos predecir el futuro en grado tan alto como creíamos. Trataremos esta cuestión en el Capítulo 4. La holografía será tratada de nuevo en el Capítulo 7. Parece que podríamos vivir en una 3-brana —una super­ficie cuadridimensional (tres dimensiones espaciales más una tempo­ral)— que es la frontera de una región de cinco dimensiones, con las restantes dimensiones enrolladas en una escala muy pequeña. El estado del universo en dicha membrana codificaría lo que está pasando en la región de cinco dimensiones.

CAPÍTULO 3

El UNIVERSO EN UNA CASCARA DE NUEZ

*El universo tiene múltiples historias, cada una de ellas determinada por una diminuta nuez*

Podría estar encerrado en una cáscara de nuez y sentirme rey de un espacio infinito...

Shakespeare, Hamlet, segundo acto, escena 2

QUIZÁS HAMLET QUERÍA DECIR QUE A PESAR DE QUE LOS humanos estemos físicamente muy limitados, nuestras mentes pueden explorar audazmente todo el universo y llegar donde los protagonistas de *Star Trek* temerían ir, si las pesadillas nos lo permiten.

¿Es el universo realmente infinito o sólo es muy grande? Y, ¿es perdurable o sólo tendrá una vida muy larga? ¿Cómo podrían nuestras mentes finitas comprender un universo infinito? ¿No resulta presun­tuoso hacernos siquiera este propósito? ¿Nos arriesgamos a sufrir el destino de Prometeo, que según la mitología clásica robó el fuego de Zeus para que lo utilizaran los humanos y fue castigado por esta teme­ridad a ser encadenado a una roca donde un águila venía a devorarle el hígado?

A pesar de todas estas precauciones, creo que podemos y debe­mos intentar comprender el universo. Ya hemos hecho notables pro­gresos en la comprensión del cosmos, particularmente en los últimos pocos años. Aunque no tenemos una imagen completa, podría ser que ésta no estuviera lejana.

Resulta obvio que el espacio se prolonga indefinidamente. Ello ha sido confirmado por instrumentos modernos, como el telescopio Hubble, que nos permite sondear las profundidades del espacio Lo que ve­rnos son miles de millones de galaxias de diversas formas y tamaños. Cada galaxia contiene incontables millo­nes de estrellas, muchas de las cuales están rodeadas por planetas. Vivimos en un planeta que gira alrededor de una estrella en un brazo ex­terior de la galaxia espiral de la Vía Láctea. El polvo de los brazos es­pirales nos impide ver el universo en el plano de la galaxia, pero a cada lado de éste tenemos haces cónicos de líneas de buena visibilidad y po­demos representar las posiciones de las galaxias. Hallamos que éstas están distribuidas en el espacio de manera aproximadamente uniforme, con algunas concentraciones y vacíos locales. La densidad de galaxias parece decrecer a distancias muy grandes, pero creemos que ello se debe a que son tan lejanas y tenues que no las podemos ob­servar. Por lo que sabemos, el universo se prolonga sin fin en el espa­cio.

Aunque el universo parece tener el mismo aspecto por doquier, cambia decididamente con el tiempo. Ello no fue advertido hasta los primeros años del siglo XX. Hasta entonces, se creía que el universo era esencialmente constante en el tiempo. Podría haber existido du­rante un tiempo infinito, pero ello parecía conducir a conclusiones absurdas. Si las estrellas hubieran estado radiando durante un tiempo infinito, habrían calentado todo el universo hasta su temperatura. Incluso de noche, todo el universo sería tan brillante como el Sol, por­que cada línea de visión terminaría en una estrella o en una nube de polvo que habría sido calentada hasta la temperatura de las estrellas.

La observación, tan familiar, de que el cielo nocturno es oscuro, es muy importante. Implica que el universo no puede haber existido siempre en el estado que lo vemos hoy. Algo debió ocurrir, hace un tiempo finito, que encendiera las estrellas, lo cual significa que la luz de las estrellas muy distantes todavía no ha tenido tiempo de llegarnos. Ello explicaría porqué el cielo no brilla en la noche en todas direccio­nes.

Si las estrellas hubieran estado siempre ahí, ¿por qué se encen­dieron de repente hace unos pocos miles de millones de años? ¿Qué reloj les dijo que se tenían que poner a brillar? Como hemos dicho, esto intrigó a muchos filósofos, como Immanuel Kant, que creían que el universo había existido siempre. Pero para la mayoría de la gente, ello resultaba consistente con la idea de que el universo había sido creado, más o menos en su estado actual, hace tan sólo unos pocos miles de años.

Sin embargo, las observaciones de Vesto Slipher y Edwin Hubble en la segunda década del siglo XX empezaron a desvelar discrepancias respecto de esta idea. En 1923, Hubble descubrió que muchas tenues manchas luminosas, llamadas nebulosas, eran en realidad galaxias, grandes conjuntos de estrellas como el Sol pero a gran distancia de no­sotros. Para que nos parezcan tan pequeñas y débiles, las distancias ha­bían de ser tan grandes que la luz procedente de ellas habría tardado millones o incluso miles de millones de años en llegarnos. Ello indica­ba que el comienzo del universo no podía haberse producido hace tan sólo unos pocos miles de años.

Pero la segunda cosa que Hubble descubrió aún resultaba más sorprendente. Los astrónomos habían aprendido que, mediante el aná­lisis de la luz de las otras galaxias, podemos averiguar si éstas se están acercando o alejando. Hallaron, estupefactos, que casi todas las galaxias se están alejando. Además, cuanto más lejos están, con ma­yor velocidad parecen estar alejándose. Fue Hubble quien se dio cuen­ta de las implicaciones espectaculares de este descubrimiento: a gran escala, todas las galaxias se están alejando de todas las demás galaxias. El universo se está expandiendo.

El descubrimiento de la expansión del universo fue una de las grandes revoluciones intelectuales del siglo XX. Constituyó una sor­presa radical y modificó completamente las discusiones sobre el origen del universo. Si las galaxias se están separando, debieron estar más jun­tas en el pasado. A partir de la tasa actual de expansión, podemos eva­luar que, efectivamente, estuvieron muy próximas las unas a las otras hace unos diez o quince mil millones de años. Como dije en el capítu­lo anterior, Roger Penrose y yo conseguimos demostrar que la teoría general de la relatividad de Einstein implica que el universo debió co­menzar en una tremenda explosión. Aquí estaba la explicación de por­qué el cielo nocturno es oscuro: ninguna estrella podría haber estado brillando más de diez o quince mil millones de años, el tiempo trans­currido desde la gran explosión.

Estamos acostumbrados a la idea de que los acontecimientos es­tán causados por acontecimientos anteriores, los cuales, a su vez, están provocados por acontecimientos aún más anteriores. Esta cadena de causalidad se estira hasta el pasado infinito. Pero supongamos que esta cadena tuvo un comienzo. Admitamos que hubo un primer aconteci­miento. ¿Cuál fue su causa? No es ésta una pregunta que muchos cien­tíficos quisieran tratar, sino que intentaban evitarla, ya fuera preten­diendo, como los rusos, que el universo no había tenido comienzo, o manteniendo que el origen del universo no pertenece al dominio de la ciencia, sino a la metafísica o la religión. En mi opinión, esta posición no debería ser adoptada por los verdaderos científicos. Si las leyes de la ciencia se suspendieran en el comienzo del universo, ¿no podrían fa­llar también en otras ocasiones? Una ley no es una ley si sólo se cum­ple a veces. *Debemos intentar comprender el comienzo del universo a partir de bases científicas. Puede Que sea una tarea más allá de nuestras capacidades, pero al menos deberíamos intentarlo.*

Pese a que los teoremas que Penrose y yo habíamos demostrado indicaban que el universo debía haber tenido un comienzo, no sumi­nistraban mucha información sobre la naturaleza de dicho inicio. In­dicaban que el universo comenzó en una gran explosión, un punto en que todo el universo, y todo lo que contiene, estaba apretujado en un solo punto de densidad infinita. En dicho punto, la teoría general de la relatividad de Einstein debería dejar de ser válida, por lo cual no puede ser utilizada para averiguar cómo empezó el universo. Apa­rentemente, el origen del universo queda más allá del alcance de la ciencia.

No es ésta una conclusión que deba alegrar a los científicos. Como indican los Capítulos 1 y 2, la razón por la cual la relatividad general deja de valer cerca de la gran explosión es que no incorpora el principio de incertidumbre, el elemento aleatorio de la teoría cuán­tica que Einstein había rechazado desde la idea de que Dios no juega a los dados. Sin embargo, todas las evidencias indican que Dios es un jugador impenitente. Podemos considerar el universo como un gran casino, en que los dados son lanzados a cada instante y las ruletas giran sin cesar. Podemos pensar que regentar un casino es un negocio muy arriesgado, porque nos exponemos a perder dinero cada vez que se lanzan los dados o la ruleta se pone a girar. Pero en un nú­mero grande de apuestas, las ganancias y las pérdidas dan como pro­medio un resultado que *puede* ser predicho, aunque no lo pueda ser el resultado de cada apuesta particular. Los propietarios de los casinos se aseguran de que la suerte se promedie a favor suyo. Por esto son tan ricos. La única posibilidad de ganarles es apostar contra ellos todo el dinero en unos pocos lanzamientos de dados o vueltas de la ruleta.

Lo mismo ocurre con el universo. Cuando éste es grande, como en la actualidad, hay un número muy elevado de lanzamientos de da­dos, y los resultados se promedian a algo que podemos predecir. Por esto las leyes clásicas funcionan en los sistemas grandes. Pero cuando el universo es muy pequeño, como lo era en los tiempos próximos a la gran explosión, sólo hay un pequeño número de lanzamientos de da­dos y el principio de incertidumbre resulta muy importante.

Corno el universo va lanzando los dados para ver qué pasará a continuación, no tiene una sola historia, como se podría esperar, sino que debe tener todas las historias posibles, cada una de ellas con su propia probabilidad. Debe haber una historia del universo en que Belice ganara todas las medallas de oro en los Juegos Olímpicos, aunque quizás la probabilidad de ello sea muy baja.

La idea de que el universo tiene múltiples historias puede sonar a ciencia ficción, pero actualmente es aceptada como un hecho científico. Fue formulada por Richard Feynman, que era un gran físico y todo un personaje.

Ahora trabajamos para combinar la teoría general *de* la relativi­dad de Einstein y la idea de Feynman de las historias múltiples en una teoría unificada que describa todo lo que ocurre en el universo. Tal teo­ría nos permitirá calcular cómo se desarrollará el universo si conoce­mos cómo empezaron las historias. Pero la teoría unificada no nos dice cómo empezó el universo ni cuál fue su estado inicial. Para ello, nece­sitamos lo que se llama condiciones de contorno, reglas que nos dicen qué ocurre en las fronteras del universo, los bordes del espacio y el tiempo.

Si la frontera del universo fuera un simple punto normal del espa­cio y el tiempo, podríamos atravesarlo y pretender que el territorio más allá de él también forma parte del universo. En cambio, si el contorno del universo fuera un borde muy irregular en que espacio y tiempo es­tuvieran apretujados y la densidad fuera infinita, resultaría muy difícil definir condiciones de contorno razonables.

Sin embargo, un colega llamado Jim Hartle y yo nos dimos cuen­ta de que hay una tercera posibilidad. Quizás el universo no tenga fron­teras en el espacio ni en el tiempo. A primera vista, ello parece entrar en flagrante contradicción con los teoremas que Penrose y yo habíamos demostrado, que indicaban que el universo debe haber tenido un co­mienzo, es decir, una frontera en el tiempo. Pero, como expliqué en el Capítulo 2, hay otro tipo de tiempo, llamado tiempo imaginario, que es ortogonal al tiempo real ordinario que sentimos pasar. La historia del universo en el tiempo real determina su historia en el tiempo imagina­rio, y viceversa, pero los dos tipos de historia pueden ser muy diferen­tes. En particular, en el tiempo imaginario no es necesario que el uni­verso haya tenido un comienzo. El tiempo imaginario se comporta como otra dirección espacial más. Así, las historias del universo en el tiempo imaginario pueden ser representadas como superficies curvadas, como por ejemplo una pelota, un plano o una silla de montar, pero con cuatro dimensiones en lugar de dos.

Si las historias del universo se prolongaran hasta el infinito, como una silla de montar o un plano, se nos plantearía el problema de espe­cificar cuáles son sus condiciones de contorno en el infinito. Pero po­demos evitar tener que especificar ninguna condición de contorno si las historias del universo en tiempo imaginario son superficies cerradas, como la superficie de la Tierra. La superficie terrestre no tiene fronte­ras ni bordes. No hay noticias fiables de personas que hayan caído de la Tierra.

Si las historias del Universo en tiempo imaginario son efectiva­mente superficies cerradas, tal como Hartle y yo hemos propuesto, ello podría tener consecuencias fundamentales para la filosofía y para nuestra imagen de dónde venimos. El universo estaría completa­mente autocontenido; no necesitaría nada fuera de sí para darle cuerda y poner en marcha sus mecanismos, sino que, en él, todo es­taría determinado por las leyes de la cien­cia y por lanzamientos de dados dentro del universo. Puede parecer presuntuoso, pero es lo que yo y muchos otros científicos creemos.

Incluso si la condición de contorno del universo es la ausencia de contornos, el universo no tendría una sola historia, sino múltiples, como lo había sugerido Feynman. En tiempo imaginario, a cada posible superficie cerrada le correspon­dería una historia, y cada historia en el tiempo imaginario deter­minaría una historia en el tiempo real. Habría, pues, una supera­bundancia de posibilidades para el universo. ¿Qué selecciona, de entre todos los universos posibles, el universo particular en que vi­vimos? Podemos constatar que muchas de las posibles historias del universo no pasan por la secuencia de formar galaxias y estrellas, que resul­ta tan esencial para nuestro desarro­llo. Aunque podría ser que se desa­rrollasen seres inteligentes incluso en ausencia de galaxias y estrellas, ello parece muy improbable. Así, el mismo hecho de que existamos como seres capaces de preguntarse «¿por qué el universo es como es?» ya constituye una restricción sobre la historia en que vivimos.

Esto implica que nuestro universo pertenece a la minoría de his­torias que contienen galaxias y estrellas, lo cual es un ejemplo de lo que se conoce como principio antrópico. Este principio afirma que el uni­verso debe ser más o menos como lo ve­mos, porque si fuera diferente, no exis­tiría nadie para observarlo. A muchos científicos les desagrada el principio antrópico, porque tiene aspecto muy impreciso y parece carecer de poder predictivo. Pero es posible darle una formulación precisa, y parece resultar esencial en el análisis del origen del universo. La teoría M, descrita en el Capítulo 2, permite un nú­mero muy grande de posibles historias del universo. La mayoría de ellas no resultan adecuadas para el desarrollo de vida inteligente: o bien corresponden a universos vacíos, o duran demasiado poco tiem­po, o están demasiado curvadas, o resultan insatisfactorias en un sen­tido u otro. Pese a ello, según la idea de Richard Feynman de múltiples historias, estas historias deshabitadas pueden tener una probabilidad considerablemente elevada.

De hecho, no nos importa realmente cuántas historias pueda ha­ber que no contengan seres inteligentes. Sólo estamos interesados en el subconjunto de historias en que se desarrolle vida inteligente. Esta no tiene porqué ser parecida a los humanos: pequeños extraterrestres verdes servirían igualmente. La especie humana no brilla demasiado por su conducta inteligente.

Como ejemplo del poder del principio antrópico, consi­deremos el número de direcciones en el espacio. Es un hecho de experiencia común que vivimos en un espacio tridimensio­nal. Es decir, podemos representar la posición de un punto en el espacio mediante tres números, por ejemplo latitud, longi­tud y altura sobre el nivel del mar. Pero, ¿por qué el espacio es tridimensional? ¿Por qué no tiene dos dimensiones, o cuatro, o cualquier otro número, tal como en la ciencia ficción? En la teo­ría M, el espacio tiene nueve o diez dimensiones, pero se cree que seis o siete de ellas están enrolladas con radios de curvatura muy pequeños, y sólo quedan tres dimensiones grandes y relativamente pla­nas.

¿Por qué no vivimos en una historia en que ocho de las dimen­siones estén enrolladas en radios muy pequeños, y haya tan sólo dos dimensiones observables? A un animal bidimensional le resultaría muy difícil la digestión. Si lo atravesara un tubo digestivo, lo dividiría en dos y la pobre criatura caería en pedazos. Por lo tanto, dos dimensio­nes planas no bastan para algo tan complejo como la vida inteligente. Por otro lado, si hubiera cuatro o más dimensiones aproximadamente planas, la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos crecería más rápida­mente cuando se aproximaran entre sí. Ello significaría que los plane­tas no tendrían órbitas estables alrededor de sus soles: o bien caerían hacia el sol o bien se escaparían a la oscuridad y el frío ex­teriores.

Análogamente, tampoco serían estables las órbitas de los electro­nes en los átomos, de manera que no existiría la materia tal como la co­nocemos. Así pues, aunque la idea de múltiples historias admite en principio cualquier número de dimensiones relativamente planas, sólo las historias con tres de estas dimensiones podrán contener seres inte­ligentes. Sólo en tales historias será formulada la pregunta de «¿por qué el espacio tiene tres dimensiones?».

La historia más sencilla del universo en tiempo imaginario es una esfera lisa, como la superficie de la Tierra, pero con dos dimensiones más. Ésta determina en el tiempo real una historia del uni­verso, en la cual éste es homogéneo y se expande con el tiempo. En estos aspectos, se comporta como el universo en que vivimos, pero su tasa *de* expansión es muy rápida, y cada vez se acelera más. La ex­pansión acelerada se denomina inflación, porque se parece al creci­miento cada vez más rápido de los precios en algunas épocas.

Generalmente se considera que la inflación de los precios es in­deseable, pero en el caso del universo la inflación resulta muy benefi­ciosa. La gran expansión suaviza las irregularidades que pueda haber habido en el universo primitivo. A medida que el universo se expande, toma prestada energía del campo gravitatorio para crear más materia. La energía positiva de la materia es cancelada exactamente por la ener­gía negativa de la gravitación, de manera que la energía total es nula.

Cuando el tamaño del universo se duplica, las energías de la materia y de la gravitación se duplican, pero dos por cero sigue siendo cero. ¡Ojalá el mundo de las finanzas resultara tan sencillo!.

Si la historia del universo en tiempo imaginario fuera una esfera perfectamente redonda, la historia correspondiente en tiempo real se­ría un universo que se seguiría expandiendo indefinidamente de mane­ra inflacionaria. Mientras el universo se expande de forma inflaciona­ria, la materia no puede aglomerarse para formar galaxias y estrellas, y por lo tanto no se podría desarrollar vida, ni mucho menos vida inteli­gente tal como la conocemos. Así pues, aunque en el tiempo imagina­rio las historias del universo correspondientes a esferas perfectamente redondas son permitidas por la noción de múltiples historias, no resul­tan excesivamente interesantes. En cambio, las historias en tiempo imaginario que son como esferas ligeramente aplanadas en el polo sur son mucho más relevantes.

En este caso, la historia correspondiente en tiempo real se expan­diría al principio de manera acelerada, inflacionaria. Pero después la expansión comenzaría a frenarse, y se podrían formar galaxias. Para que se pudiera desarrollar vida inteligente, el aplanamiento en el polo Sur debería ser muy ligero. Ello significaría que inicialmente el univer­so se expandiría mucho. El nivel récord de inflación monetaria tuvo lu­gar en Alemania entre las guerras mundiales, cuando los precios subie­ron miles de millones de veces. Pero la magnitud de la inflación que debe haber habido en el universo es al menos mil billones de billones de veces esta cantidad.

Debido al principio de incertidumbre, no habría sólo una histo­ria del universo que contuviera vida inteligente, sino que tales his­torias constituirían, en el tiempo imaginario, una familia completa de esferas ligeramente deformadas, cada una de las cuales correspondería en el tiempo real a una historia en que el universo se expande de ma­nera inflacionaria durante un tiempo largo pero no indefinidamente. Nos podemos preguntar cuáles de estas historias permitidas son las más probables. Resulta que las más probables no son las historias completamente lisas, sino las que tienen ligeras protuberancias y de­presiones. Las arrugas en las historias más probables son minúsculas: corresponden a perturbaciones de aproximadamente una parte en cien mil. Sin embargo, aunque son tan pequeñas, hemos con­seguido observarlas como pequeñas variaciones en las microondas procedentes de diferentes direcciones del espacio. El satélite COBE (Cosmic *Background Explorer),* lanzado el 1989, consiguió cartografiar el contenido de microondas del firmamento.

Los diferentes colores indican diferentes temperaturas, pero el in­tervalo total del rojo al azul corresponde tan sólo a una diezmilésima de grado. Aún así, esta variación entre las diferentes regiones del uni­verso primitivo es suficiente para que la atracción gravitatoria adicional de las regiones más densas consiga detener su expansión y las haga colapsar de nuevo bajo su propia gravedad para formar galaxias y estre­llas. Así pues, al menos en principio, el mapa del COBE es como el pla­no de todas las estructuras del universo.

¿Cuál será el comportamiento futuro de las historias más probables del universo compatibles con la aparición de seres inteligentes? Parece haber varias posibilidades, según la cantidad de materia en el universo. Si ésta supera un cierto valor crítico, la atracción gravitatoria entre las galaxias las irá frenando hasta detenerlas. Entonces, empeza­rán a caer de nuevo las unas hacia las otras y chocarán con un gran cru­jido *(big crunch)* que será el fin de la historia del universo en tiempo real.

Si la densidad del universo es inferior al valor crítico, la gravedad es demasiado débil para detener la separación de las galaxias. Todas las estrellas se consumirán, y el universo será cada vez más frío y vacío. Así, de nuevo, todo llegará a un final, pero de una manera menos es­pectacular. De cualquier modo, el universo tiene aún unos cuantos mi­les de millones de años por delante.

Además de la materia, el universo puede contener lo que se llama «energía del vacío», energía que está presente incluso en un espacio aparentemente vacío. Según la famosa ecuación de Einstein, E = mc2, esta energía de vacío tiene masa. Ello significa que ejerce un efecto gravitorio sobre la expansión del universo. Pero, curiosamente, el efecto de la energía del vacío es opuesto al de la materia. Esta hace que la expan­sión se vaya frenando y puede llegar a detenerla e invertirla. En cambio, la energía del vacío hace que la expansión se acelere, como ocurre en la inflación. De hecho, la energía del vacío actúa como la constante cos­mológica mencionada en el Capítulo 1, que Einstein añadió a sus ecua­ciones originales en 1917, cuando cayó en la cuenta de que no admitían ninguna solución que representara un universo estático. Tras el descubrimento de Hubble de la expansión del universo, esta motivación para añadir un término a las ecuaciones desapareció, y Einstein abjuró de la constante cosmológica como si hubiera sido un gran error.

Sin embargo, podría no haberse tratado de un error. Como diji­mos en el capítulo 2, sabemos ahora que la teoría cuántica implica que el espacio-tiempo está lleno de fluctuaciones cuánticas. En una teoría supersimétrica, las energías infinitas positiva y negativa de las fluctua­ciones del estado fundamental de las partículas de espines diferentes se cancelan pero, como el universo no se halla en un estado supersimétrico, no cabe esperar que dichas energías se cancelen tan exactamente que no quede una pequeña cantidad, finita, de energía del vacío. Lo sor­prendente es que la energía del vacío sea tan próxima a cero, que no la detectamos hasta hace unos pocos años. Esto podría ser otro ejemplo del principio antrópico: en una historia con una mayor energía del va­cío no se habrían formado galaxias, de manera que no contendría seres que pudieran formularse la pregunta de «¿por qué es tan baja la energía del vacío?».

Podemos intentar determinar las cantidades de energía de la ma­teria y del vacío en el universo a partir de diversas observaciones. Si re­presentamos los resultados en un diagrama con la densidad de la mate­ria en el eje horizontal y la energía del vacío en el eje vertical, la línea de puntos indica la frontera de la región en que se podría desarrollar vida inteligente.

Observaciones de supernovas, cúmulos y el fondo de microondas eliminan regiones de este diagrama. Afortunadamente, estas tres regiones tienen una intersección común. Si la densidad de materia y la ener­gía del vacío se hallan en ella, significa que la expansión del universo se ha empezado a acelerar de nuevo, tras un largo período de frenado. Parece que la inflación podría ser una ley de la naturaleza.

En este capítulo hemos visto cómo el comportamiento de la in­mensidad del universo puede ser comprendido a partir de su historia en el tiempo imaginario, que es una esfera diminuta y ligeramente aplana­da. Es como la nuez de Hamlet, pero esta nuez codifica todo lo que ocurre en el tiempo real. Así pues, Hamlet tenía razón: podríamos es­tar encerrados en una cascara de nuez y sentirnos, aún así, reyes de un espacio infinito.