

MICHIO  
KAKU

LA  
ECUACIÓN  
DE DIOS

LA BÚSQUEDA DE  
UNA TEORÍA DEL TODO

Se

Lectulandia

Cuando Newton formuló la ley de la gravedad, unificó las reglas que rigen los cielos y la Tierra. Hoy el mayor desafío de la física es encontrar una síntesis de las dos grandes teorías, basadas en principios matemáticos diferentes: la de la relatividad y la cuántica. Combinarlas sería el mayor logro de la ciencia, una profunda fusión de todas las fuerzas de la naturaleza en una hermosa y magnífica ecuación que nos permitiría comprender los misterios más profundos del universo: ¿qué sucedió antes del Big Bang? ¿Qué hay al otro lado de un agujero negro? ¿Existen otros universos y otras dimensiones? ¿Es posible viajar en el tiempo?

Con ese objetivo, y con su conocida capacidad para divulgar conceptos complejos en un lenguaje accesible y atrayente, Michio Kaku repasa la historia de la física hasta llegar a los debates actuales en torno a la búsqueda de esa teoría unificadora, la «ecuación de Dios». Una historia cautivadora y contada de manera magistral, en la que lo que está en juego es nada menos que nuestra concepción del universo.

Michio Kaku

# **La ecuación de Dios**

## **La búsqueda de una teoría del todo**

ePub r1.0

**Un\_Tal\_Lucas** 02-03-2023

Título original: *The God Equation. The Quest for a Theory of Everything*  
Michio Kaku, 2021  
Traducción: Francesc Pedrosa Martín

Editor digital: Un\_Tal\_Lucas  
ePub base r2.1





*A mi querida esposa, Shizue,  
y a mis hijas, las doctoras  
Michelle y Alyson Kaku*

## **Introducción a la teoría Última**

**I**ba a ser la teoría última, un marco único que contemplaría todas las fuerzas del cosmos y lo coreografiaría todo, desde el movimiento del universo en expansión hasta las danzas más nimias de las partículas subatómicas. El desafío era escribir una ecuación cuya elegancia matemática abarcase la totalidad de la física.

Algunos de los físicos más eminentes de todo el mundo se lanzaron a esta aventura. Incluso Stephen Hawking dio una charla con el prometedor título «¿Estamos acercándonos al final de la física teórica?».

Si dicha teoría tuviera éxito, sería el logro máximo de la ciencia, el Santo Grial de la física: una sola fórmula a partir de la cual se podrían deducir, en principio, todas las demás ecuaciones, desde el Big Bang hasta el final del universo. Sería el producto último de dos mil años de investigación científica, desde que los antiguos plantearon la pregunta: «¿De qué está hecho el mundo?».

Es una visión asombrosa.

## **EL SUEÑO DE EINSTEIN**

**L**a primera vez que me enfrenté al desafío de este sueño tenía ocho años. Cierto día, los periódicos anunciaron que un gran científico acababa de morir, y mostraban una fotografía inolvidable.

Era una imagen de su escritorio, con un cuaderno abierto. El pie de foto anunciaba que el mayor de los científicos de nuestro tiempo no había podido

finalizar el trabajo que había iniciado. Quedé fascinado. ¿Qué podía ser tan complicado que ni siquiera el gran Einstein había podido resolverlo?

Aquel cuaderno contenía su inacabada teoría del todo, lo que el físico alemán llamaba «teoría del campo unificado». Quería una ecuación, quizá de menos de tres centímetros que le permitiese, en sus propias palabras, «leer la mente de Dios».

Sin comprender del todo la magnitud del problema, decidí seguir los pasos de aquel gran hombre, y esperé desempeñar un pequeño papel en la conclusión de su misión.

Pero muchos otros lo han intentado también, sin conseguirlo<sup>[1]</sup>. Como dijo una vez el físico de Princeton Freeman Dyson, el camino hacia la teoría del campo unificado está plagado de cadáveres: los de los intentos fallidos.

Actualmente, sin embargo, muchos físicos brillantes creen que estamos convergiendo por fin hacia la solución.

La candidata más destacada (y, desde mi punto de vista, la única) se denomina «teoría de cuerdas», y sostiene que el universo no se compone de partículas puntuales, sino de minúsculas cuerdas en vibración, cada una de cuyas notas corresponde a una partícula subatómica.

Con un microscopio lo bastante potente podríamos ver que electrones, quarks, neutrinos, etcétera, no son más que vibraciones de minúsculas cuerdas similares a gomas elásticas. Si rasgueamos la goma lo suficiente y de formas distintas, terminaremos por crear todas las partículas subatómicas conocidas en el universo. Esto es, todas las leyes de la física se pueden reducir a la armonía de estas cuerdas. La química son las melodías que pueden interpretarse con ellas. El universo es una sinfonía. Y la mente de Dios, de la que Einstein escribió de manera tan elocuente, es música cósmica que resuena por todo el espacio-tiempo.

No se trata solo de una cuestión teórica. Cada vez que los científicos han desentrañado una nueva fuerza, el curso de la civilización y el destino de la humanidad se han visto alterados. Por ejemplo, el descubrimiento de Newton de las leyes del movimiento y la gravedad sentó los cimientos de la era de las máquinas y de la Revolución Industrial. La explicación de la electricidad y el magnetismo por parte de Michael Faraday y James Clerk Maxwell abrió el camino hacia la iluminación de nuestras ciudades y nos dio potentes motores y generadores eléctricos, así como comunicaciones instantáneas mediante la televisión y la radio. La fórmula de Einstein  $E = mc^2$  elucidó el poder de las estrellas y ayudó a explicar la fuerza nuclear. Cuando Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg, entre otros, descubrieron los secretos de la teoría

cuántica, nos dieron nuestra actual revolución tecnológica, con superordenadores, láseres, internet y los fabulosos dispositivos que llenan nuestros hogares.

En última instancia, todas las maravillas de la tecnología moderna deben su origen a los científicos que fueron descubriendo las fuerzas fundamentales del mundo. Y es posible que todos ellos fueran aproximándose cada vez más a la teoría que unifica estas cuatro fuerzas de la naturaleza: gravedad, electromagnetismo y las fuerzas nucleares fuerte y débil. Esto puede acabar por desvelar algunos de los misterios y cuestiones más profundos de la ciencia, como:

- ¿Qué sucedió antes del Big Bang? ¿Por qué se produjo la explosión?
- ¿Qué hay al otro lado de un agujero negro?
- ¿Es posible viajar en el tiempo?
- ¿Hay agujeros de gusano hacia otros universos?
- ¿Hay dimensiones superiores?
- ¿Hay un multiverso o universos paralelos?

Este libro trata sobre la búsqueda de esa teoría definitiva y sobre las inusitadas vicisitudes de lo que es, sin duda, uno de los capítulos más extraños de la historia de la física. Repasaremos las revoluciones del pasado que nos han otorgado nuestras maravillas tecnológicas, empezando por la revolución newtoniana y siguiendo por el dominio de la fuerza electromagnética, pasando por el desarrollo de la relatividad y de la teoría cuántica, hasta llegar a la actual teoría de cuerdas. A su vez, explicaremos cómo esta última puede también desvelar los misterios más profundos del espacio y el tiempo.

## UN EJÉRCITO DE CRÍTICOS

**S**in embargo, los obstáculos siguen ahí. A pesar del entusiasmo generado por la teoría de cuerdas, los críticos han estado muy dispuestos a señalar sus defectos. Y, después de todo el alboroto, los progresos se han estancado.

El problema más evidente es que, a pesar de las favorecedoras alabanzas publicadas acerca de la belleza y la complejidad de esta teoría, no tenemos pruebas sólidas y comprobables. En su momento, se esperaba que el Gran

Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés), en las afueras de Ginebra, el mayor acelerador de partículas de la historia, aportara pruebas concluyentes de la teoría última, pero de momento se nos sigue escapando. El LHC pudo hallar el bosón de Higgs (o «partícula de Dios»), pero este no era más que una minúscula parte de la teoría última.

Aunque se han hecho ambiciosas propuestas para tener un sucesor aún más potente que el LHC, no hay garantía de que estas costosas máquinas vayan a conseguir nada en absoluto. Nadie sabe con certeza la energía que se necesita para encontrar las partículas subatómicas necesarias que verifiquen la teoría.

Pero, quizá, la más importante de las críticas a la teoría de cuerdas es que esta predice un multiverso de universos. Einstein dijo una vez que la pregunta fundamental era: ¿tuvo Dios elección al crear el universo? ¿Es el universo único? La teoría de cuerdas en sí es única, pero probablemente tenga un número infinito de soluciones. Los físicos llaman a esto el «problema del paisaje», el hecho de que nuestro universo sea solo uno en un océano de otros igualmente válidos. Entonces, entre todas las posibilidades, ¿cuál es el nuestro? ¿Por qué vivimos en este y no en otro? ¿Cuál es, así pues, el poder predictivo de la teoría de cuerdas? ¿Es una teoría del todo o una teoría de cualquier cosa?

Admito que me mueve un interés personal en esta búsqueda. He estado trabajando en la teoría de cuerdas desde 1968, cuando apareció por accidente, sin anunciarse y de la manera más inesperada. He visto la notable evolución de esta teoría, que se ha desarrollado a partir de una única fórmula hasta convertirse en una disciplina con una verdadera biblioteca de artículos que hablan sobre ella. En la actualidad, la teoría de cuerdas constituye la base de buena parte de la investigación que llevan a cabo los principales laboratorios del mundo. Este libro espera ofrecerle un análisis equilibrado y objetivo de sus progresos y limitaciones.

También explicará por qué esta búsqueda se ha apoderado de la imaginación de los mejores científicos del mundo y por qué esta teoría ha generado tanta pasión y controversia.

# 1

## UNIFICACIÓN: EL ANTIGUO SUEÑO

**A**l contemplar el magnífico esplendor del cielo nocturno, rodeado por las brillantes estrellas, es fácil sentirse abrumado por su absoluta e imponente majestuosidad y pensar sobre las cuestiones más misteriosas.

¿Hay un propósito superior en el universo?

¿Cómo podemos encontrarle el sentido a un cosmos que, aparentemente, carece de él?

¿Tiene alguna lógica nuestra existencia o todo es insustancial?

Me viene a la memoria el poema de Stephen Crane:

*Un hombre le dijo al universo:*

*«¡Señor, yo existo!».*

*«Y sin embargo», respondió el universo,*

*«ese hecho no me ha inspirado obligación alguna».*

En Grecia se llevaron a cabo los primeros intentos serios de ordenar el caos del mundo que nos rodea. Filósofos como Aristóteles creían que todo se podía reducir a la mezcla de cuatro ingredientes fundamentales: tierra, aire, fuego y agua. Pero ¿de qué forma dan lugar esos cuatro elementos a la rica complejidad del mundo?

Los griegos propusieron al menos dos respuestas a esta cuestión. La primera la dio el filósofo Demócrito, antes incluso que Aristóteles: creía que todo se podía reducir a unas partículas minúsculas, invisibles e indestructibles a las que llamó «átomos» (que significa «indivisible» en griego). Sin embargo, los críticos señalaron que era imposible obtener pruebas directas de su existencia, porque los átomos eran demasiado pequeños para ser observados. Pero Demócrito pudo señalar pruebas indirectas muy convincentes.

Pensemos, por ejemplo, en un anillo de oro. A lo largo de los años, este empieza a desgastarse. Algo se está perdiendo. Cada día, pequeñísimos fragmentos de materia desaparecen del anillo. Por tanto, a pesar de que los átomos son invisibles, su existencia se puede medir de forma indirecta.

Aún hoy la mayor parte de nuestra ciencia más avanzada se lleva a cabo indirectamente. Conocemos la composición del Sol, la estructura detallada del ADN y la edad del universo a través de medidas de este tipo. Todo esto lo sabemos, a pesar de que nunca hemos visitado las estrellas, hemos entrado en una molécula de ADN o hemos sido testigos del Big Bang. Esta distinción entre pruebas directas e indirectas se convertirá en un punto esencial cuando hablemos de los intentos por demostrar una teoría del campo unificado.

Una segunda estrategia fue propuesta por el gran Pitágoras, que tuvo el ingenio de aplicar una descripción matemática a fenómenos terrenales, como la música. Según la leyenda, descubrió similitudes entre el sonido obtenido al pulsar la cuerda de una lira y las resonancias provocadas al golpear una barra de metal con un martillo. Halló que en ambos casos se creaban frecuencias musicales que vibraban con ciertas proporciones de una cuerda. Así, algo tan estéticamente placentero como la música tiene su origen en la matemática de las resonancias. Esto, pensó él, demuestra que la diversidad de objetos que hay a nuestro alrededor debe de obedecer las mismas reglas.

Así, al menos dos grandes teorías sobre nuestro mundo surgieron de la antigua Grecia: la idea de que todo está formado por átomos invisibles e indestructibles y la de que la diversidad de la naturaleza se puede describir con las matemáticas de las vibraciones.

Por desgracia, con el fin de la civilización clásica, estas discusiones y debates filosóficos se perdieron, y la idea de que podía existir un paradigma que explicase el universo se olvidó durante casi mil años. La oscuridad se diseminó por todo el mundo occidental, y la investigación científica fue reemplazada en gran parte por la creencia en supersticiones, magia y brujería.

## RENACER DURANTE EL RENACIMIENTO

**E**n el siglo XVII, unos pocos grandes científicos se alzaron para desafiar el orden establecido e investigar la naturaleza del universo, pero tuvieron que

enfrentarse a una feroz oposición y persecución. Johannes Kepler, que fue uno de los primeros en aplicar las matemáticas al movimiento de los planetas, era consejero del emperador Rodolfo II, y quizá eludió la persecución mediante la pía inclusión de elementos religiosos en su obra científica.

Giordano Bruno, que había sido monje, no tuvo tanta suerte. En 1600 fue procesado y condenado a muerte por herejía. Lo amordazaron, lo pasearon desnudo por las calles de Roma y, por último, lo quemaron en la hoguera. ¿Su mayor delito? Declarar que era posible que hubiese vida en planetas que giraban alrededor de otras estrellas.

El gran Galileo, el padre de la ciencia experimental, estuvo cerca de correr la misma suerte que Bruno, pero, a diferencia de él, se retractó de sus teorías ante la posibilidad de morir. No obstante, nos dejó un legado duradero con su telescopio, quizás el invento más revolucionario y contestatario de la historia de la ciencia. Este instrumento permitió ver con nuestros propios ojos que el rostro de la Luna estaba señalado de cráteres, que Venus tenía fases coherentes con su órbita alrededor del Sol y que Júpiter tenía lunas; todas ellas ideas heréticas.

Por desgracia, fue sometido a arresto domiciliario y aislado de cualquier visita, y acabó por quedarse ciego (se cree que debido a que, una vez, había mirado directamente al Sol con su telescopio). Galileo murió roto. Pero el mismo año de su muerte, un niño nació en Inglaterra, un niño que, al crecer, completaría las teorías inacabadas de Galileo y Kepler, y nos daría una teoría unificada de los cielos.

## LA TEORÍA DE FUERZAS DE NEWTON

Isaac Newton es quizás el mayor científico que haya vivido jamás. En un mundo obsesionado con la magia y la hechicería, se atrevió a escribir las leyes universales que gobernaban los cielos y a estudiar las fuerzas con una nueva matemática inventada por él, llamada «cálculo». Como ha escrito el físico Steven Weinberg, «es con Isaac Newton con quien realmente da comienzo el sueño moderno de una teoría última»<sup>[1]</sup>. En su tiempo se consideró la teoría del todo, es decir, aquella que describía todo el movimiento.

Todo empezó cuando Newton tenía veintitrés años. La Universidad de Cambridge estaba cerrada a causa de la peste negra. Un día de 1666, mientras daba un paseo por sus propiedades, vio caer una manzana. Entonces se formuló una pregunta que alteraría el curso de la historia: si una manzana cae, ¿también lo hace la Luna?

Antes de Newton, la Iglesia enseñaba que había dos clases de leyes: las leyes terrenales, corrompidas por el pecado de los mortales, y las puras, perfectas y armoniosas leyes de los cielos.

En esencia, la idea de Newton era proponer una teoría unificada que abarcase los cielos y la tierra.

En su cuaderno hizo un profético dibujo (véase la figura 1).

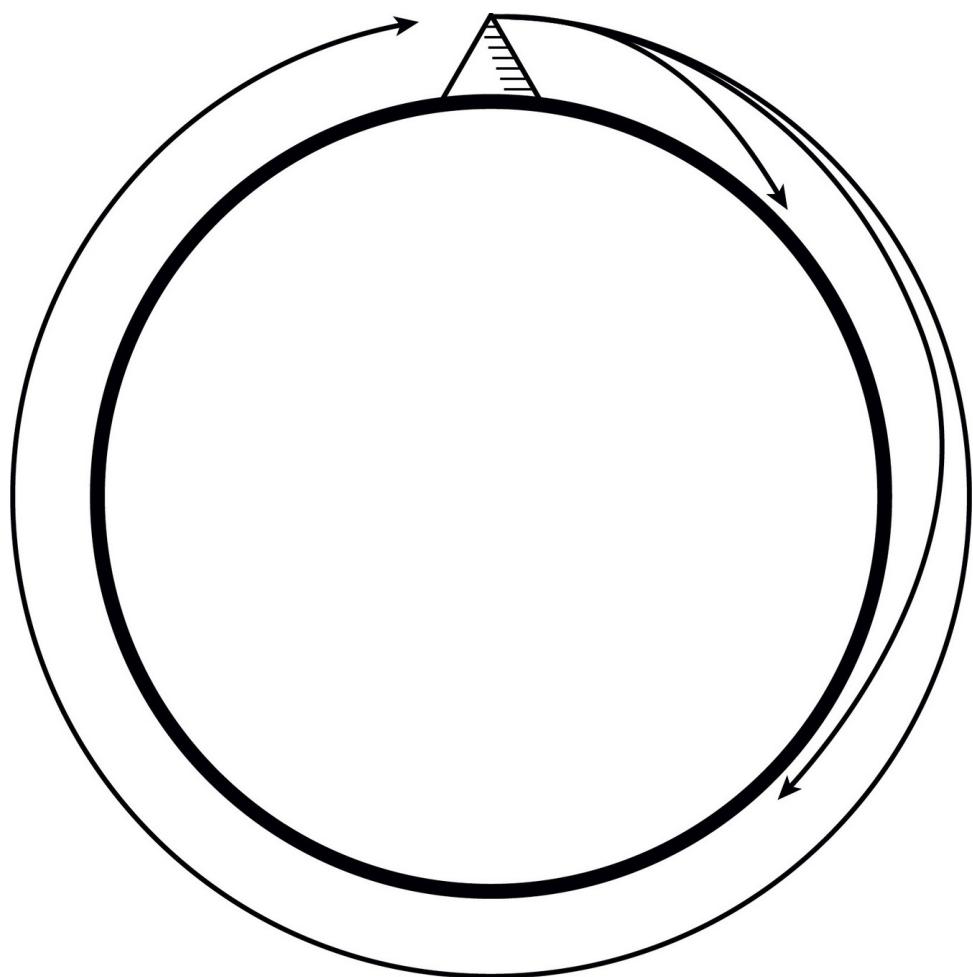


FIGURA 1. Se puede disparar una bola de cañón con una energía cada vez mayor, de manera que acabe por dar una vuelta completa a la Tierra y vuelva a su punto de partida. Newton afirmó que esto explicaba la órbita de la Luna, lo que unificaba las leyes físicas de la Tierra con las que afectan a los cuerpos celestes.

Si se dispara una bola de cañón desde la cima de una montaña, recorrerá cierta distancia antes de caer al suelo. Pero, si se dispara a velocidades cada vez mayores, llegará cada vez más lejos antes de tocar el suelo, hasta que,

finalmente, describa un círculo completo alrededor de la Tierra y vuelva a la cima de la montaña. Así, Newton llegó a la conclusión de que la ley natural que gobierna las manzanas y las bolas de cañón, la gravedad, también mantiene la Luna en su órbita alrededor de la Tierra. La física terrestre y la celestial eran la misma.

Logró llevar a cabo esta hazaña introduciendo el concepto de «fuerza». Los objetos se movían porque eran empujados o atraídos por fuerzas universales que se podían medir de manera precisa y matemática (anteriormente, algunos teólogos pensaban que los objetos se movían por voluntad propia, y caían porque deseaban unirse con la Tierra).

Así, Newton introdujo el concepto fundamental de la «unificación».

Pero él era un hombre muy reservado y mantenía en secreto buena parte de su trabajo. Tenía pocos amigos, era incapaz de charlar sobre nimiedades y a menudo se enzarzaba en amargas batallas con otros científicos acerca de sus descubrimientos.

En 1682 tuvo lugar un acontecimiento sensacional que cambió el rumbo de la historia: un llameante cometa pasó por encima de Londres. La noticia estaba en boca de todos, desde reyes y reinas hasta mendigos. ¿De dónde venía? ¿Adónde iba? ¿Qué portentos presagiaba?

Un hombre que se tomó un especial interés en ese cometa fue el astrónomo Edmond Halley. Viajó hasta Cambridge para reunirse con el famoso Isaac Newton, ya muy conocido por su teoría de la luz (al hacer pasar la luz por un prisma de cristal, comprobó que esta se dividía en todos los colores del arcoíris, demostrando así que la luz blanca es, en realidad, una composición de colores. También inventó un nuevo tipo de telescopio que empleaba espejos en lugar de lentes). Cuando Halley le preguntó a Newton acerca del cometa del que todos hablaban, se asombró al oír que este podía demostrar que los cometas se movían en elipses alrededor del Sol, y que incluso podía predecir la trayectoria que seguían utilizando su propia teoría de la gravedad. De hecho, los estaba rastreando con el telescopio que había inventado, y se movían como él había predicho.

Halley se quedó atónito.

Se dio cuenta de inmediato de que estaba siendo testigo de un hito en la historia de la ciencia, y se ofreció a pagar los gastos de impresión de lo que acabaría por convertirse en una de las obras maestras de esta: los *Principios matemáticos de la filosofía natural* o, simplemente, los *Principia*.

Es más: Halley, al saber que Newton estaba prediciendo que los cometas podían regresar a intervalos regulares, calculó que el de 1682 volvería a pasar

en 1758 (el cometa Halley pasó sobre Europa el día de Navidad de 1758, como se había predicho, y ayudó a consolidar de forma póstuma las reputaciones de ambos).

La teoría del movimiento y la gravitación de Newton sigue siendo uno de los mayores logros de la mente humana, un principio único que contemplaba todas las leyes del movimiento conocidas. Alexander Pope escribió al respecto:

*La naturaleza y sus leyes naturales yacían ocultas en la noche.*

*Dijo Dios: «¡Hágase Newton!».*

*Y se hizo la luz.*

Aún hoy son las leyes de Newton las que permiten a los ingenieros de la NASA guiar nuestras sondas espaciales por el sistema solar.

## ¿QUÉ ES LA SIMETRÍA?

La ley de la gravitación de Newton es también destacable por su simetría, de modo que la ecuación sigue siendo la misma si efectuamos una rotación. Imaginemos una esfera que rodee la Tierra; la fuerza gravitatoria es idéntica en todas partes. De hecho, ese es el motivo de que nuestro planeta sea esférico y no de cualquier otra forma: porque la gravedad ha comprimido la Tierra de manera uniforme. Por eso no vemos nunca estrellas cúbicas ni planetas piramidales (los asteroides pequeños tienen a menudo formas irregulares porque en ellos la fuerza gravitatoria es demasiado débil para comprimirlos con uniformidad).

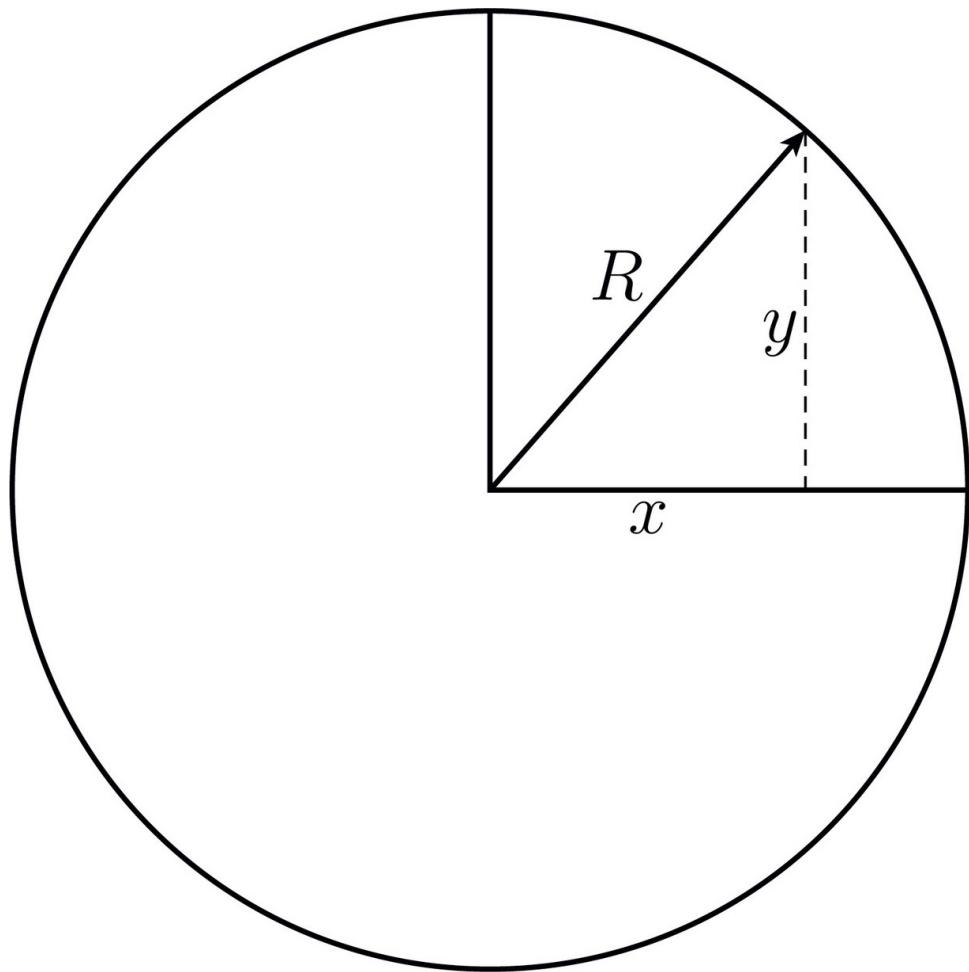
El concepto de «simetría» es simple, elegante e intuitivo. Es más, a lo largo de este libro, veremos que no es solo el frívolo adorno de una teoría, sino que es, de hecho, una característica esencial que señala un principio subyacente profundo acerca del universo.

Pero ¿qué significa que una ecuación es simétrica?

Un objeto es simétrico si, después de cambiar la disposición de sus partes, sigue siendo el mismo, esto es, es invariante. Por ejemplo, una esfera es

simétrica porque sigue siendo igual después de rotarla. Pero ¿cómo podemos expresar esto matemáticamente?

Piense en la Tierra girando alrededor del Sol (véase la figura 2). El radio de su órbita se expresa mediante  $R$ , que es igual mientras el planeta mantiene su recorrido (en realidad, la órbita es elíptica, de manera que  $R$  varía ligeramente, pero eso no importa para este ejemplo), y las coordenadas de la Tierra las dan  $x$  e  $y$ . A medida que esta se mueve en su órbita,  $x$  e  $y$  cambian sin cesar, pero  $R$  es invariante; es decir, no cambia.



$$R^2 = x^2 + y^2$$

FIGURA 2. Si la Tierra gira alrededor del Sol, el radio de su órbita ( $R$ ) permanece igual. Las coordenadas de la Tierra ( $x$  e  $y$ ) cambian continuamente a medida que el planeta describe este recorrido, pero  $R$  es una invariante. Por el teorema de Pitágoras, sabemos que  $X^2 + Y^2 = R^2$ , de modo que la ecuación de Newton tiene una simetría cuando se expresa en términos de  $R$  (porque es una invariante) o de  $X$  e  $Y$  (a través del teorema de Pitágoras).

Así, las ecuaciones de Newton mantienen su simetría, lo que significa que la gravedad entre la Tierra y el Sol es la misma a lo largo de toda la órbita<sup>[2]</sup>. A medida que cambia nuestro marco de referencia, las leyes permanecen

constantes. No importa con qué orientación contemplemos un problema: las reglas no cambian, y los resultados son los mismos.

Volveremos a tropezarnos con este concepto de simetría una y otra vez cuando hablemos de la teoría del campo unificado. De hecho, veremos que es una de las herramientas más potentes de que disponemos para unificar todas las fuerzas de la naturaleza.

## CONFIRMACIÓN DE LAS LEYES DE NEWTON

A lo largo de los siglos se han hallado numerosas confirmaciones de las leyes de Newton, y aquellas han tenido un impacto enorme, tanto en la ciencia como en la sociedad. En el siglo XIX, los astrónomos percibieron una extraña anomalía en el cielo: Urano se estaba desviando de las predicciones de las leyes de Newton. Su órbita no era una elipse perfecta, sino que se bamboleaba ligeramente. O bien había un defecto en las leyes del físico británico, o bien había un planeta aún no descubierto cuya gravedad tiraba de Urano. La fe en las leyes de Newton era tan grande que físicos como Urbain Le Verrier hicieron tediosos cálculos sobre dónde podía estar ese misterioso planeta. En 1846, los astrónomos lo encontraron a la primera, a un grado de la posición predicha, y fue llamado «Neptuno». Fue una gran hazaña para las leyes de Newton, y la primera vez en la historia en que se utilizaron matemáticas puras para detectar la presencia de un cuerpo celeste importante.

Como ya hemos mencionado, cada vez que los científicos decodificaban una de las cuatro fuerzas fundamentales del universo, esto no solo suponía revelar los secretos de la naturaleza, sino que revolucionaba la propia sociedad. Las leyes de Newton pusieron al descubierto el misterio de los planetas y los cometas, pero también sentaron los cimientos de las leyes de la mecánica, que utilizamos en la actualidad para diseñar rascacielos, motores, aviones de reacción, trenes, puentes, submarinos y cohetes. Por ejemplo, en la década de 1800 los físicos aplicaron las leyes de Newton para explicar la naturaleza del calor. En aquella época, los científicos especulaban con la idea de que este era una especie de líquido que se propagaba a través de una sustancia, pero investigaciones posteriores mostraron lo que en realidad era el calor: moléculas en movimiento, como minúsculas bolas de acero que

chocaban constantemente unas con otras. Las leyes de Newton nos permitieron calcular con precisión cómo estas rebotaban entre sí. Luego, sumando billones de moléculas, se pudieron deducir las propiedades exactas del calor (por ejemplo, según las leyes de Newton, cuando un gas encerrado en una cámara se calienta, este se dilata, porque el calor aumenta la velocidad de las moléculas en la cámara).

Los ingenieros pudieron, pues, utilizar estos cálculos para perfeccionar la máquina de vapor: les permitió saber cuánto carbón se necesitaba para convertir agua en vapor, que luego podía utilizarse para empujar engranajes, pistones, ruedas y palancas a fin de impulsar máquinas. Con la llegada de la máquina de vapor, en el siglo XIX, la energía que un trabajador tenía a su disposición se disparó a cientos de caballos de vapor. En poco tiempo, lugares distantes del mundo quedaron conectados por raíles de acero, lo que incrementó en gran medida el flujo de mercancías, conocimientos y personas.

Antes de la Revolución Industrial, los bienes eran producidos por reducidos y exclusivos gremios de artesanos especializados que se esforzaban para crear hasta el más simple de los artículos domésticos. También protegían celosamente los secretos de su labor, así que estos bienes solían ser escasos y caros. Con la llegada de la máquina de vapor y de los potentes mecanismos que posibilitó, los artículos podían producirse a una fracción del coste original, lo que aumentó en gran medida la riqueza colectiva de las naciones y elevó nuestro nivel de vida.

Cuando enseño las leyes de Newton a prometedores estudiantes de ingeniería, trato de hacer hincapié en que no se trata solo de áridas y aburridas ecuaciones, sino que aquellas han cambiado el curso de la civilización moderna, creando la riqueza y la prosperidad que vemos a nuestro alrededor. A veces incluso mostramos a nuestros estudiantes el catastrófico desplome del puente de Tacoma Narrows, en el estado de Washington, en 1940, que se grabó en una película, como un impactante ejemplo de lo que sucede cuando aplicamos mal las leyes de Newton.

Estas, que aspiran a unificar la física de los cielos con la de la tierra, abrieron el camino a la primera gran revolución tecnológica.

## EL MISTERIO DE LA ELECTRICIDAD Y EL MAGNETISMO

**H**abrían de pasar otros doscientos años para el siguiente gran avance, que vino del estudio de la electricidad y el magnetismo.

Los antiguos ya sabían cómo dominar el magnetismo —lo emplearon los chinos para inventar la brújula, que ayudó a iniciar la era de los descubrimientos—, pero temían el poder la electricidad, pues creían que los rayos expresaban la cólera de los dioses.

El hombre que finalmente sentó las bases de este campo fue Michael Faraday, un chico pobre pero trabajador que carecía de educación formal alguna. De niño, consiguió un empleo como ayudante en la Royal Institution de Londres. Normalmente, alguien de bajo nivel social habría estado toda su vida fregando suelos, lavando frascos y ocultándose en las sombras. Pero este joven era curioso e incansable, y logró que sus supervisores le permitieran llevar a cabo experimentos.

Faraday efectuó algunos de los mayores descubrimientos en el campo de la electricidad y el magnetismo. Demostró que, si se movía un imán dentro de un aro de alambre, se generaba electricidad en este, una observación asombrosa e importante, ya que en aquella época no se conocía la relación entre la electricidad y el magnetismo. También se pudo demostrar el comportamiento contrario, que un campo eléctrico móvil podía crear un campo magnético.

Poco a poco, Faraday se fue dando cuenta de que estos dos fenómenos son, de hecho, dos caras de la misma moneda. Esta simple observación facilitaría la entrada a la era de la electricidad, en la que ciudades enteras estarían iluminadas por gigantescas presas hidroeléctricas (en estas, el río mueve una turbina que hace girar un imán, y este empuja electrones hacia un cable, que envía la electricidad a los enchufes de las casas. El efecto opuesto, convertir campos eléctricos en magnéticos, es lo que hace funcionar su aspiradora: la electricidad de la toma eléctrica hace girar un imán, que impulsa una bomba para crear succión y que también hace girar los rodillos de la aspiradora).

Sin embargo, Faraday no tenía una educación formal, por lo que carecía de un dominio suficiente de las matemáticas para poder describir sus relevantes descubrimientos. Lo que hacía en su lugar era llenar cuaderno tras cuaderno con extraños diagramas que mostraban líneas de fuerza similares a las formas que dibujaban las limaduras de hierro alrededor de un imán. También inventó el concepto de «campo», uno de los más importantes de la física, que consiste en la propagación por el espacio de estas líneas de fuerza. Las líneas magnéticas se presentan rodeando a todos los imanes, y el campo

magnético de la Tierra emana del polo norte, se propaga por el espacio y luego vuelve al polo sur. Incluso la teoría de la gravedad de Newton se puede expresar en términos de campos, de manera que la Tierra gira alrededor del Sol porque orbita en el campo gravitatorio de este.

El descubrimiento de Faraday ayudó a explicar el origen del campo magnético que rodea la Tierra. Esta gira sobre sí misma, por lo que también lo hacen las cargas eléctricas en su interior. Este movimiento constante dentro del planeta es el responsable del campo magnético (pero esto todavía dejaba abierto un misterio: ¿de dónde salía el campo magnético de un imán de barra, en el que no hay movimiento ni giro alguno? Más tarde volveremos a este enigma). Actualmente, todas las fuerzas conocidas del universo se expresan en el lenguaje de los campos que Faraday introdujo por primera vez.

Dada su inmensa aportación al inicio de la era eléctrica, el físico Ernest Rutherford lo declaró «el mayor descubridor científico de todos los tiempos».

Faraday también era una *rara avis*, al menos en su época, porque le encantaba implicar a todo el mundo en sus descubrimientos, incluso a los niños. Era famoso por sus conferencias navideñas, en las que invitaba a todo el mundo a la Royal Institution de Londres para ser testigos de deslumbrantes muestras de magia eléctrica. Entraba en una gran habitación con las paredes cubiertas de finas láminas metálicas (lo que hoy llamamos una «jaula de Faraday») y la electrificaba. A pesar del aparente peligro, él estaba completamente a salvo, porque el campo eléctrico se dispersaba por toda la superficie de la habitación, de manera que en el interior seguía siendo cero. En la actualidad, este efecto suele usarse para cubrir hornos microondas, así como para proteger dispositivos delicados de campos eléctricos descontrolados o de los aviones, que reciben con frecuencia el impacto de rayos. (En un programa del Science Channel que presenté, entré en una jaula de Faraday en el museo de la ciencia de Boston, que bombardearon con gigantescos rayos eléctricos, de hasta dos millones de voltios, llenando el auditorio con un enorme chisporroteo. Pero yo no sentí nada de nada).

## LAS ECUACIONES DE MAXWELL

**N**ewton había demostrado que los objetos se mueven porque son empujados por fuerzas, lo cual podía describirse mediante el cálculo; y Faraday, que la electricidad se movía porque era empujada por un campo. Pero el estudio de los campos requería de una nueva rama de las matemáticas, una que terminó siendo codificada por el experto de Cambridge James Clerk Maxwell y a la que este denominó «cálculo vectorial». Así, de la misma forma en que Kepler y Galileo sentaron las bases de la física newtoniana, Faraday abrió el camino hacia las ecuaciones de Maxwell.

Este era un virtuoso de las matemáticas que llevó a cabo espectaculares avances en física. Se dio cuenta de que el comportamiento de la electricidad y del magnetismo, descubierto por Faraday y otros, se podía precisar con lenguaje matemático. Había una ley que afirmaba que un campo magnético móvil podía crear uno eléctrico. Otra afirmaba lo opuesto, que un campo eléctrico móvil podía crear uno magnético.

Entonces, Maxwell tuvo una idea que pasaría a la historia. ¿Y si un campo eléctrico variable crease uno magnético que luego crease otro campo eléctrico que, a su vez, crease otro magnético, etcétera? Su brillante perspicacia le llevó a ver que el producto final de este rápido movimiento de vaivén sería una onda móvil, donde los campos eléctrico y magnético se convertían el uno en el otro constantemente. Esta secuencia infinita de transformaciones tiene vida propia, y crea una onda móvil de vibrantes campos eléctrico y magnético.

Utilizó el cálculo vectorial para estimar la velocidad de esta onda móvil, y halló que era de 310 740 kilómetros por segundo. No daba crédito al resultado. Esta velocidad, considerando el error experimental, era notablemente próxima a la de la luz (que ahora se sabe que es de 299 792 kilómetros por segundo). A continuación, se atrevió a dar el paso siguiente ¡y afirmó que aquello era en realidad luz! La luz es una onda electromagnética.

Maxwell escribió entonces, proféticamente: «No podemos evitar inferir que la luz consiste en las ondulaciones transversales del mismo medio que causa los fenómenos eléctricos y magnéticos»<sup>[3]</sup>.

Hoy todos los estudiantes de Física e Ingeniería Eléctrica tienen que memorizar las ecuaciones de Maxwell, que son la base de la televisión, los láseres, las dinamos, los generadores, etcétera.

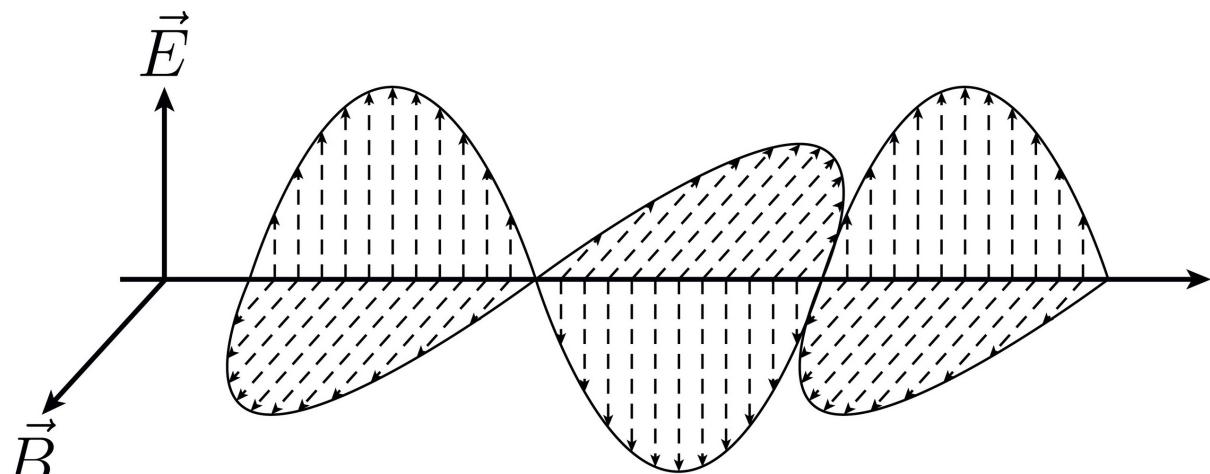


FIGURA 3. Los campos eléctrico y magnético son dos caras de la misma moneda. Cuando oscilan se convierten el uno en el otro y se mueven como una onda. La luz es una manifestación de una onda electromagnética.

Faraday y Maxwell unificaron la electricidad y el magnetismo, para lo cual fue clave la simetría. Las ecuaciones del escocés contienen la simetría denominada «dualidad», según la cual, si el campo eléctrico en un haz de luz está representado por  $E$  y el magnético por  $B$ , sus respectivas ecuaciones son las mismas cuando intercambiamos  $E$  y  $B$ . Esto implica que la electricidad y el magnetismo son dos manifestaciones de la misma fuerza.

Así, la simetría entre  $E$  y  $B$  nos permite unificar una y otro, lo que supone uno de los mayores avances científicos del siglo XIX<sup>[4]</sup>.

Los físicos quedaron fascinados por este descubrimiento. Se instituyó el Premio Berlín, que se ofrecía a cualquiera que pudiese reproducir estas ondas de Maxwell en el laboratorio. En 1886, el físico Heinrich Hertz llevó a cabo la histórica prueba.

En primer lugar, creó una chispa eléctrica en un rincón de su laboratorio, a unos metros de una bobina de cable. Hertz observó que, al conectar la chispa, podía generar una corriente eléctrica en la bobina, demostrando así que una misteriosa onda nueva había viajado de modo inalámbrico de un lugar al otro. Esto anunció la creación de un nuevo tipo de fenómeno, la radio. En 1894, Guglielmo Marconi presentó al público esta nueva forma de comunicación, mediante la cual podía enviar mensajes inalámbricos al otro lado del Atlántico a la velocidad de la luz.

Con la introducción de la radio, disponíamos de un modo superrápido, útil e inalámbrico de comunicarnos a largas distancias. Tradicionalmente, la falta de un sistema de comunicación rápido y fiable había sido uno de los

principales obstáculos para el progreso de la historia (en 490 a. e. c., después de la batalla de Maratón, entre los griegos y los persas, se ordenó a un pobre mensajero que corriese a comunicar la noticia de la victoria griega tan rápido como pudiese. Este recorrió con valor los más de cuarenta y dos kilómetros que había hasta Atenas, después de haber corrido casi doscientos cuarenta kilómetros hasta Esparta, y luego, según la leyenda, cayó muerto de puro agotamiento. Su heroísmo, en una época anterior a las telecomunicaciones, se homenajea en la moderna maratón).

En nuestros días damos por descontado que podemos enviar mensajes de un lado a otro del mundo sin esfuerzo alguno, gracias a que la energía se puede transformar de muchas maneras. Por ejemplo, al hablar por un teléfono móvil, la energía del sonido de su voz se convierte en energía mecánica cuando vibra el diafragma. Este está conectado a un imán que, como la electricidad y el magnetismo son intercambiables, crea un impulso eléctrico, del tipo que puede ser transportado a un ordenador y leído por él. Este impulso eléctrico se traduce entonces en ondas electromagnéticas, que recibe una torre de microondas cercana, donde el mensaje se amplifica y se envía a la otra parte del mundo.

Pero las ecuaciones de Maxwell no solo nos dieron la comunicación casi instantánea a través de radios, teléfonos móviles y cables de fibra óptica, sino que también abrieron todo el espectro electromagnético, del que la luz visible y las ondas de radio son solo dos miembros. En la década de 1660, Newton había demostrado que, cuando se hace pasar la luz blanca por un prisma, esta se divide en los colores del arcoíris. En el año 1800, William Herschel se había formulado una pregunta simple: ¿qué hay más allá de los colores del arcoíris, que van del rojo al violeta? Tomó un prisma para crear un arcoíris en su laboratorio y colocó un termómetro más allá del color rojo, donde no había color alguno. Para su sorpresa, la temperatura en esta zona vacía empezó a subir; en otras palabras, había un «color» tras el rojo que era invisible a simple vista, pero que contenía energía. Se denominó «luz infrarroja».

Actualmente, sabemos que hay todo un espectro de radiación electromagnética, la mayor parte de la cual es invisible, y cada una tiene una longitud de onda característica. La de la radio y la televisión, por ejemplo, es más larga que la de la luz visible, y la de los colores del arcoíris es, a su vez, mayor que la de los rayos ultravioleta y X.

Esto también significa que la realidad que vemos a nuestro alrededor es solo una minúscula franja del espectro electromagnético completo, una mínima aproximación a un universo mucho mayor de colores

electromagnéticos. Algunos animales pueden ver una franja mayor que nosotros. Las abejas, por ejemplo, pueden ver la luz ultravioleta, que es invisible para los humanos, pero esencial para ellas para encontrar el Sol incluso si el día está nublado. Las flores desarrollaron sus preciosos colores a fin de atraer a insectos como las abejas para que las polinicen, lo cual significa que, con frecuencia, son aún más espectaculares al observarlas bajo la luz ultravioleta.

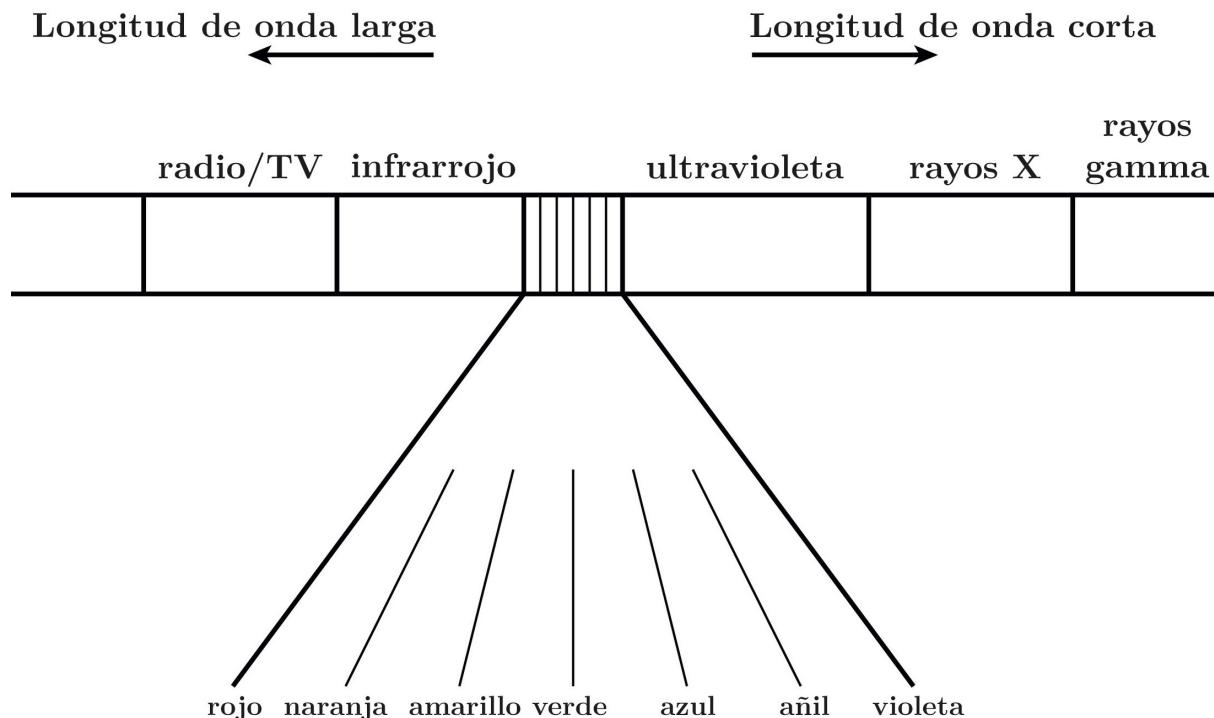


FIGURA 4. La mayor parte de los «colores» del espectro electromagnético, que va desde las ondas de radio hasta los rayos gamma, son invisibles a nuestros ojos. Nosotros solo podemos ver una mínima franja de todo el espectro debido al tamaño de las células en nuestras retinas.

Cuando era niño y leí acerca de esto, me pregunté por qué solo podíamos ver un fragmento tan pequeño del espectro electromagnético. «Qué desperdicio», pensé. Pero la razón, ahora me doy cuenta de ello, es que la longitud de una onda electromagnética es más o menos el tamaño de la antena que la produce. De ahí que su teléfono móvil mida unos pocos centímetros, porque ese es el tamaño de la antena que tiene, que es, aproximadamente, la longitud de las ondas electromagnéticas que emite. De forma parecida, el tamaño de una célula de su retina es más o menos el de la longitud de onda de los colores que puede ver. De ahí que solo podamos ver colores cuya longitud de onda sea del tamaño de nuestras células. Todos los demás colores del espectro electromagnético nos son invisibles porque sus longitudes de onda son demasiado grandes o demasiado pequeñas para las células de nuestra retina.

Así, si estas fueran del tamaño de una casa, quizá podríamos ver el torbellino de ondas de radio y de microondas a nuestro alrededor.

Asimismo, si las células de nuestros ojos tuvieran el tamaño de átomos, quizá podríamos ver los rayos X.

Una aplicación más de la ecuación de Maxwell es que la energía electromagnética puede alimentar todo el planeta. El petróleo y el carbón tienen que transportarse a gran distancia por barco o tren, pero la energía eléctrica se puede enviar por cables con solo accionar un interruptor, y electrificar así ciudades enteras.

Esto condujo, a su vez, a una famosa controversia entre dos de los gigantes de la era eléctrica, Thomas Edison y Nikola Tesla. El estadounidense era el genio responsable de numerosos inventos eléctricos, entre ellos la bombilla, el cine, el fonógrafo, el telégrafo y centenares de otros portentos. También fue el primero que tendió cables eléctricos en una calle, Pearl Street, en el centro de Manhattan.

Esto dio paso a la segunda gran revolución tecnológica: la era eléctrica.

Edison supuso que la corriente continua, o CC (la que siempre se mueve en la misma dirección y cuyo voltaje nunca varía), sería la mejor forma de transmitir la electricidad. En cambio, Tesla, que había trabajado para él y ayudó a sentar los cimientos de nuestra actual red de telecomunicaciones, defendía la corriente alterna, o CA (en la que la electricidad invierte su dirección unas sesenta veces por segundo). El resultado fue la célebre batalla de las corrientes, en la que gigantescas corporaciones invirtieron millones en las tecnologías rivales: General Electric apoyaba a Edison y Westinghouse, a Tesla. El futuro de la revolución eléctrica dependía de quién saliese victorioso de ese conflicto: Edison y su CC o Tesla y su CA.

Aunque el estadounidense era el genio detrás de la electricidad y uno de los arquitectos del mundo moderno, no comprendía del todo las ecuaciones de Maxwell, y este error le iba a costar caro. Edison, de hecho, menospreciaba a los científicos que sabían demasiadas matemáticas (según se cuenta, solía pedir a los que buscaban trabajo que calculasen el volumen de una bombilla eléctrica. Sonreía cuando estos trataban de usar matemáticas avanzadas para calcular tediosamente la forma de la bombilla y luego su volumen. A continuación, Edison se limitaba a llenar de agua una bombilla vacía y luego verterla en una probeta graduada).

Los ingenieros sabían que los cables tendidos a lo largo de kilómetros perdían una cantidad significativa de energía si transportaban tensiones bajas, como defendía Edison, de manera que económicamente se preferían los de

alta tensión de Tesla. Pero estos eran demasiado peligrosos para meterlos en el salón de tu casa. La táctica era utilizar eficientes cables de alta tensión desde la central eléctrica hasta la ciudad, y, a continuación, transformar, de alguna forma, la alta tensión en baja antes de que entrase en las casas. La clave era emplear transformadores.

Recordemos que Maxwell había demostrado que el movimiento de un campo magnético generaba una corriente eléctrica, y viceversa. De esta forma, se puede crear un transformador que cambie rápidamente la tensión en un cable. Por ejemplo, en una central eléctrica esta puede ser de miles de voltios, pero el transformador ubicado al lado de su casa puede reducirla a 220 voltios, con los que pueden funcionar sin problema el horno microondas y el frigorífico.

Si estos campos son estáticos e invariables, no pueden convertirse el uno en el otro. Como la corriente alterna cambia constantemente, es fácil convertirla en campos magnéticos, que, a continuación vuelven a ser campos eléctricos, pero con una tensión menor. Esto significa que, a diferencia de la corriente alterna, la tensión de la corriente continua no puede cambiarse fácilmente empleando transformadores, porque es constante y no variable.

Al final, Edison perdió la batalla y los considerables fondos que había invertido en tecnología de corriente continua. Ese es el precio pagado por ignorar las ecuaciones de Maxwell.

## ¿EL FIN DE LA CIENCIA?

**A**demás de explicar los misterios de la naturaleza y dar entrada a una nueva era de prosperidad económica, la combinación de las ecuaciones de Newton y las de Maxwell nos dio una teoría del todo bastante convincente. Al menos, de todo lo que se sabía entonces.

Ya en el año 1900, destacados científicos proclamaban el «fin de la ciencia», por lo que el cambio de siglo era una época estimulante: todo lo que se podía descubrir ya se había descubierto... o eso parecía.

Los físicos de aquel tiempo no se dieron cuenta de que los dos grandes pilares de la ciencia, las ecuaciones de Newton y las de Maxwell, eran, de hecho, incompatibles. Se contradecían entre sí.

Uno de los dos tenía que caer. Y la clave estaba en manos de un chico de dieciséis años que había nacido el mismo año en que murió Maxwell, 1879.

## 2

# EINSTEIN Y LA BÚSQUEDA DE LA UNIFICACIÓN

**S**iendo un adolescente, Einstein se formuló una pregunta que cambiaría el rumbo del siglo xx: ¿es posible ir más rápido que un rayo de luz?

Años más tarde escribiría que esta simple cuestión contenía la clave de su teoría de la relatividad.

De niño había leído un libro infantil de Aaron David Bernstein, *Popular Books on Natural Science*, donde se pedía que el lector se imaginase corriendo junto a una línea telegráfica. Lo que Einstein se imaginó, en cambio, fue que corría junto a un haz de luz, que debía visualizar congelado. Pensó que, si corría a su misma velocidad, las ondas lumínicas serían estacionarias, como Newton habría predicho.

Pero, incluso siendo un chico de dieciséis años, Einstein se dio cuenta de que nadie había visto jamás un haz de luz congelado. Algo fallaba. Pasaría los siguientes diez años meditando sobre esta cuestión.

Por desgracia, muchas personas lo tenían por un fracasado. Aunque era un estudiante brillante, sus profesores desaprobaban su estilo de vida desenfadado y bohemio. Como ya se sabía la mayor parte del material que se impartía, solía saltarse clases, y sus profesores escribían cartas de recomendación muy poco halagüeñas; cada vez que se presentaba para un empleo, era rechazado. Sin trabajo y desesperado, aceptó dar clases particulares (de las que fue despedido por discutir con su empleador). En cierto momento se planteó vender seguros para poder mantener a su novia y a su hijo (¿se imagina abrir la puerta un día y encontrarse a Einstein tratando de venderle un seguro?). Incapaz de encontrar trabajo, se consideraba una carga para su familia. En una carta escribió, desanimado: «No soy más que un estorbo para mis parientes. Habría sido mejor que nunca hubiese nacido»<sup>[1]</sup>.

Finalmente encontró un trabajo como administrativo de tercera clase en la oficina de patentes de Berna. Era humillante, pero en el fondo fue una

bendición. En la tranquilidad de la jornada laboral, Einstein pudo volver a la antigua cuestión que llevaba obsesionándolo desde niño. Desde allí, daría comienzo a una revolución que volvería del revés la física y el mundo.

Como estudiante en la afamada Escuela Politécnica Federal de Zúrich, había conocido las ecuaciones de la luz de Maxwell, y se preguntó si se les podría aplicar la velocidad de la luz. Sorprendentemente, nadie se había hecho antes esa pregunta. Utilizando la teoría de Maxwell, Einstein calculó la velocidad de un rayo de luz en un objeto en movimiento, como un tren. Esperaba que, visto por un observador externo estacionario, el resultado sería simplemente su velocidad habitual más la del tren. Según la mecánica de Newton, las velocidades se limitan a sumarse. Por ejemplo, si se lanza una bola de béisbol mientras se viaja en un tren, un observador estacionario diría que la velocidad de la bola es simplemente la velocidad del tren más la velocidad de la bola con relación al tren. Del mismo modo, las velocidades pueden también restarse, de manera que, si viaja junto a un rayo de luz, este debería parecerle estacionario.

Para su sorpresa, halló que el rayo de luz no estaba en absoluto congelado, sino que se alejaba a la misma velocidad. Pero eso era imposible, pensó. Según Newton, puedes atrapar cualquier cosa siempre que vayas lo bastante rápido. Era de sentido común. Sin embargo las ecuaciones de Maxwell decían que era imposible atrapar la luz, que se movía siempre a la misma velocidad, por muy deprisa que uno viajase.

Para Einstein, aquello fue una formidable revelación. O bien Newton tenía razón, o bien la tenía Maxwell; uno de los dos estaba equivocado. Pero ¿cómo era posible que no se pudiera alcanzar? En la oficina de patentes disponía de mucho tiempo para ponderar esta cuestión. Un día, en Berna, en la primavera de 1905, mientras viajaba en tren, «se desencadenó una tempestad en mi cabeza», tal como él mismo describiría<sup>[2]</sup>.

Su brillante idea fue que, como la velocidad de la luz se mide con relojes y metros, y es constante, independientemente de aquella a la que uno se mueva, ¡el espacio y el tiempo han de distorsionarse para mantener la velocidad de la luz constante!

Eso quería decir que, si uno está en una nave espacial que se mueve muy rápido, los relojes en su interior avanzan más lentamente que los de la Tierra. El tiempo se ralentiza cuanto más rápido nos movemos; este es el fenómeno que describe la relatividad especial de Einstein. Así que la pregunta «¿qué hora es?» depende de lo rápido que nos hayamos movido. Si la nave está viajando a una velocidad próxima a la de la luz, y la observamos desde la

Tierra con un telescopio, todo lo que haya en su interior parecerá moverse a cámara lenta, así como estar comprimido. Finalmente, todo lo que haya en la nave será más pesado. Lo más asombroso es que, para alguien que esté dentro, todo parecerá normal.

Einstein recordaría más adelante: «Le debo más a Maxwell que a ninguna otra persona»<sup>[3]</sup>. En la actualidad, este experimento puede llevarse a cabo de manera rutinaria: si colocamos un reloj atómico en un avión y lo comparamos con un reloj en la Tierra, se puede ver que el del avión va retrasado (muy poco, una parte en un billón).

Sin embargo, si el espacio y el tiempo pueden variar, entonces todo lo que se puede medir también debe variar, incluidas la materia y la energía. Y, cuanto más rápido nos movamos, más pesados seremos. Pero ¿de dónde sale la masa adicional? De la energía del movimiento. Esto quiere decir que parte de esta energía se convierte en masa.

La relación exacta entre materia y energía era  $E = mc^2$ . Esta ecuación, como veremos, respondía a una de las preguntas más profundas de la ciencia: ¿por qué brilla el Sol? El astro rey brilla porque, al comprimir átomos de hidrógeno a altas temperaturas, parte de la masa del hidrógeno se convierte en energía.

La clave para entender el universo es la unificación. Para la relatividad, fue la unificación del espacio, el tiempo, la materia y la energía. Pero ¿cómo se lleva a cabo esta unificación?

## SIMETRÍA Y BELLEZA

Para los poetas y demás artistas, la belleza es una etérea cualidad estética que evoca emoción y pasión.

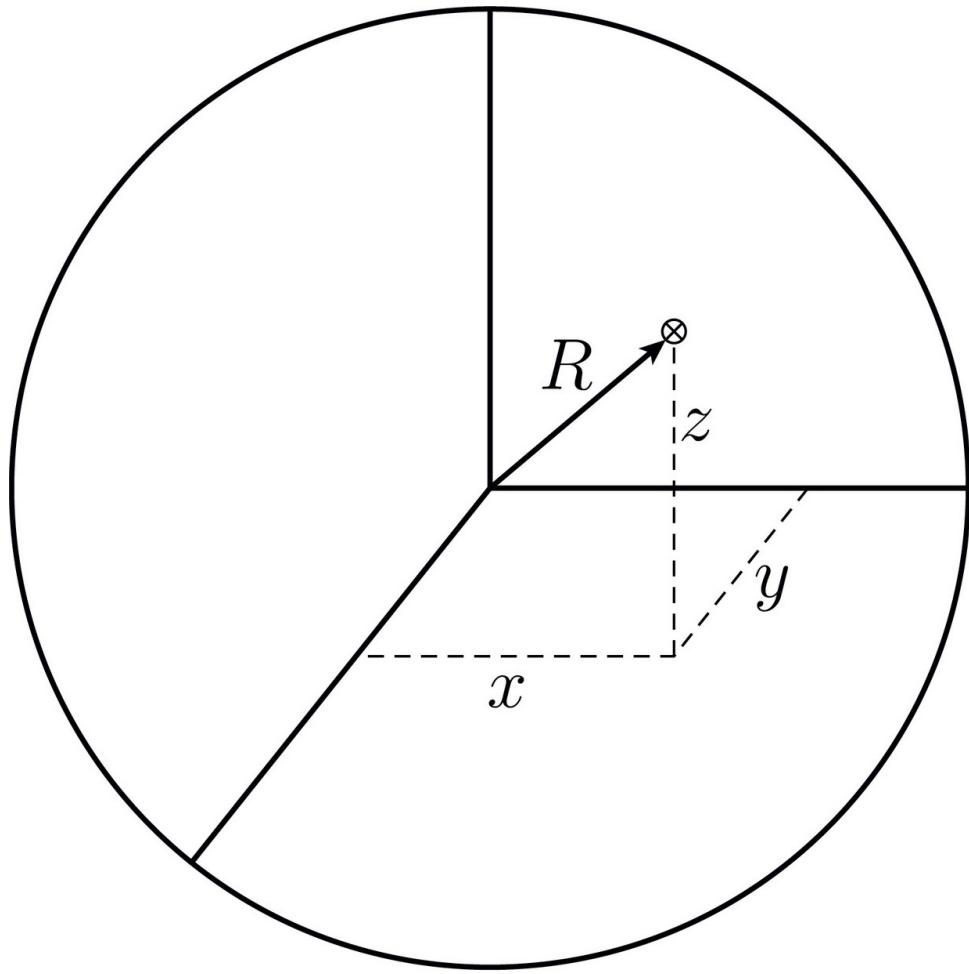
Para un físico, la belleza es la simetría. Las ecuaciones son bellas porque son simétricas, es decir, si se reordenan o reorganizan sus componentes, la ecuación sigue siendo la misma. Es invariante bajo esa transformación. Pensemos en un caleidoscopio, que toma una mezcla aleatoria de formas coloreadas y, mediante espejos, produce numerosas copias y las dispone simétricamente en un círculo. Así, algo caótico se convierte de repente en algo ordenado y bello gracias a la simetría.

De manera parecida, un copo de nieve es bello porque, si lo giramos sesenta grados, sigue siendo el mismo. Una esfera es aún más simétrica; se puede rotar en cualquier medida desde su centro y la esfera es idéntica. Para un físico, una ecuación es bella si, al reordenar sus diversas partes y componentes, el resultado no cambia; en otras palabras, si hallamos que tiene simetría entre sus partes. El matemático G. H. Hardy escribió una vez: «Los patrones de un matemático, como los de un pintor o un poeta, deben ser “bellos”; las ideas, como los colores o las palabras, deben encajar de forma armoniosa. La belleza es la primera de las pruebas; no hay lugar permanente en el mundo para las matemáticas feas»<sup>[4]</sup>. Y esa belleza es la simetría.

Hemos visto antes que, si se toma la fuerza gravitatoria de Newton para la Tierra, que gira alrededor del Sol, el radio de la órbita es constante. Las coordenadas  $x$  e  $y$  cambian, pero  $R$  no lo hace. Esto se puede generalizar también a tres dimensiones.

Imagine que está sentado en la superficie de la Tierra, donde su ubicación la dan tres dimensiones:  $x$ ,  $y$  y  $z$  son sus coordenadas (véase la figura 5). Al desplazarse a cualquier lugar, el radio de la Tierra,  $R$ , sigue siendo el mismo, y  $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ . Se trata de una versión tridimensional del teorema de Pitágoras<sup>[\*]</sup>.

Si ahora tomamos las ecuaciones de Einstein y cambiamos el espacio por el tiempo y el tiempo por el espacio, las ecuaciones siguen siendo las mismas. Esto significa que a las tres dimensiones del espacio se les une ahora la dimensión del tiempo,  $T$ , que se convierte en la cuarta dimensión<sup>[5]</sup>. Einstein mostró que la ecuación  $x^2 + y^2 + z^2 - T^2$  con el tiempo expresado en unas unidades determinadas) sigue siendo la misma, y es una versión en cuatro dimensiones del teorema de Pitágoras (observe que la coordenada tiempo tiene un signo menos  $-$ ). Esto quiere decir que, aunque la relatividad es invariante bajo rotaciones en cuatro dimensiones, la dimensión temporal se trata de una forma algo diferente a las otras tres dimensiones espaciales). Así, las ecuaciones de Einstein son simétricas en cuatro dimensiones.



$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

FIGURA 5. Al movernos por la superficie de la Tierra, el radio de esta,  $R$ , es una constante, una invariante, aunque las coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $z$  cambian en todo momento. Así, el teorema de Pitágoras tridimensional es la expresión matemática de esta simetría.

Las ecuaciones de Maxwell se formularon alrededor de 1861, el año en que dio comienzo la guerra de Secesión en Estados Unidos. Antes señalamos que poseen una simetría que convierte los campos eléctricos en magnéticos, y viceversa, pero ocultan una simetría adicional: si modificamos las ecuaciones en cuatro dimensiones intercambiando  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y  $T$  entre ellas, como hizo Einstein en la década de 1910, siguen siendo las mismas. Esto significa que, si los físicos no hubieran estado cegados por el éxito de la física newtoniana, ¡la relatividad podría haberse descubierto durante la guerra de Secesión!

## LA GRAVEDAD COMO ESPACIO CURVADO

**A**unque Einstein demostró que el espacio, el tiempo, la materia y la energía eran parte de una simetría tetradimensional mayor, sus ecuaciones sufrían de una laguna evidente: no decían nada de la gravedad ni de las aceleraciones. Einstein no estaba satisfecho. Tenía la intención de generalizar su teoría inicial, a la que llamó «relatividad especial», para incluir la gravedad y los movimientos acelerados, creando así una teoría general de la relatividad más sólida.

Sin embargo, su colega físico Max Planck le previno contra la dificultad de crear una teoría que combinase la relatividad y la gravedad: «Como viejo amigo tuyo, debo aconsejarte que no lo hagas. Porque, en primer lugar, no lo lograrás. E incluso si lo haces, nadie te creerá». Pero entonces añadió: «Si lo consigues, te llamarán el nuevo Copérnico»<sup>[6]</sup>.

Para cualquier físico, era obvio que la teoría de la gravedad de Newton y la teoría de Einstein entraban en conflicto. Este afirmaba que, si el Sol desapareciese de pronto sin dejar rastro, la Tierra tardaría ocho minutos en notar la ausencia. La famosa ecuación de la gravedad de Newton no menciona la velocidad de la luz, por lo que la gravedad viajaría instantáneamente, violando la relatividad, de manera que la Tierra tendría que sentir de inmediato el efecto de la ausencia del Sol.

Einstein llevaba diez años sopesando la cuestión de la luz, desde que tenía dieciséis. Pasaría los diez años siguientes, hasta los treinta y seis, centrado en la teoría de la gravedad. La clave de todo aquel rompecabezas se le ocurrió un día mientras estaba reclinado en una silla y casi se cayó al suelo. En aquel breve instante, se dio cuenta de que, si se hubiese caído, habría estado en ingratidez. Luego comprendió que aquella podía ser la clave de una teoría de la gravitación. Más tarde recordaría con agrado que aquel fue «el pensamiento más feliz de su vida».

Galileo adivinó que, si te caes de un edificio, estarás en ingratidez unos momentos, pero solo Einstein supo cómo sacar partido de aquel hecho para revelar el secreto de la gravedad. Imagine por un momento que está en un ascensor y se corta el cable. Caería, pero el suelo bajo sus pies caería al mismo tiempo, de manera que, dentro del ascensor, usted empezaría a flotar, como si no hubiera gravedad (al menos, hasta que el aparato chocase con el suelo). Dentro del ascensor, la gravedad quedaría exactamente anulada por la aceleración de la caída. Esto se denomina «principio de equivalencia», el hecho de que la aceleración en un marco de referencia es indistinguible de la gravedad en otro marco.

Cuando los astronautas aparecen ingravidos por televisión no es porque la gravedad haya desaparecido en el espacio, pues abunda en todo el sistema solar. El motivo es que la cápsula en la que van está cayendo justo al mismo ritmo que ellos. Como la bola de cañón imaginaria de Newton, disparada desde la cima de una montaña, los astronautas y su nave están en caída libre alrededor de la Tierra. Así, la ingravidez dentro de la nave es una ilusión, ya que todo, incluido su cuerpo y la propia nave, está cayendo al mismo ritmo.

Einstein aplicó esto a un tiovivo. Según la relatividad, cuanto más rápido te mueves, más plano te haces, porque el espacio se comprime. Al girar, el borde exterior de la atracción se mueve a mayor velocidad que el interior. Esto se traduce en que, debido al efecto relativista en el espacio-tiempo, el borde exterior se contrae más que el interior porque se mueve más rápido. Sin embargo, a medida que el tiovivo se acerca a la velocidad de la luz, el suelo se distorsiona, y ya no es simplemente un disco plano. El borde se ha contraído, mientras que el centro sigue igual, de modo que la superficie se curva como un cuenco vuelto del revés.

Imaginemos ahora que tratamos de caminar por el suelo curvado del tiovivo; no vamos a poder seguir una línea recta. Al principio podemos pensar que hay una fuerza invisible que intenta desviarnos, porque la superficie está deformada o curvada. Entonces, alguien en el tiovivo dice que hay una fuerza centrífuga que lo empuja todo hacia fuera, pero, para un observador del exterior, no hay ninguna fuerza externa, sino únicamente la curvatura del suelo.

Lo que hizo Einstein fue combinar todo esto. La fuerza que hace que te caigas en un tiovivo está en realidad provocada por la deformación del propio tiovivo. La fuerza centrífuga que se siente es equivalente a la gravedad; es decir, es una fuerza ficticia derivada del hecho de estar en un marco de referencia que acelera. En otras palabras, la aceleración en un marco de referencia es idéntica al efecto de la gravedad en otro marco, y este se debe a la curvatura del espacio.

Sustituyamos ahora el tiovivo por el sistema solar. La Tierra gira alrededor del Sol, así que los terrícolas tenemos la ilusión de que el astro rey ejerce una fuerza de atracción, llamada «gravedad», sobre la Tierra. No obstante, alguien que esté fuera del sistema solar no verá fuerza alguna; lo que observará es que el espacio alrededor del planeta se ha curvado, de manera que el vacío está empujando a la Tierra para que viaje en círculo alrededor del Sol.

Einstein hizo la brillante observación de que la atracción gravitatoria era, en realidad, una ilusión. Los objetos no se mueven porque la gravedad o la fuerza centrífuga tiren de ellos, sino porque los empuja la curvatura del espacio a su alrededor. Vale la pena repetirlo: la gravedad no tira; es el espacio el que empuja.

Shakespeare dijo una vez que el mundo entero es un escenario, y nosotros somos actores que entramos y salimos de él. Esta era la imagen adoptada por Newton. El mundo es estático, y nosotros nos movemos en esta superficie plana obedeciendo las leyes que él propuso.

Pero Einstein desechó esta imagen. El escenario, dijo, está curvado y deformado. Si camina sobre él, no puede hacerlo en línea recta; es empujado constantemente porque el suelo bajo sus pies está curvado, y se tambalea como un borracho.

La atracción gravitatoria es una ilusión. Por ejemplo, quizá ahora esté sentado en una silla, leyendo este libro. Por lo general, diría que la gravedad tira de usted hacia el asiento, y por eso no sale volando hacia el espacio. Pero Einstein diría que está sentado en la silla porque la Tierra deforma la masa de espacio sobre su cabeza, y esa deformación le empuja hacia el suelo.

Imagine que coloca una bola de lanzamiento de peso en un gran colchón. Esta hundirá el colchón y lo deformará. Si tira una canica, esta se moverá formando una línea curva. De hecho, dará vueltas alrededor de la bola. Un observador a distancia podría decir que hay una fuerza invisible que tira de la canica y la obliga a describir una órbita. Pero, mirando de cerca, se ve que no hay ninguna fuerza invisible. La canica no se mueve en línea recta porque el colchón está curvado, lo que hace que la trayectoria más recta sea una elipse.

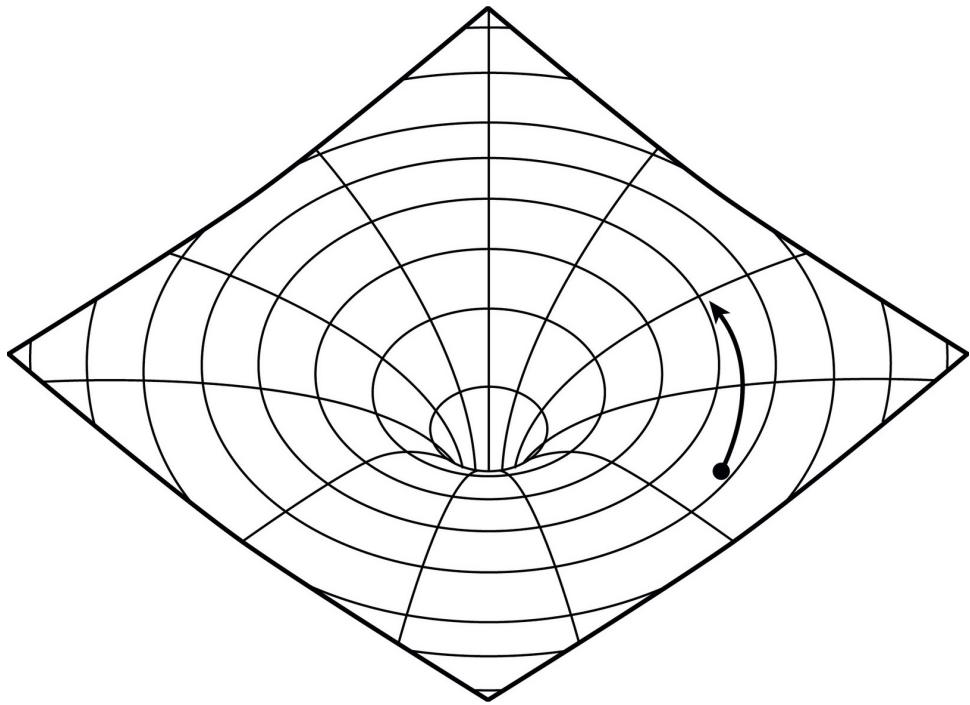


FIGURA 6. Una bola de lanzamiento de peso en un colchón se hunde. Una canica gira alrededor de la depresión creada. Visto a distancia, es como si una fuerza procedente de la bola tirase de la canica y la forzase a orbitar. De hecho, esto sucede porque el colchón está deformado. De la misma forma, la gravedad del Sol deforma la trayectoria de la luz de las estrellas distantes, cosa que se puede medir mediante telescopios durante un eclipse solar.

Sustituyamos ahora la canica por la Tierra, la bola por el Sol y el colchón por el espacio-tiempo. Veremos entonces que la Tierra gira alrededor del Sol porque este ha deformado el espacio a su alrededor, y el espacio por el que se desplaza la Tierra no es plano.

Imaginemos también unas hormigas que se mueven sobre una hoja de papel arrugada. No pueden moverse en línea recta. Puede que sientan una fuerza que tira de ellas continuamente, pero nosotros, que miramos las hormigas desde arriba, vemos que no hay ninguna fuerza en absoluto. Esta es la idea que surge de lo que Einstein llamó «relatividad general»: el espacio-tiempo se deforma por masas pesadas, lo que provoca la ilusión de la fuerza gravitatoria.

Esto quiere decir que la relatividad general es mucho más sólida y simétrica que la especial, ya que describe la gravedad, que afecta a todo lo que hay en el espacio-tiempo. La relatividad especial, por otra parte, solo funcionaba para objetos que se movían en el espacio-tiempo suavemente y en línea recta. Pero, en nuestro universo, casi todo está acelerando; desde los coches de carreras hasta los helicópteros, pasando por los cohetes, todo está acelerando. La relatividad general funciona para aceleraciones que cambian continuamente en todos los puntos del espacio-tiempo.

## ECLIPSE SOLAR Y GRAVEDAD

Cualquier teoría, por bella que sea, deberá enfrentarse en algún momento a la verificación experimental. De manera que Einstein aprovechó diferentes experimentos posibles. El primero fue la errática órbita de Mercurio. Al calcular esta, los astrónomos hallaron una ligera anomalía: en lugar de moverse en una elipse perfecta, como lo predecían las ecuaciones de Newton, se bamboleaba un poco, describiendo una forma similar a una flor.

Para proteger las leyes propuestas por el físico, los astrónomos postularon la existencia de un nuevo planeta, llamado Vulcano, dentro de la órbita de Mercurio. La gravedad de Vulcano tiraría de Mercurio y provocaría la aberración. Antes habíamos visto que esta estrategia había permitido a los astrónomos descubrir el planeta Neptuno, pero en este caso no lograron hallar ninguna prueba de Vulcano basada en la observación.

Así que, cuando Einstein aplicó su teoría de la gravedad para recalcular el perihelio de Mercurio, el punto de máxima proximidad al Sol, halló una ligera desviación con respecto a las leyes de Newton. Extasiado, vio que coincidía del todo con sus propios cálculos. Descubrió que la órbita distaba de ser una elipse perfecta por 42,9 segundos de arco por siglo, lo que estaba dentro del resultado experimental. Más tarde, recordaría con cariño: «Durante varios días, me sentí exultante de la emoción. Mis sueños más atrevidos se habían hecho realidad»<sup>[7]</sup>.

También se dio cuenta de que, de acuerdo con sus teorías, el Sol tenía que desviar la luz.

Einstein comprendió que la gravedad del astro rey sería lo bastante potente para influir sobre la trayectoria de la luz de las estrellas cercanas. Como estas solo se podían ver durante un eclipse solar, Einstein propuso que se enviara una expedición para presenciar el que tendría lugar en 1919 y así comprobar su teoría (los astrónomos debían tomar dos fotos del cielo nocturno: una con el Sol ausente y otra durante un eclipse solar. Al compararlas, la posición de las estrellas durante el eclipse se habría movido debido a la gravedad del Sol). Einstein estaba convencido de que aquello validaría su teoría. Cuando se le preguntó qué pensaría si el experimento la refutaba, dijo que Dios habría cometido un error. Estaba convencido de tener razón, escribió a sus colegas, por la magnífica belleza y simetría de las matemáticas de su teoría.

Cuando el astrónomo Arthur Eddington llevó por fin a cabo este épico experimento, se vio que había una notable concordancia entre la predicción de Einstein y el resultado real (en nuestros días, los astrónomos emplean rutinariamente la desviación de la luz de las estrellas debida a la gravedad. Cuando la luz estelar pasa cerca de una galaxia distante, la luz se desvía, como si la responsable fuera una lente. Estas «lentes» se denominan «lentes gravitatorias o de Einstein»).

Einstein recibiría el Premio Nobel en 1921.

Pronto se convirtió en una de las figuras más reconocidas del mundo, más incluso que la mayoría de las estrellas de cine y de los políticos (en 1933, asistió con Charlie Chaplin al estreno de una película. Al verse asediados por los coleccionistas de autógrafos, Einstein le preguntó a Chaplin: «¿Qué significa todo esto?», a lo que este respondió: «Nada, absolutamente nada». Luego prosiguió: «A mí me aclaman porque todo el mundo me entiende. A usted, porque no le entiende nadie»).

Desde luego, una teoría que derribaba doscientos cincuenta años de física newtoniana se enfrentó también a críticas feroces. Uno de los principales escépticos fue el profesor de Columbia Charles Lane Poor. Después de leer acerca de la relatividad, declaró, indignado: «Me siento como si me hubiese dado un paseo con Alicia por el país de las maravillas y me hubiera tomado un té con el Sombrerero Loco»<sup>[8]</sup>.

Pero Planck siempre reafirmó a Einstein, como escribiría: «Una nueva verdad científica no triunfa convenciendo a sus oponentes y haciendo que vean la luz, sino que sus oponentes terminan por morirse, y crece una nueva generación que está familiarizada con ella»<sup>[9]</sup>.

A lo largo de las décadas, la relatividad ha sido desafiada numerosas veces, pero la teoría de Einstein ha sido siempre corroborada. De hecho, como veremos en capítulos posteriores, esta ha reformulado por completo la disciplina de la física, revolucionando nuestra idea del universo, su origen y su evolución, y cambiando nuestra forma de vida.

Una manera sencilla de confirmar la teoría de Einstein es mediante el uso del sistema GPS en su teléfono móvil. Este consta de treinta y un satélites que orbitan la Tierra. En cualquier momento, su teléfono puede recibir señales de tres de ellos, cada uno de los cuales se mueve en una trayectoria y ángulo ligeramente distintos. El procesador de su teléfono móvil analiza los datos de los tres satélites y triangula su posición exacta.

El sistema GPS es tan preciso que debe tener en cuenta minúsculas correcciones debidas tanto a la relatividad especial como a la general.

Los satélites se mueven, aproximadamente, a veintisiete mil kilómetros por hora, por lo que un reloj situado en uno de ellos es algo más lento que los de la Tierra, debido a la relatividad especial, que afirma que una velocidad mayor tiene como consecuencia un tiempo más lento, el fenómeno que Einstein demostró con su experimento mental de correr más rápido que un rayo de luz. Sin embargo, como la gravedad es más débil cuanto más nos adentramos en el espacio exterior, el tiempo se acelera un poco debido a la relatividad general, que afirma que el espacio-tiempo puede deformarse por la atracción gravitatoria; cuanto más débil es esta, más rápido se mueve el tiempo. Esto significa que la relatividad especial y la general funcionan en direcciones opuestas; la primera hace que las señales se ralenticen y la segunda hace que se aceleren. Su teléfono móvil tiene en cuenta ambos efectos opuestos y le indica su ubicación con precisión. Así, sin la relatividad especial y la general funcionando en conjunto, estaría perdido.

## Newton y Einstein: polos opuestos

Einstein fue anunciado como el nuevo Newton, pero ambos tenían personalidades opuestas. El británico era un solitario, reservado hasta el punto de ser antisocial. No tenía amigos de toda la vida y era incapaz de mantener una conversación ordinaria.

El físico Jeremy Bernstein dijo una vez: «Todo aquel que tenía un contacto profundo con Einstein se quedaba con la abrumadora sensación de haber conocido a alguien de gran nobleza. Un término que se utiliza para describirlo una y otra vez era “altruista”, lo que hacía referencia a su carácter simple y amable»<sup>[10]</sup>.

Pero tanto Newton como Einstein compartían algunos rasgos esenciales. El primero era su capacidad para enfocar una tremenda energía mental. El físico británico podía olvidarse de comer y dormir durante días cuando estaba concentrado en un único problema; dejaba de hablar en mitad de una conversación y se ponía a garabatear en aquello que tuviera disponible, a veces una servilleta o la misma pared. De forma parecida, el alemán podía centrarse en un problema durante años, e incluso décadas. Llegó a estar al borde de una crisis nerviosa mientras trabajaba en la teoría general.

Otra característica que compartían era la capacidad de visualizar un problema en imágenes. Aunque Newton podría haber escrito sus *Principia* tan solo con símbolos algebraicos, llenó su obra maestra de diagramas geométricos. Utilizar el cálculo con símbolos abstractos es relativamente fácil, pero derivarlo de triángulos y cuadrados es algo que solo un maestro puede llevar a cabo. De manera similar, la teoría de Einstein está llena de diagramas, metros y relojes.

## EN BUSCA DE UNA TEORÍA UNIFICADA

Finalmente, Einstein creó dos grandes teorías. La primera fue la relatividad especial, que describía las propiedades de los rayos de luz en el espacio-tiempo e introducía una simetría basada en rotaciones en cuatro dimensiones. La segunda fue la relatividad general, en la que la gravedad se revela como la curvatura del espacio-tiempo.

Sin embargo, después de estos logros extraordinarios, trató de alcanzar un tercero, aún mayor. Quería una teoría que unificase todas las fuerzas del universo en una sola ecuación. Quería utilizar el lenguaje de la teoría de campos para crear una ecuación que combinase la teoría de la electricidad y el magnetismo de Maxwell con su propia teoría de la gravedad. Trató durante decenios de unificarlas, y en última instancia fracasó. (Michael Faraday fue, de hecho, el primero en proponer una unificación de la gravedad con el electromagnetismo; solía ir al puente de Londres y dejar caer imanes desde él, con la esperanza de encontrar algún efecto mensurable de la gravedad sobre el imán. No lo halló).

Un motivo del fracaso de Einstein fue que, en la década de 1920, nuestra comprensión del mundo sufría de un inmenso vacío. Se necesitaría progresar en una nueva teoría, la teoría cuántica, para que los físicos se diesen cuenta de que faltaba una pieza del rompecabezas: la fuerza nuclear.

Pero Einstein, a pesar de ser uno de los fundadores de la teoría cuántica, se convertiría —irónicamente— en su mayor adversario, desplegando un aluvión de críticas contra ella. Durante décadas, la teoría cuántica ha superado todos los retos experimentales, y nos ha dado una multitud fantástica de artilugios eléctricos que llenan nuestra vida y nuestros lugares de trabajo. Sin

embargo, como veremos, aún siguen resonando sutiles objeciones filosóficas contra ella.

## 3 EL AUGE DEL CUANTO

Mientras Einstein estaba desarrollando él solo esta nueva y colosal teoría basada en el espacio, el tiempo, la materia y la energía, paralelamente, en el ámbito de la física, se estaba desentrañando esta cuestión de capital importancia: ¿de qué está hecha la materia? Esto nos llevaría a la siguiente gran teoría de la física, la teoría cuántica.

Después de que Newton completase su teoría de la gravitación, llevó a cabo numerosos experimentos alquímicos tratando de entender la naturaleza de la materia. La causa de sus brotes depresivos, según se cree, eran sus experimentos con mercurio, un tóxico conocido por provocar síntomas neurológicos. Sin embargo, se sabía poco sobre las propiedades fundamentales de la materia, y poco fue lo que se aprendió del trabajo de estos antiguos alquimistas, que consumieron buena parte de su tiempo y energía intentando convertir el plomo en oro.

Habrían de pasar siglos para que se revelasen poco a poco estos secretos. En el siglo XIX, los químicos empezaron a descubrir y aislar los elementos de la naturaleza, aquellos que no podían descomponerse en algo más simple. Mientras que los asombrosos avances en física eran impulsados por la matemática, los progresos en química derivaban principalmente de tediosas horas de trabajo en un laboratorio.

En 1869, Dmitri Mendeléyev tuvo un sueño en el que todos los elementos de la naturaleza se colocaban en una tabla. Instantes después de despertarse empezó a organizar aquellos que se conocían en una tabla regular, y pudo apreciar que allí había un patrón. Del caos de la química surgieron de pronto el orden y la predictibilidad. Los cerca de sesenta elementos conocidos se podían disponer en esa simple tabla, pero había espacios vacíos, y Mendeléyev pudo predecir las propiedades de los elementos que faltaban.

Estos fueron en realidad hallados en el laboratorio, como se había predicho, lo cual supuso un reconocimiento para la reputación de Mendeléyev.

Pero ¿por qué los elementos estaban organizados en un patrón así de regular?

El siguiente avance tuvo lugar en 1898, cuando Marie y Pierre Curie aislaron una serie de elementos inestables nunca vistos antes. Aun sin ninguna fuente de energía, el radio brillaba con intensidad en el laboratorio, violando uno de los máspreciados principios de la física: la conservación de la energía (según el cual esta no puede crearse ni destruirse). La energía de la radiación del radio parecía no venir de ninguna parte. Estaba claro que se necesitaba una nueva teoría.

Hasta entonces, los químicos habían creído que los ingredientes fundamentales de la materia, los elementos, eran eternos y que aquellos como el hidrógeno o el oxígeno serían estables para siempre. Pero en sus laboratorios podían ver que elementos como el radio se descomponían en otros elementos, liberando radiación en el proceso.

También era posible calcular la velocidad en que esos elementos inestables se desintegraban, lo que podía medirse en miles e incluso miles de millones de años. Los descubrimientos de los Curie ayudaron a resolver un antiguo debate. Los geólogos, asombrados ante el extremadamente lento ritmo de formación de las rocas, comprendieron que la Tierra debía tener una edad de miles de millones de años. Pero lord Kelvin, uno de los gigantes de la física clásica de la época victoriana, calculó que una Tierra fundida se habría enfriado en cuestión de pocos millones de años. ¿Quién tenía razón?

Resultó que la tenían los geólogos. Lord Kelvin no entendía que una nueva fuerza de la naturaleza, la que habían descubierto los Curie, denominada «fuerza nuclear», pudiese sumarse al calor de la Tierra. La desintegración radiactiva podía tener lugar a lo largo de miles de millones de años, por lo que el núcleo de la Tierra podía calentarse por la desintegración del uranio, el torio y otros elementos radiactivos. Así, el enorme poder de los devastadores terremotos, los atronadores volcanes y la lenta fricción de la deriva continental tienen su origen en la fuerza nuclear.

En 1910, Ernest Rutherford introdujo un trozo de resplandeciente radio en una caja de plomo con un minúsculo orificio, y apuntó el pequeñísimo haz de radiación que salía de esta a una delgada lámina de oro. Esperaba que los átomos de oro absorbiesen la radiación. Para su sorpresa, observó que el haz procedente del radio atravesaba la lámina, como si esta no existiera.

Fue un resultado increíble: significaba que los átomos se componían principalmente de espacio vacío. A veces hacemos esta demostración a los estudiantes. Ponemos un trozo inocuo de uranio en su mano y un contador Geiger, que detecta la radiación, debajo de ella. Los estudiantes se asombran al oír las pulsaciones del aparato, porque su cuerpo está hueco.

A principios del siglo xx, la imagen estándar del átomo era la del pudín con pasas; es decir, el átomo era como un bizcocho de carga positiva, con electrones —las pasas— esparcidos en su interior. Poco a poco, empezó a surgir una imagen del átomo radicalmente nueva, según la cual este estaba básicamente vacío, y consistía en un enjambre de electrones que daba vueltas alrededor de un minúsculo y denso centro llamado «núcleo». El experimento de Rutherford contribuyó a probar este modelo, porque su haz radiactivo a veces era desviado por las comprimidas partículas del núcleo. Analizando el número, la frecuencia y los ángulos de desviación, pudo calcular el tamaño del núcleo del átomo: era cien mil veces menor que la partícula en sí.

Más adelante, los científicos determinaron que el núcleo estaba, a su vez, compuesto por partículas subatómicas aún menores: protones (que tenían carga positiva) y neutrones (que no tenían carga alguna). Parecía que toda la tabla de Mendeléyev podía crearse utilizando únicamente tres partículas subatómicas: el electrón, el protón y el neutrón. Pero ¿a qué ecuación obedecían estas partículas?

## LA REVOLUCIÓN CUÁNTICA

Mientras tanto, se estaba gestando una nueva teoría capaz de explicar todos estos misteriosos descubrimientos. Una teoría revolucionaria que acabaría por desafiar todo cuanto sabíamos acerca del universo y que se denominó «mecánica cuántica». Pero ¿qué es el cuánto y por qué es tan importante?

El cuánto nació en 1900, cuando el físico alemán Max Planck se hizo una simple pregunta: ¿por qué brillan los objetos calientes? Cuando los humanos dominaron el fuego, miles de años atrás, observaron que los objetos calientes relucían con determinados colores. Hacía siglos que los alfareros sabían que, cuando un material alcanza temperaturas de miles de grados, este cambia de color, y pasa del rojo al amarillo y luego al azul (puede verlo usted mismo

con solo encender una cerilla o una vela. En la parte inferior es donde la llama es más caliente, y su color puede ser azulado. En el centro es amarillento y, en la parte superior, más fría, la llama es rojiza).

Pero cuando los físicos intentaron calcular este efecto (llamado «radiación del cuerpo negro») aplicando los trabajos de Newton y Maxwell a los átomos, se toparon con un problema. (Un «cuerpo negro» es un objeto que absorbe por completo toda la radiación que le llega, y se llama «negro» porque este color absorbe toda la luz). Según Newton, a medida que los átomos se calientan, vibran con más rapidez. Y, de acuerdo con Maxwell, las cargas que vibran pueden, a su vez, emitir radiación electromagnética en forma de luz. Sin embargo, cuando calcularon la radiación emitida por la vibración de los átomos calientes, el resultado no respondió a sus expectativas. A bajas frecuencias, este modelo se ajusta bastante bien a los datos. Pero, a altas frecuencias, la energía de la luz acaba por ser infinita, un resultado ridículo. Para un físico, el infinito es una señal de que las ecuaciones no funcionan, de que no pueden describir lo que sucede.

Max Planck planteó entonces una ingenua hipótesis. Supuso que la energía, en lugar de ser continua y homogénea, como afirmaba la teoría de Newton, se generaba, en realidad, en paquetes individuales a los que llamó «cuantos». Al ajustarla, halló que podía reproducir con precisión la energía que radiaban los objetos calientes. Cuanto más caliente era el objeto, más alta era la frecuencia de la radiación, lo que se correspondía con diferentes colores del espectro de la luz.

Por esto una llama cambia de rojo a azul a medida que se incrementa la temperatura. Es también la forma en que sabemos cuál es la temperatura del Sol. La primera vez que alguien escucha que la superficie del Sol está a unos cinco mil grados Celsius, podría preguntarse: ¿cómo lo sabemos? Nadie ha ido nunca al Sol con un termómetro. Pero conocemos este dato por la longitud de onda de la luz que emite.

Planck calculó entonces el tamaño de estos paquetes de energía lumínica, o cuantos, y los midió en términos de una pequeña constante  $h$ , la constante de Planck, que es  $6,6 \times 10^{-34}$  julios por segundo (el físico alemán halló esta cifra ajustando la energía de estos paquetes a mano, hasta adaptarla del todo a los datos).

Si disminuimos poco a poco el valor de la constante de Planck hasta llegar a cero, todas las ecuaciones de la teoría cuántica se reducen a las que Newton propuso (lo que quiere decir que el extraño comportamiento de las partículas subatómicas, que contraviene con frecuencia el sentido común, se reduce

gradualmente a las conocidas leyes del movimiento de Newton, al igualar a mano la constante de Planck a cero). Por eso rara vez vemos efectos cuánticos en la vida cotidiana. Para nosotros, el mundo es newtoniano porque la constante de Planck es un número muy pequeño y solo afecta al universo en el nivel subatómico.

Estos reducidos efectos cuánticos se denominan «correcciones cuánticas», y hay físicos que se pasan la vida entera tratando de calcularlas. En 1905, el mismo año en que Einstein descubrió la relatividad especial, también aplicó la teoría cuántica a la luz y demostró que esta no solo es una onda, sino que se comporta como un paquete de energía, o una partícula, que se denominó «fotón». Así, la luz parecía tener dos caras: una como onda, como había predicho Maxwell, y otra como partícula o fotón, como habían predicho Planck y Einstein. Una nueva concepción de la luz estaba haciendo acto de presencia. La luz estaba hecha de fotones, que son cuantos, o partículas, pero cada fotón creaba campos a su alrededor (los campos eléctrico y magnético). Estos, a su vez, tenían forma de ondas y cumplían las ecuaciones de Maxwell. Así, ahora tenemos una bella relación entre las partículas y los campos que las rodean.

Si la luz tenía dos caras, una como partícula y otra como onda, ¿también el electrón tenía esta extravagante dualidad? Era el siguiente paso lógico, y su efecto sería tan profundo que haría temblar el mundo de la física moderna y la propia civilización.

## ONDAS DE ELECTRÓNES

Para su sorpresa, los físicos observaron, a continuación, que los electrones, antes considerados partículas duras y casi puntuales, podían actuar también como ondas. Para comprobarlo, sitúe dos hojas de papel en paralelo, una detrás de la otra. Luego corte dos ranuras en la primera y dispare un haz de electrones hacia ella. Normalmente, uno esperaría ver dos manchas en la segunda hoja, donde los electrones impactan. O bien el haz de electrones pasa por la primera ranura, o bien por la segunda, pero no por ambas. Es puro sentido común.

Sin embargo, al llevar a cabo el experimento, el patrón de puntos en la segunda hoja de papel parece estar dispuesto en una banda de líneas verticales, un fenómeno que ocurre cuando las ondas interfieren entre sí (la próxima vez que tome un baño, chapotee suavemente en dos lugares de la superficie al mismo tiempo, y verá aparecer este patrón, parecido a una red de telarañas).

Pero esto significa que, en cierto sentido, los electrones pasan por ambas ranuras a la vez. Esta fue la paradoja: ¿cómo podía una partícula puntual, el electrón, interferir con ella misma, como si hubiese pasado por dos ranuras distintas? Asimismo, otros experimentos con electrones mostraban que estos se desvanecían y volvían a aparecer en otro lugar, algo imposible en un mundo newtoniano. Si la constante de Planck fuese considerablemente mayor, y afectase por tanto a objetos a escala humana, el mundo sería un lugar muy extraño e irreconocible. Los objetos podrían desaparecer y reaparecer en un lugar distinto, así como estar en dos lugares al mismo tiempo.

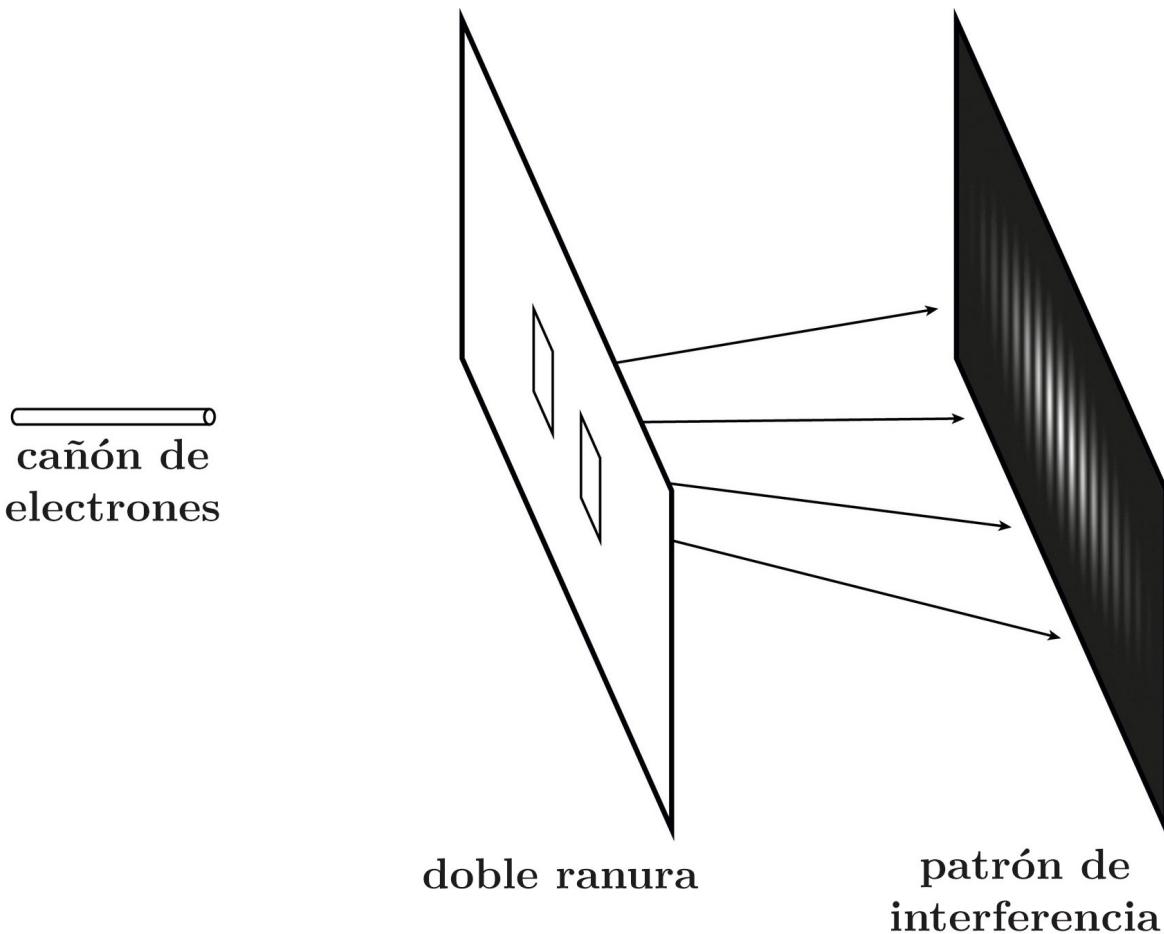


FIGURA 7. Los electrones que pasan a través de una doble ranura se comportan como una onda; es decir, interfieren entre sí en el otro lado, como si pasaran por dos ranuras simultáneamente, algo imposible en la física newtoniana, pero que constituye la base de la mecánica cuántica.

Por muy improbable que pareciese la teoría cuántica, empezó a tener un éxito espectacular. En 1925, el físico austriaco Erwin Schrödinger escribió su célebre ecuación que describía con precisión el movimiento de estas ondas de partículas. Al aplicarla al átomo de hidrógeno, con un solo electrón orbitando un protón, se ajustaba notablemente a los experimentos. Los niveles electrónicos hallados en el átomo de Schrödinger coincidían a la perfección con los resultados experimentales. De hecho, toda la tabla de Mendeléyev podía, en principio, explicarse como una solución de la ecuación de Schrödinger.

### EXPLICAR LA TABLA PERIÓDICA

Uno de los logros más impresionantes de la mecánica cuántica es su capacidad para explicar el comportamiento de los elementos de la materia, los átomos y las moléculas. Según Schrödinger, el electrón es una onda que rodea el minúsculo núcleo. En la figura 8 vemos cómo solo las ondas con unas longitudes discretas pueden orbitar alrededor del núcleo. Las ondas con un número entero como longitud se adaptan bien, pero las demás no envuelven bien el núcleo; son inestables y no pueden formar átomos estables, lo que se traduce en que los electrones solo se pueden mover en niveles diferenciados.

A medida que nos alejamos del núcleo, este patrón básico se repite; con el incremento del número de electrones, el anillo exterior se aleja del centro. Hay más electrones cuanto más nos alejamos. Esto explica, a su vez, por qué la tabla de Mendeléyev contiene niveles discretos regulares que se repiten, cada uno de los cuales imita el comportamiento de la capa inferior.

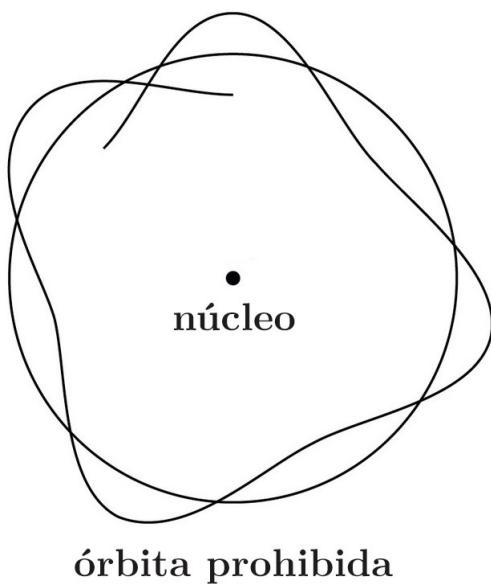
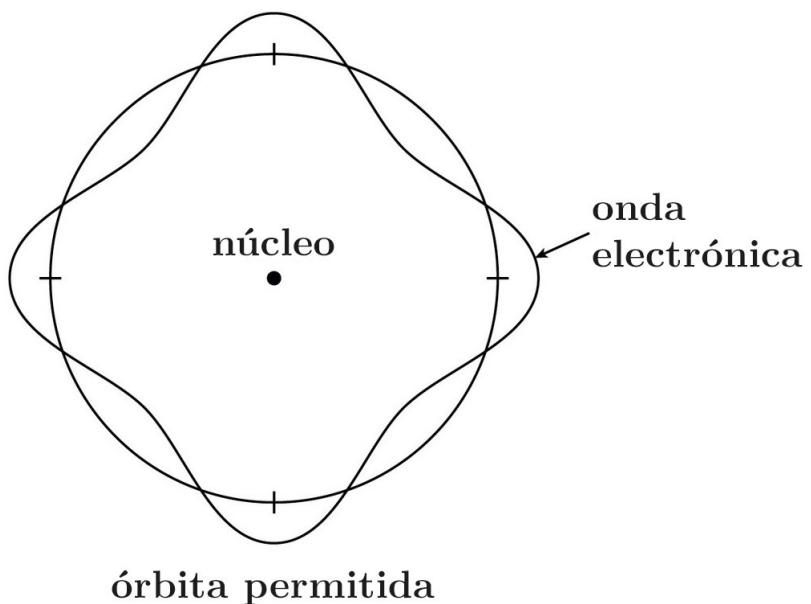


FIGURA 8. Solo los electrones de una longitud de onda determinada se ajustan al interior de un átomo; es decir, la órbita debe ser un número entero múltiplo de la longitud de onda del electrón. Esto fuerza a las ondas electrónicas a formar niveles discretos alrededor del núcleo. Un análisis detallado de la forma en que los electrones se sitúan en ellos puede ayudar a explicar la tabla periódica de Mendeléyev.

Este efecto se puede percibir cuando cantamos en la ducha. Solo ciertas frecuencias, o longitudes de onda, rebotan en las paredes y se amplifican, mientras que las que no se ajustan quedan anuladas, de forma similar a como las ondas de los electrones dan vueltas al núcleo de un átomo: solo funcionan determinadas frecuencias.

Este avance cambió de manera fundamental el rumbo de la ciencia. Un año, los físicos eran completamente incapaces de describir el átomo, y, al siguiente, con la ecuación de Schrödinger, podían calcular las propiedades

dentro del propio átomo. A veces imparto mecánica cuántica a estudiantes de posgrado, y trato de hacerles comprender el hecho de que todo a su alrededor puede, en cierto sentido, expresarse como solución de esta ecuación. Les digo que esta no solo puede explicar los átomos, sino también los enlaces que crean para formar moléculas y, de ahí, las sustancias químicas de las que se compone todo nuestro universo.

Pero no importa lo sólida que fuese la ecuación de Schrödinger, pues seguía teniendo una limitación: solo funcionaba para velocidades reducidas, esto es, era no relativista. No decía nada acerca de la velocidad de la luz, la relatividad especial y la interacción de los electrones con la luz a través de las ecuaciones de Maxwell. También carecía de la bella simetría de la teoría de Einstein, por lo que era bastante fea y difícil de manejar desde un punto de vista matemático.

## LA TEORÍA DEL ELECTRÓN DE DIRAC

Entonces, un físico de veintidós años, Paul Dirac, decidió escribir una ecuación de onda que cumplía la relatividad especial de Einstein unificando espacio y tiempo. Uno de los aspectos poco elegantes de la ecuación de Schrödinger era que trataba ambos factores por separado y, por tanto, los cálculos eran con frecuencia tediosos y se tardaba mucho tiempo en realizarlos. Pero la teoría de Dirac combinaba tiempo y espacio, y tenía simetría tetradimensional, así que era bella, compacta y elegante. Los feos términos de la ecuación de Schrödinger original no funcionaban en una simple ecuación de cuatro dimensiones.

(Recuerdo estar en el instituto, intentando aprenderme la ecuación de Schrödinger desesperadamente, y que me costaba por los términos feos que contenía. ¿Cómo podía ser tan maliciosa la naturaleza, pensaba yo, para crear una ecuación de onda tan burda? Entonces, un día me tropecé con la ecuación de Dirac, bella y compacta. Recuerdo que lloré cuando la vi).

La ecuación de Dirac tuvo un éxito espectacular. Hemos visto cómo Faraday había demostrado que un campo eléctrico variable en una bobina producía un campo magnético, pero ¿de dónde venía el de un imán de barra, sin carga móvil alguna? Parecía un completo misterio. No obstante, las

ecuaciones de Dirac predecían que el electrón tenía un espín que creaba su propio campo magnético. Esta propiedad estaba, desde el principio, imbricada en las matemáticas. El campo magnético creado por el espín coincide exactamente con el campo descubierto alrededor de los electrones. Esto, a su vez, ayudaba a explicar el origen del magnetismo. Así pues, ¿de dónde viene el campo magnético de un imán? Del espín de los electrones atrapados dentro del metal. Más tarde se descubrió que todas las partículas subatómicas tienen espín. En un capítulo posterior volveremos a este importante concepto.

Y algo aún más importante: la ecuación de Dirac predecía una inesperada nueva forma de materia, la denominada «antimateria». Esta obedece a las mismas leyes que la materia ordinaria, pero tiene una carga opuesta. Así, el antielectrón, llamado «positrón», tiene una carga positiva, no negativa. En principio, sería posible crear antiátomos, que estarían compuestos por antielectrones orbitando alrededor de antiprotones y antineutrones. Pero cuando la materia y la antimateria colisionan, generan un estallido de energía. (La antimateria se convertirá en un ingrediente crucial para la teoría del todo, porque, en la teoría definitiva, todas las partículas deberán tener una homóloga de antimateria).

Antes, los físicos consideraban que la simetría era estéticamente agradable, pero no la consideraban un aspecto esencial de cualquier teoría. Después de esto, estaban atónitos ante el poder de la simetría, que podía predecir de veras fenómenos físicos completamente nuevos e inesperados (como la antimateria y el espín del electrón). Los físicos estaban empezando a comprender que la simetría era un rasgo esencial e ineludible del universo en un nivel fundamental.

## ¿QUÉ ES LO QUE ONDULA?

Pero aún quedaban algunas cuestiones molestas. Si el electrón tenía propiedades de onda, ¿qué era lo que perturbaba el medio en el que se encontraba esta? ¿Qué era lo que ondulaba? Y ¿cómo podía pasar por dos

orificios distintos simultáneamente? ¿Cómo podía un electrón estar en dos lugares al mismo tiempo?

La respuesta era sorprendente e increíble, y dividió en dos facciones a la comunidad física. Según un artículo publicado por Max Born en 1926, lo que ondulaba era la probabilidad de encontrar un electrón en un punto determinado. En otras palabras, no era posible saber con precisión y certeza dónde estaba un electrón, sino solo la probabilidad de encontrarlo. Esto quedó plasmado en el célebre principio de incertidumbre de Werner Heisenberg, que afirmaba que no era posible conocer con precisión la velocidad y la ubicación de un electrón. Dicho de otra forma, los electrones son partículas, pero la probabilidad de encontrarlas en una ubicación cualquiera viene dada por una función de onda.

Esta idea fue un bombazo. Significaba que no se podía predecir el futuro con precisión, sino solo las probabilidades de que sucediesen ciertas cosas. Pero los éxitos de la teoría cuántica eran innegables. Einstein escribió que «cuanto más exitosa se hace la teoría cuántica, más tonta parece». Incluso Schrödinger, que había introducido el concepto de «onda electrónica», rechazaba la interpretación probabilística de sus propias ecuaciones. Aún hoy los físicos discuten sobre las implicaciones filosóficas de la teoría ondulatoria. ¿Cómo se puede estar en dos lugares al mismo tiempo? El premio Nobel Richard Feynman dijo una vez: «Creo que puedo decir, sin temor a equivocarme, que nadie entiende la mecánica cuántica»<sup>[1]</sup>.

Desde los tiempos de Newton, los físicos creían en algo denominado «determinismo», la filosofía según la cual es posible predecir con precisión todos los acontecimientos futuros. Las leyes de la naturaleza determinan el movimiento de todo lo que hay en el universo, lo que lo hace ordenado y predecible. Para Newton, el cosmos entero era un reloj que hacía tic tac de una forma precisa y predecible. Si se conocía la ubicación y la velocidad de todas las partículas del universo, era posible deducir todos los acontecimientos futuros.

Predecir el mañana ha sido siempre, por supuesto, una de las obsesiones de los mortales. En *Macbeth*, Shakespeare escribía:

*Si les es permitido penetrar en el porvenir,  
en los gérmenes del tiempo,  
y decir cuál es la semilla que ha de crecer y cuál no,  
diríjanse a mí.*

Según la física newtoniana, es posible predecir qué semilla crecerá y cuál no. Durante muchos siglos, este fue el punto de vista dominante entre los físicos, de modo que la incertidumbre era una herejía, y fue una sacudida radical para la física moderna.

## CHOQUE DE TITANES

**E**n un lado de este debate se hallaban Einstein y Schrödinger, que fueron los primeros en dar inicio a la revolución cuántica. En el otro estaban Niels Bohr y Werner Heisenberg, creadores de la nueva teoría cuántica. El momento culminante fue la histórica sexta conferencia Solvay, celebrada en 1930 en Bruselas. Fue un debate trascendental, en el que los gigantes de la física se enfrentaron en una batalla por el significado de la propia realidad.

Paul Ehrenfest escribiría: «Nunca olvidaré ver a los dos rivales saliendo del club de la universidad. Einstein, una figura majestática, caminando con calma y una sutil sonrisa irónica, y Bohr trotando a su lado, extremadamente alterado»<sup>[2]</sup>. Se oía al danés por los pasillos, musitando, abatido, una sola palabra: «Einstein... Einstein... Einstein».

El alemán encabezó la carga, planteando una objeción tras otra a la teoría cuántica, tratando de poner al descubierto hasta qué punto era absurda. Pero Bohr rebatió satisfactoriamente las críticas de Einstein, una por una. Se cuenta que este repetía que Dios no deja nada al azar en el universo, a lo que Bohr respondió: «Deje de decirle a Dios lo que tiene que hacer».

El físico de Princeton John Wheeler comentó al respecto: «Fue el mayor debate del que yo tenga noticia en la historia intelectual. En treinta años, nunca supe de un debate entre dos hombres más grandes, durante tanto tiempo, sobre una cuestión tan profunda y con tan profundas consecuencias en la comprensión de este extraño mundo»<sup>[3]</sup>.

Según los historiadores, Bohr y los rebeldes del cuanto salieron mayoritariamente vencedores en el debate.

No obstante, Einstein logró mostrar las grietas en los cimientos de la mecánica cuántica. Demostró que era un gigante con los pies de barro. Estas críticas aún se escuchan hoy, y todas ellas giran alrededor de cierto gato.

## EL GATO DE SCHRÖDINGER

**E**l austriaco ideó un simple experimento mental que ponía al descubierto la esencia del problema. Meta un gato en una caja hermética y ponga un trozo de uranio dentro. Cuando este deja escapar una partícula subatómica, un contador Geiger la detecta y activa un mecanismo que dispara una bala al gato. La pregunta es: el gato ¿está vivo o muerto?

El hecho de que el átomo de uranio deje escapar una partícula subatómica es un acontecimiento puramente cuántico, con lo cual esto se traduce en que el gato debe describirse en términos de mecánica cuántica. Para Heisenberg, antes de abrir la caja, el animal existe como mezcla de diferentes estados cuánticos; esto es, el gato es la suma de dos ondas: una describe un gato muerto y la otra, uno vivo. El gato no está ni muerto ni vivo, sino que es una mezcla de los dos. La única forma de determinar si el gato está muerto o vivo es abrir la caja y hacer una observación; la función de onda cae entonces hacia un gato muerto o hacia un gato vivo. En otras palabras, la observación (que requiere conciencia) determina la existencia.

Einstein pensaba que todo aquello era descabellado. Se parecía a la filosofía del obispo Berkeley, que se preguntaba: si un árbol cae en el bosque y no hay nadie para oírlo, ¿hace ruido? Los solipsistas dirían que no. Pero la teoría cuántica era aún peor: decía que, si hay un árbol en el bosque y no hay nadie cerca, el árbol existe como suma de muchos estados diferentes; por ejemplo, un árbol quemado, un árbol joven, leña, madera contrachapada, etcétera. Solo al mirar el árbol cede mágicamente su onda hacia un árbol ordinario.

Cuando alguien visitaba a Einstein en su casa, este les preguntaba: «¿Existe la luna porque un ratón la mira?». Pero, por mucho que la teoría cuántica violase el sentido común, algo había de verdad en ella: era experimentalmente correcta. Sus predicciones han sido corroboradas con hasta once decimales, lo que la convierte en la teoría más precisa de todos los tiempos.

Einstein admitiría, sin embargo, que la teoría cuántica contenía al menos una parte de verdad. En 1929, incluso recomendó a Schrödinger y Heisenberg para el Premio Nobel de Física.

Ni siquiera en nuestros días hay un consenso universal entre los físicos acerca del problema del gato (la antigua interpretación de Copenhague de Niels Bohr, que el verdadero gato surge tan solo porque la observación

provoca la onda del animal, ha caído en desgracia, en parte porque la nanotecnología nos permite ahora manipular átomos individuales y llevar a cabo estos experimentos. La interpretación que se ha popularizado es la del multiverso, o muchos mundos, en la que el universo se divide en dos: una de las mitades contiene un gato muerto y la otra, uno vivo).

Con el éxito de la teoría cuántica, los físicos de la década de 1930 volvieron su atención a un nuevo objetivo, la antigua pregunta: ¿por qué brilla el Sol?<sup>[4]</sup>.

## LA ENERGÍA DEL SOL

Desde tiempo inmemorial, las grandes religiones del mundo han alabado al astro rey, situándolo en el centro mismo de su mitología. El Sol era uno de los dioses más poderosos que gobernaban los cielos. Para los griegos, era Helios, que guiaba majestuosamente su carro en llamas por el firmamento cada día, iluminando el mundo y dándole vida. También los aztecas, los egipcios y los hindúes tenían su propia versión del dios Sol.

No obstante, durante el Renacimiento, algunos científicos trataron de examinar el Sol desde la perspectiva de la física. Si este estuviese hecho de madera y aceite, su combustible se habría consumido hace mucho tiempo. Y si en las vastas extensiones del espacio exterior no hay aire, las llamas solares tendrían que haberse apagado hace mucho tiempo. De modo que la energía eterna del Sol era un misterio.

En 1842 se planteó a los científicos del mundo un gran desafío. El filósofo francés Auguste Comte, fundador de la filosofía del positivismo, declaró que la ciencia era verdaderamente poderosa y que podía revelar muchos de los secretos del universo, pero que había algo que quedaría siempre más allá de su alcance, una pregunta a la que ni siquiera los más grandes científicos podrían dar respuesta: ¿de qué están hechos los planetas y el Sol?

Era un reto razonable, ya que la piedra angular de la ciencia es la verificabilidad. Todos los descubrimientos científicos deben ser reproducibles y comprobables en el laboratorio, pero estaba claro que era imposible recoger material solar en un frasco y traerlo a la Tierra. Por tanto, esta respuesta estaría siempre fuera de nuestro alcance.

Irónicamente, unos años después de que Comte hiciera esta afirmación en su libro *Curso de filosofía positiva*, los físicos resolvieron el desafío: el Sol era, en esencia, hidrógeno.

Comte había cometido un ligero, pero crucial, error. Sí, la ciencia siempre debe ser verificable, pero, como ya hemos establecido, la mayor parte se lleva a cabo de forma indirecta.

Joseph von Fraunhofer, un científico del siglo XIX, respondió a Comte diseñando los espectrógrafos más precisos de su época. (En estos aparatos, las sustancias se calientan hasta que empiezan a brillar con la radiación del cuerpo negro. La luz se hace pasar entonces por un prisma, que crea un arcoíris. La franja de colores contiene bandas oscuras, que se crean porque los electrones hacen saltos cuánticos de órbita a órbita, liberando y absorbiendo cantidades específicas de energía. Cada elemento crea sus propias bandas características, por lo que cada bandapectral es como una huella dactilar, lo que permite determinar de qué está hecha una sustancia. Los espectrógrafos han resuelto también numerosos delitos graves, al permitir identificar de dónde procedía la tierra de la huella de un criminal, la naturaleza de las toxinas de un veneno o el origen de fibras o pelos microscópicos. Estos aparatos permiten recrear el escenario de un crimen al determinar la composición química de todos los elementos presentes).

Al analizar las bandas de la luz del Sol, Fraunhofer y otros pudieron afirmar que este estaba compuesto, en esencia, de hidrógeno. (Curiosamente, los físicos también hallaron una nueva sustancia desconocida en el astro rey, a la que llamaron «helio», que significa «metal del Sol». De manera que este elemento se encontró en el Sol antes que en la Tierra. Posteriormente, los científicos se dieron cuenta de que el helio era un gas, no un metal).

Pero Fraunhofer hizo otro importante descubrimiento. Al analizar la luz de las estrellas, observó que estas estaban compuestas de las mismas sustancias halladas comúnmente en la Tierra. Fue un descubrimiento trascendental, ya que indicaba que las leyes de la física eran las mismas no solo en el sistema solar, sino en todo el universo.

Cuando las teorías de Einstein cobraron impulso, físicos como Hans Bethe lo unieron todo para determinar qué es lo que alimenta el Sol. Si está hecho de hidrógeno, su inmenso campo gravitatorio puede comprimirlo hasta fusionar los protones, creando helio y elementos más pesados. El helio pesa un poco menos que los protones y neutrones que se combinan para formarlo, lo cual significa que la masa que falta se ha convertido en energía, a través de la fórmula de Einstein  $E = mc^2$ .

## LA MECÁNICA CUÁNTICA Y LA GUERRA

Mientras los físicos debatían las alucinantes paradojas de la teoría cuántica, nubes de guerra se arremolinaban en el horizonte. Adolf Hitler llegó al poder en Alemania en 1933, y los físicos se vieron forzados a huir del país en oleadas, fueron arrestados o algo peor.

Un día, Schrödinger presenció cómo unos camisas pardas atormentaban a los inocentes transeúntes y tenderos judíos. Cuando intentó detenerlos, se volvieron contra él y empezaron a golpearlo. Finalmente se detuvieron cuando uno de los nazis reconoció a la persona a la que agredían como un galardonado con el Premio Nobel de Física. Agitado, Schrödinger pronto abandonaría Austria. Alarmados por los informes de represión diarios, los mejores y más brillantes científicos alemanes dejaron el país.

Planck, el padre de la teoría cuántica y siempre tan diplomático, llegó a suplicar personalmente a Hitler que detuviera el éxodo masivo de científicos alemanes, que estaba dejando al país sin sus mejores cerebros. Pero el Führer se limitó a responder a gritos a Planck, denunciando a los judíos. Poco después, este escribiría que «era imposible hablar con un hombre así» (por desgracia, el hijo de Planck intentó asesinar a Hitler, por lo que fue brutalmente torturado y, después, ejecutado).

Durante décadas, se le preguntó a Einstein si su ecuación podía liberar la fabulosa cantidad de energía encerrada en el interior del átomo. Y este siempre contestó que no, que la energía liberada por un átomo era demasiado reducida para tener un uso práctico.

Hitler, no obstante, quería utilizar la superioridad científica de Alemania para crear armas con un poder nunca visto, instrumentos de terror, como los misiles V-1 y V-2 y la bomba atómica. Después de todo, si el Sol estaba impulsado por la energía nuclear, quizás era posible crear una superarma utilizando la misma fuente de energía.

La idea clave sobre cómo sacar provecho de la ecuación de Einstein vino del húngaro Leó Szilárd. Los físicos alemanes habían demostrado que, al lanzar neutrones contra el átomo de uranio, este podía dividirse en dos y liberar más neutrones. La energía emitida por la partición de un único átomo de uranio era extremadamente pequeña, pero Szilárd descubrió que podía amplificar esta potencia mediante una reacción en cadena: romper un átomo de uranio liberaba dos neutrones, que podían a su vez fisionar dos átomos de uranio más, liberando cuatro neutrones. Esto nos daría ocho neutrones,

dieciséis, treinta y dos, sesenta y cuatro, etcétera; es decir, un incremento exponencial en el número de átomos de uranio divididos, creando finalmente bastante energía como para demoler una ciudad entera.

De pronto, las arcanas discusiones que dividieron a los físicos en la conferencia Solvay se convirtieron en una cuestión de vida o muerte que ponía en juego el destino de poblaciones, naciones y civilizaciones enteras.

Einstein se quedó horrorizado cuando se enteró de que, en Bohemia, los nazis estaban cerrando las minas de pechblenda, que contiene uranio. Aun siendo pacifista, se sintió obligado a escribir una aciaga carta al presidente Franklin Roosevelt, instando a Estados Unidos a construir una bomba atómica. Este autorizó entonces el mayor proyecto científico de la historia, el Proyecto Manhattan.

En Alemania, Werner Heisenberg, probablemente el físico cuántico más destacado del planeta, fue nombrado jefe del proyecto nazi para la construcción de la bomba atómica. Según ciertos historiadores, era tan grande el temor de que Heisenberg superase a los Aliados en esta empresa que la OSS, precursora de la CIA, ideó un plan para asesinarlo. En 1944 se asignó la tarea a un antiguo receptor del equipo de béisbol de los Brooklyn Dodgers, Moe Berg. Este asistió a una charla que dio Heisenberg en Zúrich con órdenes de matar al físico si pensaba que el trabajo de crear la bomba alemana estaba cerca de ser completado (esta historia se cuenta por extenso en el libro de Nicholas Dawidoff *The Catcher Was a Spy*).

Por suerte, el proyecto nazi iba considerablemente más retrasado que el de los Aliados. Estaba infrafinanciado, sufría demoras de forma sistemática y su base estaba siendo bombardeada por los rivales. Y, lo más importante, Heisenberg aún no había resuelto un problema crucial en la elaboración de la bomba: determinar la cantidad de uranio o plutonio enriquecidos que iba a ser necesaria para crear una reacción en cadena, la denominada «masa crítica» (la cantidad real es de unos nueve kilos de uranio-235, que pueden sostenerse en la palma de la mano).

Después de la guerra, el mundo comenzó a tomar conciencia de que las arcanas y recónditas ecuaciones de la teoría cuántica no solo albergan la clave de la física atómica, sino quizá el propio destino de la raza humana.

Los físicos, sin embargo, empezaron a volver lentamente a la cuestión que los había desconcertado antes de la guerra: cómo crear una teoría cuántica completa de la materia.

## 4 LA TEORÍA DE CASI TODO

■ espués de la guerra, Einstein, la sobresaliente figura que había desvelado la relación cósmica entre la materia y la energía y había descubierto el secreto de las estrellas, se encontró solo y aislado.

Casi todos los avances recientes de la física habían tenido lugar siguiendo la teoría cuántica, no la teoría del campo unificado. De hecho, Einstein lamentaba que otros físicos lo vieran como una reliquia. La mayor parte de ellos consideraban que su objetivo de hallar una teoría del campo unificado era demasiado difícil, sobre todo cuando la fuerza nuclear seguía siendo un completo misterio.

Einstein comentaba: «Generalmente se me percibe como una especie de objeto petrificado, al que la edad ha dejado ciego y sordo. Esta imagen no me desagrada del todo, ya que se corresponde bastante bien con mi temperamento».

En el pasado, un principio fundamental había guiado la obra del alemán. En relatividad especial, su teoría debía permanecer igual al intercambiar  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y  $T$ . En relatividad general, este era el principio de equivalencia, que la gravedad y la aceleración podían ser iguales. Pero en su búsqueda por la teoría del todo, Einstein fue incapaz de encontrar un principio rector. Incluso hoy, cuando repaso sus cuadernos y sus cálculos, encuentro muchas ideas, pero ningún principio rector. Él mismo se dio cuenta de que aquello iba a condonar al fracaso su búsqueda definitiva, y en una ocasión observó con tristeza: «Creo que, a fin de lograr un verdadero progreso, se debe desentrañar de nuevo algún principio general de la naturaleza».

Nunca lo encontró. Una vez, Einstein dijo valerosamente que «Dios era sutil, pero no malicioso». En sus últimos años, se frustró y llegó a una conclusión: «Me lo he pensado mejor. Quizá Dios sí sea malicioso».

Aunque la mayor parte de físicos hacían caso omiso de la búsqueda de una teoría del campo unificado, de vez en cuando alguien probó suerte y trató de crear una.

Incluso Erwin Schrödinger lo intentó. Modestamente, le escribió a Einstein: «Usted intenta cazar al león, mientras que yo hablo de conejos»<sup>[1]</sup>. Sin embargo, en 1947, el austriaco convocó una conferencia de prensa para anunciar su versión de la teoría del campo unificado. Asistió incluso el primer ministro de Irlanda, Éamon de Valera. Schrödinger confesó: «Creo que tengo razón. Si no la tengo, voy a parecer un verdadero idiota»<sup>[2]</sup>. Einstein le diría más tarde que él también había evaluado su teoría y era incorrecta. Además, esta no podía explicar la naturaleza de los electrones ni la del átomo.

A Werner Heisenberg y Wolfgang Pauli también les picó el gusanillo, y propusieron su versión de la teoría del campo unificado. El austriaco era el mayor cínico de la física, y crítico del programa de Einstein. Era famosa su frase: «Lo que Dios ha partido en pedazos, que ningún hombre lo recomponga»; esto es, si Dios había dividido las fuerzas del universo, ¿quiénes éramos nosotros para tratar de unirlas de nuevo?

En 1958, Pauli dio una charla en la Universidad de Columbia para explicar la teoría del campo unificado de Heisenberg-Pauli. Bohr estaba entre el público y, tras la charla, se puso de pie y dijo: «Los de las filas de atrás estamos convencidos de que su teoría es una locura. No nos ponemos de acuerdo en si su teoría es lo bastante loca»<sup>[3]</sup>.

Con esto se inició una acalorada discusión, en la que Pauli afirmaba que su teoría era lo bastante loca como para ser cierta, mientras que otros decían que no lo era. El físico Jeremy Bernstein, que estaba entre el público, recordaba: «Fue un encuentro extraño de dos gigantes de la física moderna. Yo no dejaba de preguntarme qué pensaría un asistente que no fuera físico»<sup>[4]</sup>.

Bohr tenía razón; tiempo después, se demostró que la teoría presentada por Pauli era incorrecta.

Pero, de hecho, el danés se había tropezado con algo importante. Einstein y sus colaboradores ya habían probado todas las teorías sencillas y obvias, y todas habían fracasado. Por tanto, la verdadera teoría del campo unificado debía ser radicalmente diferente de todos los enfoques anteriores, debía ser «lo bastante loca» como para cumplir los requisitos de una verdadera teoría del todo.

## QED

**E**l verdadero progreso en la época de posguerra se llevó a cabo en el desarrollo de una teoría cuántica completa de la luz y los electrones, llamada «electrodinámica cuántica», o QED (por sus siglas en inglés). El objetivo era combinar la teoría del electrón de Dirac con la teoría de la luz de Maxwell, creando así una nueva que obedeciese a la mecánica cuántica y a la relatividad especial (no obstante, se consideraba que una teoría que combinase los electrones de Dirac con la relatividad general era demasiado compleja).

En 1930, Robert Oppenheimer (que más adelante dirigiría el proyecto para construir la bomba atómica) descubrió algo profundamente perturbador. Si se trataba de describir la teoría cuántica de un electrón interactuando con un fotón, se hallaba que las correcciones cuánticas divergían, y se obtenían resultados infinitos, que eran inútiles. Se suponía que las correcciones cuánticas eran reducidas, al menos ese había sido el principio rector durante décadas. Así, había un error esencial en la simple combinación de la ecuación de Dirac de los electrones y la teoría de los fotones de Maxwell. Este problema obsesionó a los físicos durante casi dos décadas. Muchos trabajaron en él, pero los progresos fueron escasos.

Por fin, en 1949, tres jóvenes físicos que trabajaban de forma independiente, Richard Feynman y Julian Schwinger en Estados Unidos y Shin'ichiro Tomonaga en Japón, resolvieron este antiguo problema.

Su éxito fue espectacular, y lograron calcular incógnitas como las propiedades magnéticas del electrón con una precisión fabulosa. Pero la forma en que lo hicieron fue polémica, y aún hoy sigue causando cierta inquietud y consternación entre los físicos.

Empezaron por las ecuaciones de Dirac y de Maxwell, donde se dan ciertos valores iniciales a la masa y a la carga del electrón (llamados «masa desnuda» y «carga desnuda»). Luego calcularon las correcciones cuánticas de estas, que resultaron ser infinitas. Este era el problema con el que Oppenheimer se había tropezado antes.

Pero aquí viene la magia. Si suponemos que la masa y carga desnudas originales son infinitas desde un principio, y entonces calculamos las correcciones cuánticas infinitas, ¡hallamos que estas dos cifras infinitas se pueden anular entre sí, dando un resultado finito! En otras palabras, ¡infinito menos infinito es igual a cero!

La idea era una locura, pero funcionaba. La intensidad del campo magnético del electrón se podía calcular con una precisión asombrosa —de una parte en cien mil millones— utilizando la QED.

«La coincidencia numérica entre la teoría y el experimento es aquí quizá la más impresionante de toda la ciencia», observó Steven Weinberg<sup>[5]</sup>. Es como calcular la distancia de Los Ángeles a Nueva York con una precisión del diámetro de un cabello. Schwinger estaba tan orgulloso de esto que hizo que grabasen el símbolo de este resultado en su lápida.

Este método se denomina «teoría de renormalización». El procedimiento, sin embargo, es arduo, complejo y de lo más tedioso. Literalmente, deben calcularse miles de términos con exactitud, y todos ellos deben anularse con precisión. El más mínimo error en este grueso libro de ecuaciones puede alterar todo el cálculo (no es exagerado decir que algunos físicos pasaron su vida entera calculando correcciones cuánticas al siguiente decimal utilizando la teoría de renormalización).

Debido a la dificultad del proceso de renormalización, la QED no le gustaba ni siquiera a Dirac, que había ayudado a crearla; le parecía completamente artificial, como barrer debajo de la alfombra. En cierta ocasión declaró: «Las matemáticas no son razonables. Unas matemáticas razonables implican despreciar una cantidad cuando es demasiado pequeña, ¡no porque es infinitamente grande y no la quieres!»<sup>[6]</sup>.

La teoría de renormalización, que podía combinar la relatividad especial de Einstein con el electromagnetismo de Maxwell, es, en efecto, sumamente fea. Es necesario dominar una verdadera enciclopedia de trucos matemáticos para anular miles de términos. Pero los resultados son incontestables.

## APLICACIONES DE LA REVOLUCIÓN CUÁNTICA

Esto, a su vez, allanó el camino para un extraordinario conjunto de descubrimientos, que traerían consigo la tercera de las grandes revoluciones de la historia, la de la alta tecnología, que incluye los transistores y los láseres y que ayudaría a crear el mundo moderno.

Pensemos en el transistor, quizá el invento más fundamental del último siglo. Dio paso a la revolución de la información, al proporcionar una

inmensa red de sistemas de telecomunicaciones, los ordenadores e internet. Un transistor es básicamente una puerta que controla el flujo de electrones. Piense en una válvula: con una pequeña, podemos controlar el flujo de agua en una tubería. De la misma forma, un transistor es como una minúscula válvula electrónica que permite controlar, con una reducida cantidad de electricidad, un flujo mucho mayor de electrones en un cable. Así, una tenue señal se puede amplificar.

De manera parecida, el láser, uno de los dispositivos ópticos más versátiles de la historia, es otro subproducto de la teoría cuántica. Para crear un láser de gas, coja un tubo de hidrógeno y helio. A continuación, inyecte energía en él (aplicando una corriente eléctrica). Este súbito paso hace que billones de electrones del gas salten a un nivel de energía más alto. Sin embargo, este grupo de átomos energizados es inestable. Si un electrón decae a un nivel inferior, libera un fotón de luz, que impacta en un átomo energizado vecino. Esto provoca que el segundo átomo decaiga y libere otro fotón. La mecánica cuántica predice que el segundo fotón vibra al unísono con el primero. Se pueden poner espejos en ambos extremos del tubo, magnificando así este aluvión de fotones. En última instancia, este proceso provoca una gigantesca avalancha de fotones, todos ellos vibrando al unísono de un lado al otro de los espejos, creando así el haz láser.

Actualmente, los láseres se encuentran por todas partes: cajas de supermercado, hospitales, ordenadores, conciertos de rock, satélites en el espacio, etcétera. Sus haces no solo pueden transmitir enormes cantidades de información, sino también colosales cantidades de energía, la suficiente para atravesar la mayor parte de materiales (al parecer, la única limitación en la energía de un láser es la estabilidad del material que lo genera y la energía que lo alimenta. Así, en principio, con la sustancia y la fuente de alimentación apropiadas, se podría crear un haz láser similar a los que vemos en las películas de ciencia ficción).

## ¿QUÉ ES LA VIDA?

**E**rwin Schrödinger fue una figura capital en la formulación de la mecánica cuántica, pero también estaba interesado en otro problema que llevaba siglos

fascinando y atormentando a los científicos: ¿qué es la vida? ¿Podía la mecánica cuántica dar respuesta a este misterio capital? Consideraba que uno de los subproductos de la revolución cuántica sería la clave para comprender el origen de la vida.

A lo largo de la historia, científicos y filósofos habían creído en la existencia de algún tipo de fuerza vital que animaba a los seres vivos. Cuando un alma misteriosa entraba en un cuerpo, este pasaba, de repente, a estar animado y a actuar como un ser humano. Muchos creían en algo llamado «dualismo», según el cual el cuerpo (material) coexistía con un alma (espiritual).

Schrödinger, sin embargo, creía que el código de la vida estaba oculto dentro de alguna molécula maestra que obedecía las leyes de la mecánica cuántica. Einstein, por ejemplo, desterró el éter de la física. De forma parecida, el austriaco trataría de desterrar la fuerza vital de la biología. En 1944 escribió un innovador libro, *¿Qué es la vida?*, que ejerció una profunda influencia en la nueva generación de científicos de posguerra. Schrödinger proponía utilizar la mecánica cuántica para responder a las más antiguas cuestiones sobre la vida. En ese libro observó que, de algún modo, un código genético se transportaba de una generación de organismos vivos a la siguiente. Él creía que este código no se guardaba en un alma, sino en la disposición de moléculas de nuestras células. Utilizando la mecánica cuántica, teorizó sobre cuál podía ser esta misteriosa molécula maestra. Por desgracia, en la década de 1940 no se sabía lo suficiente sobre biología molecular para dar respuesta a esta cuestión.

Pero dos científicos, James D. Watson y Francis Crick, leyeron el libro y quedaron fascinados por la búsqueda de esta molécula maestra; sin embargo, comprendieron que las moléculas eran tan pequeñas que resultaba imposible verlas o manipularlas. El motivo es que la longitud de onda de la luz visible es mucho mayor que una molécula. Pero tenían otro truco cuántico en la manga: la cristalográfia de rayos X. La longitud de onda de los rayos X es comparable al tamaño de las moléculas, de modo que, si se iluminaba un cristal de materia orgánica con ellos, los rayos se dispersarían en muchas direcciones. Y el patrón de dispersión contenía información detallada sobre la estructura atómica del cristal. Distintas moléculas producían diferentes patrones de rayos X. Un físico cuántico experto podía deducir la estructura de la molécula original examinando fotografías de la dispersión. Así, aunque no pudiera verse la propia molécula, era posible descifrar su estructura.

La mecánica cuántica era tan potente que permitía determinar el ángulo con el que se enlazaban los diferentes átomos para crear moléculas. Como un niño con un juego de Lego, era posible construir cadenas, átomo por átomo, para reproducir la estructura real de una molécula compleja. Watson y Crick se dieron cuenta de que la molécula de ADN era uno de los principales constituyentes del núcleo de una célula, así que era una probable candidata. Mediante el análisis de las fundamentales fotos de rayos X que tomó Rosalind Franklin, pudieron llegar a la conclusión de que la estructura de la molécula de ADN era una doble hélice.

En uno de los artículos más importantes publicados en el siglo xx, Watson y Crick pudieron utilizar la mecánica cuántica para descodificar la estructura entera de la molécula de ADN. Fue una obra maestra. Demostraron de forma concluyente que el proceso fundamental de los seres vivos —la reproducción— se podía duplicar a nivel molecular. La vida estaba codificada en el ADN de cada célula.

Ese fue el avance que hizo posible alcanzar el Santo Grial de la biología, el Proyecto Genoma Humano, que nos ha dado una descripción completa, átomo por átomo, del ADN de una persona.

Como había predicho Charles Darwin en el siglo anterior, ahora era posible construir el árbol genealógico de la vida en la Tierra, en el que cada ser vivo o fósil era miembro de una de las ramas. Y todo aquello era producto de la mecánica cuántica.

Así, la unificación de las leyes de la mecánica cuántica no solo revelaba los secretos del universo, sino que también unificaba el árbol de la vida.

## LA FUERZA NUCLEAR

Recordemos que Einstein no fue capaz de completar su teoría del campo unificado debido, en parte, a que le faltaba una enorme pieza del rompecabezas: la fuerza nuclear. En las décadas de 1920 y 1930 no se sabía casi nada al respecto.

Pero, durante la posguerra, gracias al asombroso éxito de la QED, los físicos volvieron su interés a otro problema urgente: cómo aplicar la teoría cuántica a la fuerza nuclear. Esto se revelaría como una tarea difícil y ardua,

ya que tenían que empezar de cero y necesitaban potentes instrumentos completamente nuevos para hallar el camino correcto en este desconocido territorio.

Hay dos clases de fuerzas nucleares, la fuerte y la débil. El protón tiene carga positiva, y las cargas positivas se repelen entre sí, por lo que en circunstancias normales el núcleo de un átomo debería volar en pedazos. Lo que lo mantiene unido, sobreponiéndose a la repulsión electrostática, son las fuerzas nucleares. Sin ellas, todo nuestro mundo se disolvería en una nube de partículas subatómicas.

La fuerza nuclear fuerte basta para mantener indefinidamente estable el núcleo de muchos elementos químicos. Y así ha sido desde el mismo inicio del universo, en especial si el número de protones y neutrones está equilibrado. Sin embargo, algunos núcleos son inestables por distintas razones, sobre todo si tienen demasiados protones o demasiados neutrones. En el primer caso, la repulsión eléctrica hará que el núcleo se desintegre. En el segundo caso, su inestabilidad puede hacer que se descompongan. En particular, la fuerza nuclear débil no es lo bastante fuerte para mantener unido al neutrón de forma permanente, por lo que acabará por desintegrarse. Por ejemplo, la mitad de un conjunto cualquiera de neutrones libres se desintegrará en catorce minutos, dejando tres partículas: el protón, el electrón y una misteriosa partícula nueva, el antineutrino, del que hablaremos más adelante.

El estudio de las fuerzas nucleares es sumamente complicado, ya que el núcleo es unas cien mil veces menor que un átomo. Para sondear el interior de un protón, los físicos necesitaban una nueva herramienta, el acelerador de partículas. Habíamos visto cómo, años atrás, Ernest Rutherford utilizó los rayos emitidos por un fragmento de radio en una caja de plomo para descubrir el núcleo. Y, para explorarlo más profundamente, los físicos necesitaban fuentes de radiación aún más potentes.

En 1929, Ernest Lawrence inventó el ciclotrón, el precursor de los gigantescos aceleradores de partículas actuales. El principio en el que se basa es simple: un campo magnético fuerza a los protones a moverse en una trayectoria circular. Con cada vuelta, un campo eléctrico les da un pequeño impulso energético. Al cabo de muchas revoluciones, el haz de protones puede alcanzar energías de millones, incluso miles de millones, de electronvoltios. (El principio básico de un acelerador de partículas es tan sencillo que incluso yo construí uno de electrones, un betatrón, cuando estaba en el instituto).

Este haz, a su vez, se dirige contra un objetivo, donde choca con otros protones. Examinando la inmensa cantidad de remanentes generados en la colisión, los científicos pudieron identificar partículas nuevas, desconocidas hasta entonces. (Este proceso de disparar haces de partículas para romper protones es una operación burda e imprecisa. Se ha comparado con tirar un piano por la ventana y luego tratar de determinar las propiedades del piano analizando el ruido del choque. No obstante, es uno de los escasos métodos de que disponemos para sondear el interior del protón).

La primera vez que los físicos provocaron choques contra protones en un acelerador de partículas, en la década de 1950, hallaron, para su consternación, todo un muestrario de partículas inesperadas.

Era una sobreabundancia de información. Se creía que la naturaleza se haría más simple cuanto más profundizáramos en ella, no más compleja. Pero, para los físicos cuánticos, parecía que la naturaleza era, después de todo, maliciosa.

Frustrado por el aluvión de partículas nuevas, Robert Oppenheimer declaró que el Premio Nobel de Física debía concederse al físico que, aquel año, no descubriese ninguna. Enrico Fermi aseguró que «si hubiese sabido que iba a haber tantas partículas con nombres griegos, me habría hecho botánico, y no físico»<sup>[7]</sup>.

Los investigadores estaban sumergidos en un mar de partículas subatómicas. En medio de aquel caos, algunos físicos declararon que quizás la mente humana no era lo bastante inteligente para entender el reino subatómico. Después de todo, sostenían, es imposible enseñarle cálculo a un perro, así que quizás no teníamos la suficiente capacidad para entender lo que sucede en el núcleo de un átomo.

Parte de la confusión se empezó a aclarar con el trabajo de Murray Gell-Mann y sus colegas del Instituto Tecnológico de California (Caltech), que afirmaban que, dentro del protón y del neutrón, había tres partículas aún menores llamadas «quarks».

Era un modelo simple, pero funcionaba extraordinariamente bien organizando las partículas en grupos. Igual que había hecho Mendeléyev, Gell-Mann podía predecir las propiedades de nuevas partículas que interaccionaban con intensidad con solo examinar los espacios vacíos de su teoría. En 1964 se descubrió otra partícula, la omega menos, predicha por el modelo de quarks, lo que validaba las bases de esta teoría, por la que Gell-Mann recibió el Premio Nobel.

El motivo por el que el modelo de quarks fue capaz de unificar tantas partículas se basa en la simetría. Recordemos que Einstein introdujo una simetría tetradimensional que convertía el espacio en tiempo, y viceversa. Gell-Mann propuso unas ecuaciones que contenían tres quarks; cuando se intercambiaban dentro de una ecuación, esta seguía siendo la misma. Esta nueva simetría describía el reordenamiento de tres quarks.

## POLOS OPUESTOS (SEGUNDA PARTE)

El otro gran físico del Caltech, Richard Feynman, que renormalizó la QED, y Murray Gell-Mann, que introdujo el quark, eran polos opuestos en cuanto a personalidad y temperamento.

En los medios de comunicación de masas, los físicos son invariablemente presentados como científicos locos (como Doc Brown, de *Regreso al futuro*) o empollones socialmente inadaptados (como en la serie *The Big Bang Theory*). Sin embargo, en realidad, los físicos tienen todas las formas, colores y tipos de personalidad.

Feynman era impertinente y extravagante, el alma de la fiesta, y siempre estaba narrando desvergonzadas historias sobre sus escandalosas hazañas en un tosco acento de clase obrera. (Una vez, durante la Segunda Guerra Mundial, forzó la caja fuerte que contenía los secretos de la bomba atómica en el Laboratorio Nacional de Los Álamos. Dentro dejó una críptica nota. Cuando los funcionarios la encontraron, al día siguiente, la alarma y el pánico se hicieron presa del laboratorio más secreto de la nación). Nada era demasiado poco ortodoxo o demasiado estrafalario para Feynman; para satisfacer su curiosidad, una vez se encerró en una cámara hiperbárica para ver si podía vivir una experiencia extracorpórea.

Gell-Mann, en cambio, era todo lo opuesto: siempre caballeroso, meticuloso en sus palabras y en sus modales. Sus pasatiempos favoritos eran observar pájaros, colecciónar antigüedades, la lingüística y la arqueología, no contar historias divertidas. Sin embargo, aun siendo tan diferentes de carácter, ambos tenían la misma motivación, la misma determinación, que les ayudó a penetrar en los misterios de la teoría cuántica.

## LA FUERZA DÉBIL Y LAS PARTÍCULAS FANTASMA

Mientras tanto, se estaban dando pasos agigantados en la comprensión de la fuerza nuclear débil, que es alrededor de un millón de veces menos intensa que la fuerte.

La fuerza débil, por ejemplo, no es lo bastante fuerte para mantener unido el núcleo de numerosos tipos de átomos, así que estos se descomponen en partículas subatómicas menores. La desintegración radiactiva, como hemos visto, es la razón por la que el interior de la Tierra está tan caliente. La feroz energía de los atronadores volcanes y los terribles terremotos procede de la fuerza nuclear débil. Se tuvo que introducir una nueva partícula para explicar esta interacción. Un neutrón, por ejemplo, es inestable, y termina por descomponerse en un protón y un electrón en lo que se denomina «desintegración beta». Pero, para que los cálculos funcionaran, los físicos necesitaban introducir una tercera partícula, el misterioso neutrino.

A veces se ha dado en llamar al neutrino «la partícula fantasma», porque puede penetrar planetas y estrellas enteros sin ser absorbido. En este preciso instante, su cuerpo está siendo atravesado por un diluvio de neutrinos del espacio exterior, algunos de los cuales han atravesado todo el planeta. De hecho, algunos de ellos podrían penetrar un bloque de plomo macizo que abarcase desde la Tierra hasta la estrella más próxima.

Pauli, que predijo la existencia del neutrino en 1930, se lamentaba así una vez: «He cometido el peor de los pecados. He introducido una partícula que no se puede observar»<sup>[8]</sup>. Aun siendo tan elusiva, acabó por ser descubierta experimentalmente en 1956, mediante el análisis de la intensa radiación emitida por una central nuclear. (Aunque el neutrino apenas interactúa con la materia ordinaria, los físicos compensaron este comportamiento aprovechando la colosal cantidad de estas partículas que es emitida por un reactor nuclear).

Para poder comprender la fuerza nuclear débil, los físicos introdujeron una simetría más. Como el electrón y el neutrino eran una pareja de partículas que interactuaban débilmente, se propuso emparejarlos, lo que nos dio una nueva simetría. Esta, a su vez, podía combinarse con la antigua simetría de la teoría de Maxwell. El modelo resultante, que se denominó «teoría electrodébil», unificaba el electromagnetismo con la fuerza nuclear débil.

Esta teoría electrodébil, de Steven Weinberg, Sheldon Glashow y Abdus Salam, supuso para ellos el Premio Nobel en 1979.

Así, la luz, en lugar de unirse a la gravedad, como había esperado Einstein, prefería hacerlo a la fuerza nuclear débil.

De manera que la fuerza nuclear fuerte se basaba en la simetría de Gell-Mann, que enlaza los tres quarks para crear protones y neutrones, mientras que la fuerza nuclear débil se basaba en una simetría menor, la reorganización del electrón con el neutrino, que, a continuación, se combinaba con el electromagnetismo.

Pero, por potentes que fueran el modelo del quark y la teoría electrodébil en su descripción de la gran variedad de partículas subatómicas, seguía quedando una enorme laguna. La pregunta candente era: ¿qué es lo que mantiene unidas a todas esas partículas?

## LA TEORÍA DE YANG-MILLS

Como el campo de Maxwell era tan adecuado para la predicción de las propiedades del electromagnetismo, los físicos empezaron a estudiar una versión nueva y más potente de su ecuación, que propusieron Chen Ning Yang y Robert L. Mills en 1954. En lugar de un único campo, el presentado por Maxwell en 1861, se introducía toda una serie de campos. La misma simetría que Gell-Mann empleó para reorganizar los quarks en esta teoría se usaba ahora para intercambiar este nuevo conjunto de campos de Yang-Mills.

La idea era sencilla. Lo que mantiene el átomo unido es el campo eléctrico, descrito por las ecuaciones de Maxwell. Entonces, quizá lo que mantiene unidos a los quarks sea una generalización de las ecuaciones de Maxwell; esto es, los campos de Yang-Mills. La misma simetría que describe los quarks se aplica ahora al campo de Yang-Mills.

Sin embargo, durante varias décadas, esta sencilla idea languideció porque, al calcular las propiedades de las partículas de Yang-Mills, el resultado era de nuevo infinito, como hemos visto en la QED. Por desgracia, los trucos introducidos por Feynman no bastaron para renormalizar la teoría de Yang-Mills. Durante años, los físicos se desesperaron tratando de hallar una teoría finita de la fuerza nuclear.

Finalmente, un emprendedor estudiante de posgrado neerlandés, Gerard't Hooft, tuvo el valor y el tesón necesarios para enfrentarse a esta maraña de

términos infinitos y, a base de fuerza bruta, renormalizar el campo de Yang-Mills. Ya entonces, la informática era lo bastante avanzada para analizar estos términos. Cuando su programa de ordenador devolvió una serie de ceros que representaban estas correcciones cuánticas, supo que tenía razón.

Las noticias de este avance captaron de inmediato la atención del mundo de la física, y Sheldon Glashow exclamó al respecto: «¡O bien este tipo es un completo idiota, o es el mayor genio que la física ha visto en años!»<sup>[9]</sup>.

Fue un gran logro que supondría el Premio Nobel de Física en 1999 para Hooft y su supervisor doctoral, Martinus Veltman. De repente, se abría un nuevo campo que se podía utilizar para vincular las partículas conocidas de la fuerza nuclear y explicar la fuerza débil. Al aplicarlo a los quarks, el campo de Yang-Mills se denominó «gluon», porque actuaba como un pegamento<sup>[\*]</sup> sobre los quarks (las simulaciones por ordenador muestran que el campo de Yang-Mills se condensa en una sustancia similar al caramelito deshecho, que mantiene unidos a los quarks como si fuera pegamento). Para ello, se necesitan quarks de tres tipos, o colores, que obedezcan a la simetría de los de Gell-Mann. Así, una nueva teoría de la fuerza fuerte ganó una amplia aceptación, y se bautizó como «cromodinámica cuántica», que actualmente constituye la mejor representación conocida de la fuerza nuclear fuerte.

## EL BOSÓN DE HIGGS: LA PARTÍCULA DE DIOS

De manera que, poco a poco, de este caos estaba surgiendo una nueva teoría, el «modelo estándar». La confusión que rodeaba al torbellino de partículas subatómicas se estaba aclarando. El campo de Yang-Mills (llamado «gluon») mantenía unidos a los quarks en el neutrón y el protón, y otro campo de Yang-Mills (llamado «partículas W y Z») describía la interacción entre electrones y neutrinos.

Pero lo que impedía la aceptación definitiva del modelo estándar era la falta de la última pieza del rompecabezas de partículas, el llamado «bosón de Higgs» o «partícula de Dios». La simetría no era suficiente: se necesitaba una forma de romper esa simetría, porque el universo a nuestro alrededor no es simétrico por completo.

Cuando contemplamos hoy el cosmos, vemos las cuatro fuerzas actuando independientemente unas de otras. La gravedad, la luz y las fuerzas nucleares no parecen, a simple vista, tener nada en común. No obstante, si retrocedemos en el tiempo, todas ellas empiezan a converger, dejando quizá una única fuerza en el instante de la creación.

Se empezó a desarrollar una nueva imagen que utilizaba la física de partículas para explicar el mayor de los misterios de la cosmología, el nacimiento del universo. De repente, dos disciplinas muy distintas, la mecánica cuántica y la relatividad general, empezaron poco a poco a convertirse en una sola.

Según esta nueva imagen, en el mismo momento del Big Bang, las cuatro fuerzas eran una única superfuerza que obedecía a la simetría maestra. Esta podía rotar todas las partículas del universo entre ellas. La ecuación que gobernaba la superfuerza era la ecuación de Dios, y su simetría era la misma que se le había estado escapando a Einstein y a los demás físicos desde entonces.

Después del Big Bang, el universo se fue enfriando a medida que se expandía, y las distintas fuerzas y simetrías empezaron a dividirse, dejando las fragmentadas simetrías de las fuerzas débil y fuerte del actual modelo estándar. Este proceso se denomina «rotura de la simetría», e implica que necesitamos un mecanismo que pueda descodificar precisamente esta simetría original, que nos lleva al modelo estándar. Y ahí es donde entra el bosón de Higgs.

Para hacerse una imagen de todo esto, piense en una presa. El agua del pantano también tiene una simetría: si se hace rotar, sigue teniendo básicamente el mismo aspecto. Todos sabemos por experiencia que el agua se desplaza pendiente abajo. La causa es que, de acuerdo con Newton, esta siempre busca un estado de energía menor. Si la presa se rompiera, el agua se precipitaría pendiente abajo hacia un estado de energía menor. Así, el agua que hay dentro de la presa está en un estado de energía mayor. Los físicos llaman a ese estado «falso vacío», porque es inestable hasta que la presa se rompe y el agua llega al verdadero vacío, esto es, el estado de energía más bajo, en el valle. Cuando esto ocurre, la simetría original desaparece, pero el agua ha llegado a su verdadero estado fundamental.

Encontramos este efecto también al analizar agua que está empezando a hervir. Justo antes de que llegue a ebullición, el agua está en un estado de falso vacío. Es inestable, pero simétrica; es decir, el agua se puede rotar y tendrá el mismo aspecto. Pero, con el tiempo, se forman pequeñas burbujas,

cada una de las cuales está en un estado de energía más bajo que el agua circundante. Cada burbuja empieza a expandirse, hasta que un número suficiente de ellas se combina y el agua rompe a hervir.

Según este escenario, el universo estaba, al principio, en un estado completamente simétrico. Todas las partículas subatómicas formaban parte de la misma simetría, y todas tenían masa cero. Esto permitía intercambiarlas, pero la ecuación seguía siendo la misma. Sin embargo, debido a una razón desconocida, esa situación era inestable; era un estado de falso vacío. El campo necesario para cambiar al vacío verdadero (aunque roto) es el campo de Higgs. Al igual que el campo eléctrico de Faraday, que impregna todos los rincones del espacio, el campo de Higgs también llena la totalidad del espacio-tiempo.

Sin embargo, por algún motivo, la simetría del campo de Higgs se empezó a romper.

Minúsculas burbujas empezaron a formarse en su interior. Fuera de ellas, todas las partículas siguieron siendo simétricas y sin masa, pero, dentro, algunas partículas la adquirieron. A medida que se desplegaba el Big Bang, la burbuja de nuestro universo se expandió rápidamente, las partículas empezaron a adquirir masas distintas y la simetría original se rompió. En última instancia, todo el universo existe en el nuevo estado de vacío dentro de una gigantesca burbuja.

Así, en la década de 1970, el arduo trabajo de muchísimos físicos empezó a dar sus frutos. Después de decenios deambulando sin rumbo, comenzaron a encajar todas las piezas del rompecabezas. Se dieron cuenta de que, con la fusión de las tres teorías (que representaban las fuerzas fuerte, débil y electromagnética), podrían escribir un conjunto de ecuaciones que coincidiesen con los resultados observados en el laboratorio<sup>[10]</sup>.

La clave consistía en crear una simetría maestra combinando tres simetrías menores distintas. La primera describía la fuerza nuclear fuerte, que intercambia tres quarks entre sí. La segunda describía la fuerza débil, que intercambia electrones y neutrinos. Y la tercera describía el campo original de Maxwell. Esta teoría última resultaba un tanto forzada, pero era difícil darle la espalda al éxito.

## LA TEORÍA DE CASI TODO

**S**orprendentemente, el modelo estándar podía predecir con precisión las propiedades de la materia desde una fracción de segundo después del Big Bang.

Aunque el modelo estándar representaba nuestro mejor intento de entender el mundo subatómico, había numerosas, y flagrantes, lagunas. En primer lugar, este modelo no mencionaba la gravedad, lo cual se trataba de un inmenso problema, teniendo en cuenta que esta es la fuerza que controla el comportamiento del universo a gran escala. Y, cada vez que los físicos intentaban incorporarla al modelo estándar, eran incapaces de resolver las ecuaciones. Las correcciones cuánticas que provocaba la gravedad no solo no eran pequeñas, sino que resultaban ser infinitas, como en el caso de la QED y las partículas de Yang-Mills. Así, el modelo estándar no puede arrojar luz en algunos de los más pertinaces secretos del universo, como, por ejemplo, qué sucedió antes del Big Bang o qué hay en el interior de un agujero negro (más tarde volveremos a estas importantes cuestiones).

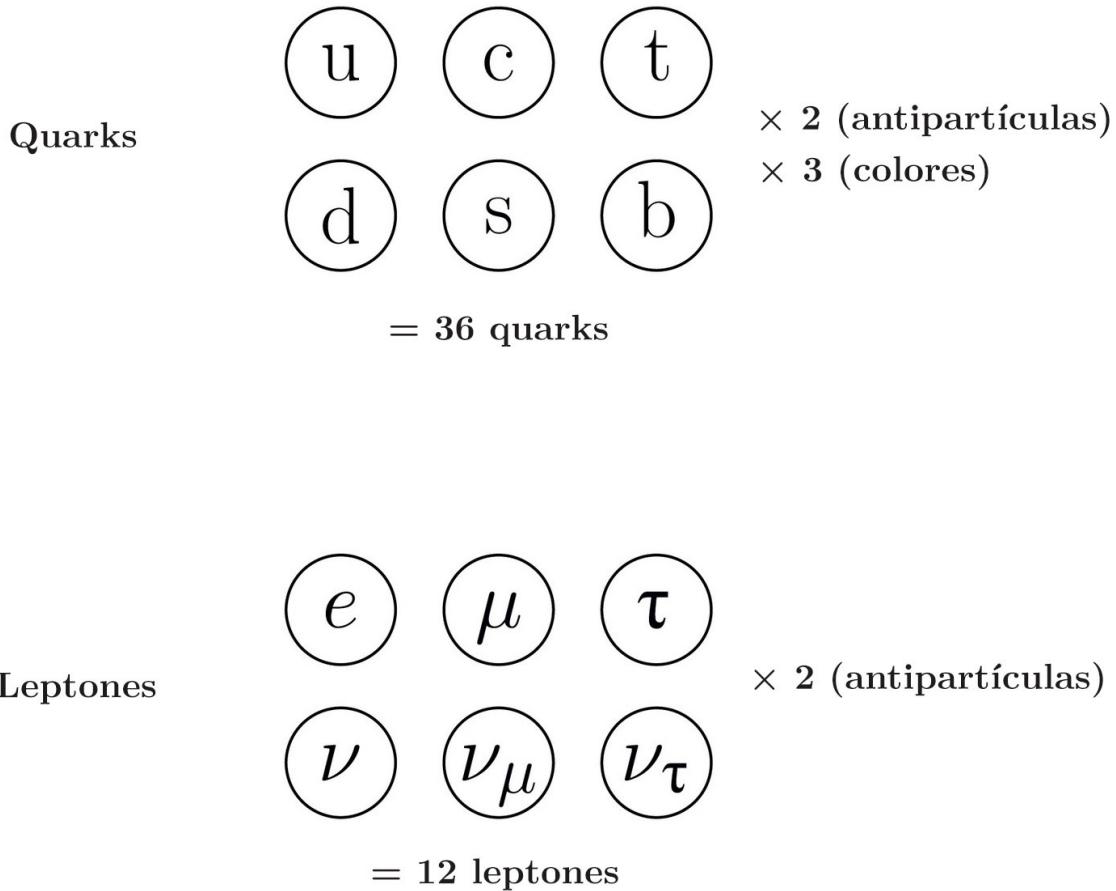
En segundo lugar, el modelo estándar se creó uniendo a mano las teorías que describían las diversas fuerzas, de manera que la teoría resultante era como un mosaico (un físico lo comparó con juntar un ornitorrinco, un oso hormiguero y una ballena y declarar que aquella era la más elegante de las criaturas de la naturaleza<sup>[11]</sup>. Al animal resultante, se decía, solo podía quererlo su propia madre).

En tercer lugar, el modelo estándar tenía una serie de parámetros indeterminados (como las masas de los quarks y la intensidad de las interacciones). De hecho, había que asignar a dedo unas veinte constantes, sin entender en absoluto de dónde venían o qué representaban.

En cuarto lugar, en el modelo estándar no había una sola copia, sino tres copias idénticas, o generaciones, de los quarks, gluones, electrones y neutrinos (así que, en total, hay treinta y seis quarks, con tres colores, tres generaciones, junto con sus correspondientes antipartículas, y veinte parámetros libres). A los físicos les resultaba difícil creer que algo tan burdo y difícil de manejar pudiese ser la teoría fundamental del universo.

## Modelo est\'andar

---



+ part\'iculas de gauge de Yang-Mills + part\'icula de Higgs

FIGURA 9. El modelo est\'andar es un peculiar conjunto de part\'iculas subat\'omicas que describe con precision nuestro universo cu\'antico. Consta de 36 quarks y antiquarks, 12 part\'iculas y antipart\'iculas que interact\'uan d\'ebilmente (llamadas «leptones») y un gran surtido de campos de Yang-Mills y bosones de Higgs, part\'iculas creadas al estimular el campo de Higgs.

## El LHC

**M**ucho es lo que est\'a en juego, por lo que las naciones est\'an dispuestas a gastar miles de millones en crear la siguiente generaci\'on de aceleradores de part\'iculas. Actualmente, los titulares los ha copado el Gran Colisionador de

Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés), situado en las afueras de Ginebra, en Suiza, la mayor máquina científica jamás construida, pues su coste superó los doce mil millones de dólares y tiene una circunferencia de más de veintisiete kilómetros.

El LHC parece una inmensa rosquilla situada en la frontera entre Suiza y Francia. Dentro del tubo, los protones se aceleran hasta que alcanzan una energía extremadamente alta. Entonces se hacen chocar con otro haz de protones de alta energía que viaja en dirección opuesta, lo cual libera una energía de catorce billones de electronvoltios y crea una colossal lluvia de partículas subatómicas. A continuación, los ordenadores más avanzados del mundo se utilizan para desentrañar el sentido de esta nube de partículas.

El objetivo del LHC es reproducir las condiciones que había poco después del Big Bang y crear así estas inestables partículas. Finalmente, en 2012, se halló el bosón de Higgs, la última pieza del modelo estándar.

Aunque fue un gran día para la física de altas energías, los científicos comprendieron que aún quedaba un largo camino por recorrer. Por un lado, el modelo estándar describe todas las interacciones entre partículas, desde el interior del protón hasta las mismas fronteras del universo visible. El problema es que se trata de una teoría sin gracia. En el pasado, cada vez que los físicos sondeaban la naturaleza fundamental de la materia, aparecían nuevas y elegantes simetrías, así que les resultaba problemático preferir ahora una teoría chapucera.

A pesar de sus éxitos en un nivel práctico, es obvio para todos que el modelo estándar no es más que el calentamiento para la teoría definitiva, aún por llegar.

Mientras tanto, los físicos, alentados por los asombrosos éxitos de la teoría cuántica al aplicarla a las partículas subatómicas, empezaron a examinar de nuevo la teoría de la relatividad general, que llevaba décadas languideciendo. Volvieron su atención a una meta más ambiciosa: combinar el modelo estándar con la gravedad, lo que significaba que se iba a necesitar una teoría cuántica para la propia gravedad. Esta sería realmente una teoría del todo, con la que se podrían calcular todas las correcciones cuánticas del modelo estándar y de la relatividad general.

Antes, la teoría de la renormalización fue una astuta maniobra que había anulado todas las correcciones cuánticas de la QED y del modelo estándar. La clave era representar la fuerza electromagnética y las fuerzas nucleares como partículas, llamadas «fotones» y «partículas de Yang-Mills», y entonces hacer un pase mágico para deshacerse de los infinitos por el procedimiento de

reabsorberlos en alguna otra parte. Todos aquellos desagradables infinitos eran barridos debajo de la alfombra.

Ingenuamente, los físicos, siguiendo una tradición secular, tomaron la teoría de la gravedad de Einstein e introdujeron una nueva partícula puntual para la gravedad, llamada «gravitón». Así, la suave superficie introducida por el alemán para representar el tejido del espacio-tiempo quedaba ahora reducida a una nube de billones de minúsculos gravitones.

Por desgracia, los trucos de los físicos, que han ido empleando de forma poco deseable durante los últimos setenta años a fin de eliminar estos infinitos, fracasaron en el caso del gravitón. Las correcciones cuánticas creadas por estas partículas eran infinitas y no se podían anular de ninguna otra manera. Los físicos chocaron aquí contra una pared. Su racha ganadora terminó de forma abrupta.

Frustrados, trataron de alcanzar una meta más modesta. Se vieron incapaces de crear una teoría cuántica de la gravedad completa, así que intentaron calcular lo que sucede cuando la materia ordinaria es cuantizada, dejando a un lado la gravedad. Esto significaba calcular las correcciones cuánticas debidas a las estrellas y galaxias, pero sin tener en cuenta la gravedad. Se esperaba que, si solo se cuantizaba el átomo, se crearía un paso intermedio para ganar conocimiento sobre el objetivo más amplio, el de formular una teoría cuántica de la gravedad.

Este era un objetivo más modesto, pero abría las puertas a un impresionante conjunto de nuevos y fascinantes fenómenos físicos que iban a desafiar nuestra visión del universo. De pronto, los físicos cuánticos se tropezaron con los prodigios más extravagantes del cosmos: agujeros negros, agujeros de gusano, materia y energía oscuras, viajes en el tiempo y hasta la mismísima creación del universo.

Pero el descubrimiento de estos singulares fenómenos cósmicos era también un desafío para la teoría del todo, que ahora no solo debía explicar las partículas subatómicas ya conocidas del modelo estándar, sino también todos esos fenómenos singulares que desafiaban la imaginación del ser humano.

## 5 EL UNIVERSO OSCURO

**E**n 2019, periódicos y sitios web de todo el planeta llenaron sus portadas con una noticia sensacional: los astrónomos acababan de tomar la primera fotografía de un agujero negro. Miles de millones de personas vieron aquella escueta imagen, una bola roja de gas ardiente con una silueta negra y redonda en el centro. Este misterioso objeto captó la imaginación del público y llenó los boletines de noticias. No era solo que los agujeros negros hubiesen intrigado y fascinado a los físicos, sino que también entraron en la imaginación de la gente tras aparecer en multitud de programas especiales sobre ciencia y en una pléthora de películas.

El agujero negro fotografiado por el telescopio Event Horizon se halla en el interior de la galaxia M87, a cincuenta y tres millones de años luz de la Tierra. El objeto es realmente monstruoso; su asombrosa masa es cinco mil millones de veces la del Sol. Todo nuestro sistema solar, incluso más allá de Plutón, podría caber sin problemas en la silueta negra de la fotografía.

Para llevar a cabo esta impresionante hazaña, los astrónomos construyeron un supertelescopio. Por lo general, un radiotelescopio no es lo bastante grande para captar las débiles señales de radio necesarias para crear una imagen de un objeto tan distante. Pero en esta ocasión pudieron fotografiar el agujero negro uniendo las imágenes de cinco telescopios distintos situados por todo el mundo. Utilizando superordenadores para combinar cuidadosamente las diversas señales, lograron formar un radiotelescopio único y gigantesco, del tamaño de la Tierra. Esta imagen compuesta era tan potente que, en principio, si la aplicáramos a la Luna, permitiría detectar hasta una naranja en la superficie.

Un gran número de nuevos y notables descubrimientos como este han renovado el interés por la teoría de la gravitación de Einstein. Por desgracia, en los últimos cincuenta años, las investigaciones al respecto se habían

quedado relativamente estancadas. Las ecuaciones eran de una complejidad terrible, con frecuencia requerían cientos de variables, y los experimentos con la gravedad eran demasiado caros, pues precisaban detectores de kilómetros de diámetro.

La ironía de todo ello es que, a pesar de las reservas de Einstein respecto a la teoría cuántica, el actual renacimiento en la investigación sobre relatividad ha sido impulsado por la combinación de ambas, gracias a la aplicación de la teoría cuántica a la relatividad general. Como ya hemos mencionado, una comprensión completa del gravitón y de cómo eliminar sus correcciones cuánticas se considera demasiado complicada, pero una aplicación más modesta de la teoría cuántica a las estrellas (despreciando las correcciones del gravitón) ha abierto los cielos a una oleada de sobrecogedores avances científicos.

## ¿QUÉ ES UN AGUJERO NEGRO?

La idea básica de un agujero negro puede remontarse al descubrimiento de las leyes de la gravedad por parte de Newton. Sus *Principia* nos dieron una imagen simple: si se dispara una bola de cañón con la suficiente energía, esta describirá un círculo completo en torno a la Tierra y volverá al punto de origen.

Pero ¿qué sucede si se apunta la bola de cañón directamente hacia arriba? Newton dedujo que la bola alcanzaría una altura máxima y luego caería de nuevo a la Tierra. Sin embargo, si la energía era suficiente, la bola de cañón alcanzaría la velocidad de escape, esto es, la velocidad necesaria para liberarse de la gravedad terrestre y volar hacia el espacio para no volver.

Es un ejercicio simple utilizar las leyes de Newton para calcular la velocidad de escape de la Tierra, que resulta ser de unos cuarenta mil kilómetros por hora. Esta es la velocidad que nuestros astronautas tuvieron que alcanzar para llegar a la Luna en 1969. Si no se alcanza la velocidad de escape, se entra en órbita o se vuelve a caer a la Tierra.

En 1783, un astrónomo llamado John Michell se formuló a sí mismo una pregunta engañosamente sencilla: ¿qué sucede si la velocidad de escape es la velocidad de la luz? Si un rayo de luz es emitido por una estrella gigante, tan

masiva que su velocidad de escape es la velocidad de la luz, quizá ni siquiera esta pueda escapar. Toda la luz emitida por dicha estrella acabará por volver a ella. Michell las llamó «estrellas oscuras», cuerpos celestes que parecían ser negros porque la luz no podía escapar a su inmensa gravedad. En el siglo XVIII, los científicos sabían muy poco de la física de las estrellas, y desconocían el valor correcto de la velocidad de la luz, por lo que esta idea languideció en un cajón durante siglos.

En 1916, durante la Primera Guerra Mundial, el físico alemán Karl Schwarzschild estaba destinado al frente ruso como artillero. Mientras participaba en aquel cruento conflicto, encontró tiempo para leer y digerir el famoso artículo de 1915 en el que Einstein introducía la relatividad general. En un momento de brillante intuición matemática, Schwarzschild halló de algún modo una solución exacta a las ecuaciones de su compatriota. En lugar de resolverlas para una galaxia o para el universo, lo que era excesivamente difícil, empezó por el más simple de los objetos posibles, una minúscula partícula puntual. Este objeto, a su vez, se aproximaría al campo gravitatorio de una estrella esférica vista a distancia. Entonces se podría comparar la teoría de Einstein con los experimentos.

La reacción de Einstein al artículo de Schwarzschild fue de exultación. Aquel se dio cuenta de que esta solución a sus ecuaciones le permitiría llevar a cabo cálculos más precisos en su teoría, como la curvatura de la luz de las estrellas alrededor del Sol y el bamboleo de Mercurio. Así, en lugar de toscas aproximaciones a sus ecuaciones, podía calcular resultados exactos a partir de su teoría. Se trataba de un logro monumental que sería de gran importancia para la comprensión de los agujeros negros (Schwarzschild murió poco después de su notable descubrimiento. Einstein, desolado, le escribió un emocionado panegírico).

No obstante, a pesar del enorme impacto de la solución de Schwarzschild, esta también suscitó algunas desconcertantes cuestiones: desde el principio, tenía propiedades extrañas que forzaban los límites de nuestra comprensión del espacio y el tiempo. Una esfera imaginaria (a la que él llamó «esfera mágica», y que hoy se denomina «horizonte de sucesos») rodeaba una estrella supermasiva. Muy lejos de ella, el campo gravitatorio era similar al de una estrella newtoniana ordinaria, así que la solución de Schwarzschild se podía utilizar como aproximación de su gravedad. Pero, si uno tenía la desgracia de acercarse demasiado a la estrella y atravesar el horizonte de sucesos, quedaría atrapado para siempre y moriría aplastado. El horizonte de sucesos es el punto de no retorno: lo que cae dentro de él no vuelve a salir nunca.

Sin embargo, a medida que uno se aproximase a él, fenómenos aún más extraños empezarían a suceder. Por ejemplo, encontraría rayos de luz que han estado atrapados allí durante quizá miles de millones de años y que aún orbitan la estrella; y la gravedad que tirase de sus pies sería mucho mayor que la que tirase de su cabeza, así que se vería estirado como un espagueti. De hecho, esta «espaguetización» llegaría a ser tan intensa que hasta los átomos de su cuerpo se estirarían y terminarían por desintegrarse.

Para alguien que estuviese contemplando este extraordinario suceso desde una distancia lejana, parecería como si el tiempo dentro de la nave al borde del horizonte de sucesos se hubiera ido ralentizando poco a poco. De hecho, para un observador externo, sería como si el tiempo se hubiese detenido en el momento en que la nave alcanzase el horizonte de sucesos. Lo más relevante es que, para los astronautas de dentro, todo parecería normal mientras lo atravesasen... Al menos, hasta que quedasen hechos pedazos.

Este concepto era tan extravagante que, durante muchas décadas, se consideró ciencia ficción, un extraño subproducto de las ecuaciones de Einstein que no existía en el mundo real. El astrónomo Arthur Eddington escribió una vez: «¡Debería haber una ley de la naturaleza que impidiese que una estrella se comportase de manera tan absurda!».

Einstein incluso redactó un artículo en el que sostenía que, en condiciones normales, los agujeros negros nunca podrían formarse. En 1939 demostró que una bola de gas en rotación nunca podría ser comprimida por la gravedad hasta llegar al horizonte de sucesos.

Curiosamente, aquel mismo año, Robert Oppenheimer y su alumno Hartland Snyder demostraron que los agujeros negros sí podían, en realidad, formarse a partir de procesos naturales que Einstein no había previsto. Cuando una estrella gigante, de diez a cincuenta veces más masiva que nuestro sol, consume todo su combustible nuclear termina por explotar en forma de supernova. Si el vestigio de la explosión es una estrella comprimida por la gravedad hasta su horizonte de sucesos, esta puede colapsar en un agujero negro. (Nuestro sol no es lo bastante masivo para sufrir una explosión de supernova, y su horizonte de sucesos tiene un diámetro de unos seis kilómetros. No hay ningún proceso natural conocido que pueda comprimirlo hasta los tres kilómetros, de manera que no se convertirá en un agujero negro).

Los físicos han descubierto que hay al menos dos tipos de agujeros negros. El primero es el remanente de una estrella gigante, como hemos descrito. El segundo se halla en el centro de las galaxias. Estos pueden ser

millones o incluso miles de millones de veces más masivos que nuestro Sol. De hecho, muchos astrónomos creen que en el centro de todas las galaxias hay un agujero negro.

En las últimas décadas, los astrónomos han identificado cientos de posibles agujeros negros en el espacio. En el centro de nuestra Vía Láctea hay uno monstruoso cuya masa es de dos a cuatro millones de veces la de nuestro Sol, y está ubicado en la constelación de Sagitario. (Por desgracia, nubes de polvo ocultan la zona, así que no podemos verlo. Pero, si estas desapareciesen, el cielo se iluminaría cada noche con un magnífico y resplandeciente cúmulo de estrellas, con el agujero negro en el centro, superando quizá el brillo de la Luna. Sería un espectáculo digno de ver).

La última conmoción relativa a los agujeros negros ocurrió al aplicar la teoría cuántica a la gravedad: estos cálculos desataron un torrente de fenómenos inesperados que pusieron a prueba los límites de nuestra imaginación. Y nuestro guía por este territorio inexplorado estaba totalmente paralizado.

Cuando era estudiante de posgrado en la Universidad de Cambridge, Stephen Hawking era un joven normal, sin demasiada determinación. Pasó por el proceso habitual para llegar a ser físico, pero su corazón estaba en otra parte. Resultaba obvio que era una persona brillante, pero parecía que le faltaba concentración. Entonces un día le diagnosticaron esclerosis lateral amiotrófica (más conocida como ELA) y le dijeron que le quedaban dos años de vida. Aunque su mente seguiría intacta, su cuerpo se degradaría con rapidez, perdiendo toda su capacidad de funcionar, hasta morir. Deprimido y profundamente turbado, se dio cuenta de que había malgastado su vida hasta aquel momento.

Decidió dedicar los pocos años que le quedaban a hacer algo útil. Para él, esto se traducía en resolver uno de los grandes problemas de la física: la aplicación de la teoría cuántica a la gravedad. Por suerte, su enfermedad progresaba mucho más despacio de lo que habían predicho los médicos, así que pudo proseguir con sus investigaciones pioneras en este nuevo terreno, aun estando limitado a una silla de ruedas y habiendo perdido el control de sus extremidades, e incluso de sus cuerdas vocales. Una vez Hawking me invitó a dar una charla en una serie de conferencias que estaba organizando. Tuve el placer de visitar su casa, y me sorprendió el número de dispositivos que le permitían proseguir con sus investigaciones. Uno de ellos era un pasador de páginas; se podía poner un periódico en el artilugio, y este pasaba

las páginas automáticamente. Me impresionó hasta qué punto estaba decidido a no dejar que su enfermedad limitase su objetivo vital.

En aquel tiempo, casi todos los físicos teóricos estaban trabajando en la teoría cuántica, pero solo un puñado de rebeldes e incondicionales trataban de encontrar más soluciones a la ecuación de Einstein. Hawking se formuló una pregunta diferente y profunda: ¿qué sucede si combinamos estos dos sistemas y aplicamos la teoría cuántica a un agujero negro?

Se dio cuenta de que el problema de calcular correcciones cuánticas para la gravedad era sumamente difícil de resolver, así que eligió una tarea más simple: calcularlas solo para los átomos del interior de un agujero negro, dejando de lado las correcciones cuánticas de los gravitones, que son más complejas.

Cuanto más leía sobre agujeros negros, más pensaba que algo fallaba. Empezó a sospechar que la idea tradicional —la de que nada puede escapar de un agujero negro— no respetaba la teoría cuántica. En mecánica cuántica, todo es incierto. Un agujero negro parece del más puro negro porque lo absorbe absolutamente todo. Pero el negro perfecto infringía el principio de incertidumbre. Incluso el negro debía ser incierto.

Llegó a la revolucionaria conclusión de que, por fuerza, los agujeros negros han de emitir un débil resplandor de radiación cuántica.

A continuación, Hawking demostró que la radiación emitida por un agujero negro era, en verdad, una forma de radiación de cuerpo negro. Lo calculó al comprender que el vacío no era solo el estado de la nada, sino que en realidad bullía de actividad cuántica. En la teoría cuántica, incluso la nada se halla en un constante estado de agitada incertidumbre, donde electrones y antielectrones podrían saltar del vacío de repente, colisionar y volver a desaparecer en el vacío. Así que la nada es, de hecho, un hervidero de actividad cuántica. Luego, Hawking comprendió que, si el campo gravitatorio era lo bastante intenso, las parejas de electrón y antielectrón se podían crear del mismo vacío, generando lo que se denominan «partículas virtuales». Si uno de los dos miembros cayese en el agujero negro y el otro escapase, crearía lo que ahora se denomina «radiación de Hawking». La energía para crear este par de partículas procede de la energía contenida en el campo gravitatorio del agujero negro. La segunda partícula deja el agujero negro para siempre, con lo cual el contenido neto de materia y energía del agujero negro y su campo gravitatorio ha disminuido.

Esto es lo que se conoce como «evaporación» del agujero negro, y describe el destino último de todos ellos: emitir poco a poco radiación de

Hawking durante billones de años hasta agotar toda su radiación y morir en una furiosa explosión. Así, hasta los agujeros negros tienen una duración finita.

Dentro de muchos billones de años, las estrellas del universo habrán agotado todo su combustible nuclear y se apagarán. Solo los agujeros negros sobrevivirán en esa lúgubre era. Pero, en última instancia, incluso estos se evaporarán, sin dejar más rastro que una multitud de partículas subatómicas a la deriva. El mismo Hawking se hizo otra pregunta: ¿qué sucede si se tira un libro a un agujero negro? La información de ese libro ¿se pierde para siempre?

Según la mecánica cuántica, la información nunca se pierde. Incluso si quemamos un libro, es posible reconstruirlo por entero, con el tedioso análisis de las moléculas del papel quemado.

Pero Hawking avivó la controversia al afirmar que la información que se tira en un agujero negro realmente se pierde para siempre y que, por tanto, la mecánica cuántica no funciona cuando se aplica a un agujero negro.

Como ya hemos mencionado, Einstein dijo una vez que «Dios no deja nada al azar en el universo», es decir, no se puede reducir todo a la suerte y la incertidumbre. Hawking añadió: «A veces, Dios tira los dados allá donde es imposible encontrarlos», con lo que quería decir que los dados podían caer dentro de un agujero negro, donde las leyes cuánticas pueden no ser válidas. De manera que las leyes de la incertidumbre fallan más allá del horizonte de sucesos.

Desde entonces, otros físicos han salido en defensa de la mecánica cuántica, mostrando que teorías avanzadas como la de cuerdas, que comentaremos en el próximo capítulo, pueden conservar la información aun en presencia de agujeros negros. Finalmente, el físico británico admitió que tal vez se equivocaba. Pero propuso su propia y novedosa solución: a lo mejor, cuando tiramos un libro a un agujero negro, la información no se pierde para siempre, como pensaba antes, sino que vuelve a salir en forma de la débil radiación de Hawking. Codificada en esta se encuentra toda la información necesaria para volver a crear el libro original. Así que puede que Hawking se equivocase, pero la solución correcta se halla en la radiación que él mismo había descubierto en el pasado.

En conclusión, la pérdida o no de la información en un agujero negro es una cuestión que se sigue debatiendo encarnizadamente entre los físicos. Pero es posible que tengamos que esperar a responderla hasta lograr la teoría cuántica de la gravedad definitiva, que incluya correcciones cuánticas del

gravitón. Mientras tanto, Hawking volvió su atención al siguiente y desconcertante enigma que implica la combinación de la teoría cuántica y la relatividad general.

## A TRAVÉS DEL AGUJERO DE GUSANO

**S**i los agujeros negros se lo tragan todo, ¿adónde va ese todo?

La respuesta corta es que no lo sabemos. Puede que tengamos que esperar a la unificación de la teoría cuántica y la relatividad general.

Solo cuando hallemos una teoría cuántica de la gravedad (no solo de la materia) podremos responder a esta pregunta: ¿qué hay al otro lado de un agujero negro?

Pero aceptar a ciegas la teoría de Einstein es meterse en camisa de once varas, porque sus ecuaciones predicen que la fuerza gravitatoria en el centro de un agujero negro o en el principio de los tiempos es infinita, lo cual no tiene sentido.

En 1963, no obstante, el matemático Roy Kerr halló una solución del todo nuevo a las ecuaciones de Einstein para un agujero negro en rotación. Anteriormente, en el trabajo de Schwarzschild, los agujeros negros acababan en un minúsculo punto estacionario, denominado «singularidad», en el que los campos gravitatorios se hacían infinitos y todo era aplastado en un único punto. Sin embargo, al analizar las ecuaciones de Einstein para un agujero negro en rotación, Kerr encontró algunos fenómenos curiosos.

En primer lugar, el agujero negro no acaba en un punto, sino que lo hace en un anillo que gira rápidamente sobre sí mismo (la fuerza centrífuga en él es lo bastante intensa para evitar que el anillo colapse bajo su propia gravedad).

En segundo lugar, si uno atraviesa el anillo, es posible que no muera aplastado, sino que lo cruce. La gravedad dentro de él es, de hecho, finita.

En tercer lugar, las matemáticas indican que, al atravesar el anillo, uno podría entrar en un universo paralelo. Podría abandonar, literalmente, nuestro universo y entrar en otro universo hermano. Piense en dos hojas de papel, una sobre la otra, y en una pajita que las atraviesa. Al atravesar la pajita, abandona un universo y entra en otro paralelo. Esta pajita se denomina «agujero de gusano».

En cuarto lugar, al volver a entrar en el anillo, podría continuar su camino hacia otro universo; igual que al tomar el ascensor en un edificio pasa de un piso al siguiente, de un universo a otro. Cada vez que vuelve a entrar en el agujero de gusano, podría entrar en un universo completamente nuevo. Esta reflexión introducía una nueva y extraordinaria imagen de un agujero negro. En el mismo centro de uno que esté en rotación, encontramos algo parecido al espejo de Alicia. Por un lado, tenemos una tranquila campiña de Oxford, pero, si uno mete la mano en el espejo, acabará en un lugar completamente distinto.

En quinto lugar, si logra cruzar el anillo, también existe la posibilidad de acabar en alguna región distante de su mismo universo. Así, el agujero de gusano sería una especie de red de metro que permite tomar un atajo invisible por el espacio y el tiempo. Los cálculos muestran que podría viajar a una velocidad superior a la de la luz, o incluso hacia atrás en el tiempo, quizás sin violar las leyes físicas conocidas.

Estas singulares conclusiones, por estrañas que parezcan, no pueden descartarse de entrada, porque son soluciones de la ecuación de Einstein y describen agujeros negros en rotación que, según creemos en nuestros días, son, con diferencia, el tipo más común.

Los agujeros de gusano fueron, de hecho, introducidos por primera vez por el propio Einstein, en un artículo escrito en 1935 en colaboración con Nathan Rosen. Imaginaron dos agujeros negros unidos entre sí, como dos embudos en el espacio-tiempo. Si alguien caía en uno de los embudos, saldría expulsado por el extremo del otro sin morir aplastado.

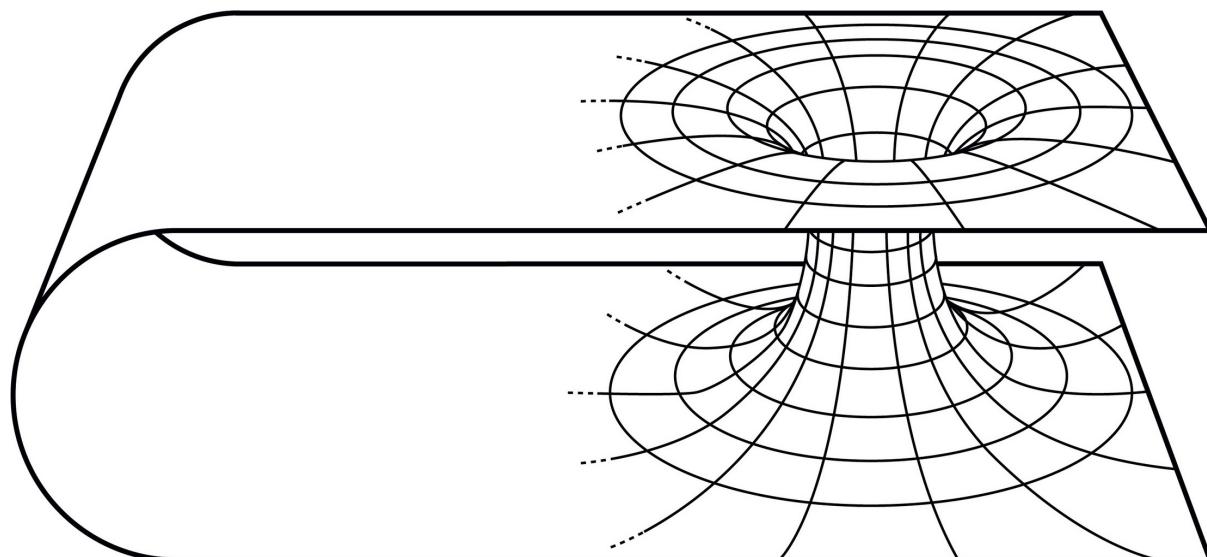


FIGURA 10. En principio, hipotéticamente se podrían alcanzar las estrellas o incluso el pasado viajando a través de un agujero de gusano.

Hay un famoso pasaje en la novela de T. H. White *El rey que fue y será*: «Todo lo que no está prohibido es obligatorio». Los físicos, de hecho, se toman esta afirmación muy en serio. A menos que haya una ley física que rechace un fenómeno, puede que este exista en algún lugar del universo.

Por ejemplo, aunque los agujeros de gusano son notablemente difíciles de crear, algunos físicos han especulado que puede que hayan existido al principio del tiempo y se hayan expandido después del Big Bang. Puede que existan de manera natural y que nuestros telescopios detecten uno algún día en el espacio. Aunque los agujeros de gusano han inflamado la imaginación de los escritores de ciencia ficción, crear uno de verdad en un laboratorio presenta enormes problemas.

Primero, hay que movilizar una inmensa cantidad de energía positiva, comparable a la de un agujero negro, para abrir el portal a través del espacio-tiempo. Solo eso exigiría la tecnología de una civilización muy avanzada, así que de momento no esperamos que un inventor aficionado cree un agujero de gusano en su sótano.

Segundo, de lograrlo, sería inestable y se cerraría por sí solo, a menos que se añada un nuevo y exótico ingrediente, llamado «materia negativa» o «energía negativa», que no tiene nada que ver con la antimateria. La materia y la energía negativas son repulsivas, lo cual puede impedir el colapso del agujero de gusano.

Los físicos no han visto nunca materia negativa. De hecho, obedecería a la antigravedad, con lo que caería hacia arriba, en lugar de hacia abajo. Si hace millones de años hubiera habido materia negativa en la Tierra, habría sido repelida por la gravedad del planeta y habría sido arrojada al espacio exterior. Así que no esperamos encontrar materia negativa en la Tierra.

La energía negativa, en contraste con la materia negativa, sí existe, pero solo en pequeñas cantidades, demasiado pequeñas para tener cualquier valor práctico. Solo una civilización muy avanzada, quizás milenarios por delante de nosotros, sería capaz de dominar una cantidad suficiente de energías positiva y negativa para crear un agujero de gusano e impedir que colapsase.

Tercero, la misma radiación de la gravedad (llamada «radiación de gravitones») podría bastar para provocar la explosión del agujero de gusano.

En última instancia, la respuesta a la pregunta de qué sucede al caer en un agujero negro deberá esperar a una verdadera teoría del todo, en la que tanto la materia como la gravedad estén cuantizadas.

Algunos físicos han propuesto seriamente la polémica idea de que, cuando las estrellas caen en un agujero negro, no son aplastadas en una singularidad, sino que son expulsadas por el otro lado de un agujero de gusano, creando un agujero blanco. Este obedece exactamente a las mismas ecuaciones que un agujero negro, pero tiene la dirección del tiempo invertida, de manera que un agujero blanco escupe materia. Los físicos lo han buscado, hasta ahora sin suerte. Mencionamos estos fenómenos porque, quizá, el Big Bang fuese originalmente un agujero blanco, y todas las estrellas y planetas que vemos en los cielos fueran expulsados de un agujero negro, hace unos catorce mil millones de años.

El caso es que solo una teoría del todo puede decírnos lo que hay al otro lado de un agujero negro. Solo con el cálculo de las correcciones cuánticas para la gravedad podremos responder a las respuestas más complejas suscitadas por los agujeros de gusano.

Pero, si es posible que estos nos lleven algún día instantáneamente al otro lado de la galaxia, ¿pueden también llevarnos al pasado?

## VIAJAR EN EL TIEMPO

**E**l viaje en el tiempo es un tema recurrente de la ciencia ficción desde que H. G. Wells escribió *La máquina del tiempo*. Podemos movernos libremente en tres dimensiones (hacia adelante, a los lados y hacia arriba), así que quizás haya una forma de moverse en la cuarta dimensión, el tiempo. Wells imaginó entrar en una máquina del tiempo, girar un dial y avanzar cientos de miles de años en el futuro, hasta el año 802 701.

Desde entonces, los científicos han estudiado la posibilidad de viajar en el tiempo. Cuando Einstein propuso por primera vez su teoría de la gravedad, en 1915, le preocupaba que sus ecuaciones permitieran retorcer el tiempo de manera que se pudiese llegar al pasado, lo que, según él, indicaría un defecto en la teoría. Pero este molesto problema se convirtió en una posibilidad real en 1949, cuando su vecino en el afamado Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, el gran matemático Kurt Gödel, halló que, si el universo rotaba y se pudiese viajar lo bastante rápido en él, se podía llegar al pasado, es decir, volver antes de haber salido. Einstein quedó atónito ante esta heterodoxa

solución. En sus memorias, llegó finalmente a la conclusión de que, a pesar de que el viaje en el tiempo era posible en el universo de Gödel, esta hipótesis se podía descartar «por razones físicas», lo que se traducía en que el universo se expandía y no rotaba.

Ahora, aunque los físicos aún no están convencidos de la posibilidad de viajar en el tiempo, se toman la cuestión muy seriamente. Se han descubierto diversas soluciones a las ecuaciones de Einstein que dejan la puerta abierta a esta hazaña.

Para Newton, el tiempo era como una flecha que, una vez disparada, proseguiría su camino con velocidad uniforme por el universo. Un segundo en la Tierra era un segundo en cualquier lugar del espacio; los relojes se podían sincronizar en cualquier punto del universo. Para Einstein, sin embargo, el tiempo era más bien como un río. Podía hacerse más rápido o más lento mientras discurría por entre las estrellas y las galaxias; su ritmo podía cambiar a lo largo y ancho del universo. Aun así, esta nueva imagen establecía que podía haber remolinos en el tiempo que nos transportasen al pasado (los físicos los llaman «curvas temporales cerradas»). O puede que el río del tiempo se bifurque en dos afluentes, así que la línea temporal se divide, creando dos universos paralelos.

La fascinación de Hawking por los viajes en el tiempo era tal que planteó un reto a otros físicos. Él creía en la existencia de una ley oculta de la física, aún no hallada, a la que denominó «conjetura de protección cronológica», que descartaba esta posibilidad de una vez por todas. Pero, por mucho que lo intentó, nunca fue capaz de demostrarla. Esto significa que los viajes en el tiempo aún podrían ser coherentes con las leyes de la física, y no habría nada que impidiera la existencia de máquinas del tiempo.

También dijo, en tono irónico, que viajar en el tiempo no era posible, porque «¿dónde están los turistas del futuro?». En cada uno de los acontecimientos históricos importantes debería de haber multitudes de turistas con sus cámaras, apartándose unos a otros a codazos para tratar frenéticamente de sacar la mejor foto del suceso para enseñarla a sus amigos del futuro.

Por el momento, basta con pensar en la confusión que se podría crear con una máquina del tiempo. Retrocediendo, uno podría hacer apuestas sobre el mercado de valores y convertirse en multimillonario. Podría cambiar el curso de los acontecimientos del pasado, sería imposible escribir la historia y los historiadores se quedarían sin trabajo.

Los viajes en el tiempo presentan, desde luego, problemas graves. Son muy numerosas las paradojas lógicas asociadas a esa posibilidad, como, por ejemplo:

- Hacer que el presente sea imposible: si vuelve hacia atrás en el tiempo, se encuentra con su abuelo cuando era niño y lo mata, ¿cómo puede siquiera existir usted?
- Una máquina del tiempo desde ninguna parte: alguien del futuro le revela el secreto de los viajes en el tiempo. Años después, usted vuelve al pasado y le revela el secreto a una versión más joven de sí mismo. Entonces ¿de dónde vino el secreto de los viajes en el tiempo?
- Convertirse en su propia madre: el autor de ciencia ficción Robert Heinlein escribió acerca de convertirse en el propio árbol genealógico. Supongamos que una niña huérfana crece, pero se convierte en un hombre. Este retrocede entonces en el tiempo, se conoce a sí misma y tiene una hija con ella. El hombre lleva entonces a la niña más atrás en el tiempo, la deja en el mismo orfanato y repite el ciclo. Así, ella se convierte en su propia madre, hija, abuela, nieta, etcétera.

En última instancia, la resolución final de todas estas paradojas podía alcanzarse con la formulación de la teoría completa de la gravitación cuántica. Por ejemplo, quizás al entrar en una máquina del tiempo, su línea temporal se divida y cree un universo cuántico paralelo. Digamos que vuelve al pasado para impedir que Abraham Lincoln sea asesinado en el teatro Ford. Entonces, quizás haya salvado al presidente de Estados Unidos, pero en un universo paralelo. Así, el Abraham Lincoln de su universo original sí que murió, y nada podrá cambiarlo. Pero el universo se ha dividido en dos, y ha salvado al presidente Lincoln en un universo paralelo.

Entonces, si asumimos que la línea temporal se puede dividir y generar un universo paralelo, todas las paradojas del viaje en el tiempo pueden resolverse.

La respuesta definitiva a esta cuestión solo podrá hallarse cuando podamos calcular las correcciones cuánticas del gravitón, que hasta ahora hemos ignorado. Los físicos han aplicado la teoría cuántica a las estrellas y a los agujeros de gusano, pero la clave consiste en aplicarla a la propia gravedad a través de los gravitones, lo cual exige una teoría del todo.

Este debate suscita preguntas interesantes. ¿Puede la mecánica cuántica explicar por completo la naturaleza del Big Bang? ¿Y, aplicada a la gravedad, puede dar respuesta a una de las grandes preguntas de la ciencia: qué sucedió antes del Big Bang?

## ¿CÓMO SE CREÓ EL UNIVERSO?

¿De dónde vino el universo? ¿Qué es lo que lo puso en movimiento? Estas son quizá algunas de las más grandes preguntas en teología y en ciencia, y objeto de interminables especulaciones.

Los antiguos egipcios creían que el universo empezó como un huevo cósmico flotando en el Nilo. Algunos pueblos de la Polinesia creían que nació de un coco cósmico. Y los cristianos creen que el universo se puso en marcha cuando Dios dijo: «¡Hágase la luz!».

El origen del universo también ha fascinado a los físicos, en especial cuando Newton nos dio una convincente teoría de la gravitación. Pero, cuando trató de aplicarla al universo que vemos a nuestro alrededor, se tropezó con problemas.

En 1692, Newton recibió una perturbadora carta del clérigo Richard Bentley, en la que le pedía que explicase un defecto oculto, posiblemente nefasto, de su teoría. Si el universo es finito y la gravedad siempre es atractiva y no repulsiva, en última instancia todas las estrellas se verán atraídas las unas hacia las otras. De hecho, si dejamos pasar suficiente tiempo, todas ellas confluirán en una única y gigantesca estrella. Así, un universo finito debería ser inestable y, finalmente, desaparecer. Como esto no sucede, debía de haber algún problema en la teoría de Newton.

Luego sostenía que las leyes de este predecían un universo inestable, aun siendo infinito. En un universo infinito, con un número infinito de estrellas, la suma de todas las fuerzas que tiran de una estrella a diestro y siniestro tendría que ser también infinita. Por tanto, estas fuerzas infinitas acabarían por destruir las estrellas, todas las cuales se desintegrarían.

Newton quedó afectado por esta carta, porque no había pensado en aplicar su teoría a todo el universo. Al final, dio con una respuesta astuta, aunque incompleta, a la cuestión.

Admitía que, en efecto, si la gravedad era siempre atractiva y nunca repulsiva, las estrellas del universo podían ser inestables. Pero en este argumento había una laguna. Supongamos que el universo es, en promedio, totalmente uniforme e infinito en todas direcciones. En un cosmos estático, todas las fuerzas gravitatorias se anulan entre sí, y el universo vuelve a ser estable. Para una estrella cualquiera, las fuerzas gravitatorias de todas las estrellas distantes que actúan sobre ella en diferentes direcciones terminan por sumar cero y, por tanto, el universo no colapsa.

Aunque la solución al problema era ingeniosa, Newton se dio cuenta de que aún había un posible defecto en ella. El universo podía ser uniforme en promedio, pero no podía serlo exactamente en todos los puntos; tenía que haber pequeñas diferencias. Como un castillo de naipes, que parece ser estable, pero que el defecto más minúsculo hará que la estructura interna se derrumbe. Así, Newton fue lo bastante listo para darse cuenta de que un universo infinito uniforme era, de hecho, estable, pero estaba siempre tambaleándose al borde del colapso. En otras palabras, la anulación de fuerzas infinitas debía ser infinitamente precisa o el universo colapsaría o se desintegraría.

Por lo tanto, la conclusión final de Newton fue que el universo era infinito y uniforme en promedio, pero que en ocasiones Dios tiene que hacer un pequeño ajuste en las estrellas, para que no colapsen por la gravedad.

## ¿POR QUÉ ES NEGRO EL CIELO NOCTURNO?

Pero esto generaba un nuevo problema. Si empezamos con un universo infinito y uniforme, entonces, miremos hacia donde miremos en el espacio, acabaremos por tropezarnos con una estrella. No obstante, como el número de estrellas es infinito, ha de haber una cantidad de luz infinita que entra en nuestros ojos procedente de todas las direcciones.

El cielo nocturno debería ser blanco, no negro. Esto se conoce como «paradoja de Olbers».

Algunas de las mejores mentes de la historia han tratado de dar respuesta a esta compleja cuestión. Kepler, por ejemplo, la rechazó al afirmar que el universo era finito, y que, por tanto, no había tal paradoja. Otros han teorizado que las nubes de polvo ocultan la luz de las estrellas (pero esto no explica el problema, porque, en un tiempo infinito, las nubes de polvo empiezan a calentarse y a emitir radiación de cuerpo negro, de forma similar a una estrella. Así, el universo vuelve a ser blanco).

La respuesta definitiva la dio, de hecho, Edgar Allan Poe en 1848. El escritor era aficionado a la astronomía y estaba fascinado por la paradoja, y dijo que el cielo nocturno es negro porque, si viajamos lo bastante atrás en el tiempo, terminamos por encontrar un punto límite, esto es, un principio del

universo. En otras palabras, el cielo nocturno es negro porque la edad del cosmos es finita. No recibimos luz de un pasado infinito, lo que haría que el cielo nocturno fuese blanco, porque el universo nunca ha tenido un pasado infinito. Esto significa que los telescopios que escudriñan las estrellas más lejanas acabarán por alcanzar la negrura del propio Big Bang.

Así que es realmente asombroso que, con el puro pensamiento, sin hacer ningún experimento en absoluto, sea posible alcanzar la conclusión de que el universo ha de haber tenido un principio.

## LA RELATIVIDAD GENERAL Y EL UNIVERSO

**E**instein tuvo que enfrentarse a estas desconcertantes paradojas cuando formuló la relatividad general.

En la década de 1920, cuando el alemán aplicó por primera vez su teoría al propio universo, los astrónomos le dijeron que el cosmos era estático, que no se expandía ni se contraía. Pero Einstein halló algo perturbador en sus ecuaciones. Cuando trató de resolverlas, apuntaban a que el universo era dinámico, que se expandía o se contraía (en aquel momento no se dio cuenta de ello, pero esta era la solución a la pregunta formulada por Richard Bentley. El universo no colapsa bajo su propia gravedad porque está en expansión, sobreponiéndose a su tendencia a ello).

A fin de encontrar un universo estático, Einstein se vio forzado a añadir a sus ecuaciones un factor algo chapucero (llamado «constante cosmológica»). Ajustando a mano el valor de esta, podía anular la expansión o la contracción del universo.

Más tarde, en 1929, el astrónomo Edwin Hubble, con el uso del gigantesco telescopio del observatorio del Monte Wilson, en California, pudo llevar a cabo un sorprendente descubrimiento. El universo, después de todo, se estaba expandiendo, como habían predicho originalmente las ecuaciones de Einstein. Este histórico descubrimiento lo llevó a cabo analizando el efecto Doppler de las galaxias distantes (cuando una estrella se aleja de nosotros, la longitud de onda de su luz se estira y, por tanto, se vuelve ligeramente rojiza. Cuando se mueve hacia nosotros, la longitud de onda se comprime y adquiere un tono algo azulado. Con el análisis cuidadoso de las galaxias, Hubble halló

que, en promedio, estaban desplazadas hacia el rojo y, por tanto, alejándose de nosotros. El universo se expande).

En 1931, Einstein visitó el observatorio del Monte Wilson y se reunió con Hubble. Cuando le dijeron que la constante cosmológica era innecesaria, que después de todo el universo se expandía, el alemán reconoció que esta había sido «su mayor metedura de pata». (En realidad, como veremos, la constante cosmológica ha vuelto a hacer acto de presencia en los últimos años, así que, al parecer, hasta las meteduras de pata abren campos de investigación científica completamente nuevos).

También se pudo llevar este resultado un paso más allá y calcular la edad del universo. Hubble pudo estimar el ritmo al que las galaxias se estaban alejando, por lo que debía ser posible «hacer retroceder la película» y calcular cuánto hace que tiene lugar esta expansión. La respuesta original para la edad del universo resultó ser de mil ochocientos millones de años (un resultado bochornoso, porque se sabía que la Tierra era más vieja, tiene cuatro mil seiscientos millones de años. Por suerte, los últimos datos del satélite Planck estiman la edad del universo en trece mil ochocientos millones de años).

## EL RESPLANDOR CUÁNTICO DESPUÉS DEL BIG BANG

La siguiente revolución en cosmología se produjo cuando los físicos empezaron a aplicar la teoría cuántica al Big Bang. El físico ruso Gueorgui Gámov, suponiendo que el universo se había iniciado como una gigantesca y supercaliente explosión, reflexionó sobre si una parte de aquel calor sobreviviría hasta el presente. Si aplicamos la teoría cuántica al Big Bang, la bola de fuego original debió de haber sido un radiador cuántico de cuerpo negro. Como las propiedades de un cuerpo negro radiante son conocidas, tendría que ser posible calcular la radiación remanente, o eco, del Big Bang.

Utilizando los primitivos experimentos disponibles, en 1948 Gámov y sus colegas Ralph Alpher y Robert Herman calcularon que la temperatura de la radiación remanente del Big Bang debería ser actualmente de cinco grados por encima del cero absoluto (la cifra real es de 2,73 grados Kelvin). Esta es la temperatura del universo después de enfriarse durante miles de millones de años.

Esta predicción fue verificada en 1964, cuando Arno Penzias y Robert Wilson utilizaron el gigantesco radiotelescopio de Holmdel para detectar esta radiación residual en el espacio. (Al principio pensaron que esta radiación de fondo se debía a un defecto en el aparato. Según la leyenda, se dieron cuenta de su error cuando, mientras daban una charla en Princeton, alguien del público dijo: «O han detectado mierda de pájaro, o la creación del universo». Para comprobarlo, tuvieron que limpiar a conciencia todos los excrementos de paloma del radiotelescopio).

Actualmente, esta radiación de fondo de microondas es quizá la prueba más persuasiva y convincente del Big Bang. Como se había predicho, recientes imágenes de satélite muestran una bola de fuego de energía distribuida de manera uniforme en el universo. (Cuando oye interferencias en la radio, parte de ellas vienen realmente del Big Bang).

De hecho, estas imágenes de satélite son ahora tan precisas que es posible detectar minúsculas perturbaciones en la radiación de fondo debidas al principio de incertidumbre cuántica. En el instante de su creación, debió de haber fluctuaciones cuánticas que provocaron esas perturbaciones, pues un Big Bang perfectamente homogéneo habría violado el principio de incertidumbre. Estas perturbaciones también se expandieron para crear las galaxias que vemos a nuestro alrededor. (De hecho, si nuestros satélites no hubieran detectado las perturbaciones cuánticas, su ausencia habría destruido la esperanza de aplicar la teoría cuántica al universo).

Esto nos ofrece un nuevo y relevante panorama de la teoría cuántica. El propio hecho de nuestra existencia en la Vía Láctea, en presencia de otros miles de millones de galaxias, se debe a esas diminutas fluctuaciones cuánticas en el Big Bang. Hace miles de millones de años, todo lo que ahora vemos a nuestro alrededor era un pequeñísimo punto en esta radiación de fondo.

El paso siguiente en la aplicación de la teoría cuántica a la gravedad fue tener en cuenta las lecciones de esta y las del modelo estándar para la relatividad general.

## LA INFLACIÓN

**A**nimados por el éxito del modelo estándar en la década de 1970, los físicos Alan Guth y Andréi Linde se hicieron la siguiente pregunta: ¿podían aplicarse las lecciones aprendidas del modelo estándar y de la teoría cuántica directamente al Big Bang?

Era una duda novedosa, ya que la aplicación del modelo estándar a la cosmología aún no se había investigado. Guth se dio cuenta de que había un par de aspectos enigmáticos en el universo que el Big Bang, tal como se concebía, no podía explicar.

En primer lugar, está el problema de la planitud. La teoría de Einstein afirma que el tejido del espacio-tiempo debería tener una ligera curvatura. Sin embargo, al analizar el universo, este parece ser mucho más plano de lo que predice la relatividad general. De hecho, parece ser totalmente plano, dentro del error experimental.

En segundo lugar, el universo es mucho más uniforme de lo esperado. En el Big Bang, debería haber habido irregularidades e imperfecciones en la bola de fuego original. Pero, en cambio, el universo parece ser bastante uniforme, miremos hacia donde miremos.

Ambas paradojas se pueden resolver recurriendo a la teoría cuántica, mediante un fenómeno al que Guth denominó «inflación». Según esta imagen, el universo sufrió primero una expansión ultraacelerada, mucho más rápida de lo que se había postulado en un principio para el Big Bang. En esencia, esta fantástica expansión aplanó el universo y eliminó la curvatura que tuviera originalmente.

En segundo lugar, el universo primordial podría haber sido irregular, pero una parte muy pequeña del mismo era uniforme y se infló hasta alcanzar un tamaño enorme. Eso explicaría por qué el universo parece ser tan monótono actualmente: porque descendemos de un minúsculo fragmento uniforme de la bola de fuego original.

El alcance de las implicaciones de la inflación es grande. Significa que el universo visible a nuestro alrededor es, en realidad, una parte muy reducida, infinitesimal, de un universo mucho mayor, que no veremos nunca porque está demasiado lejos.

Pero ¿qué es lo que causó, para empezar, la inflación? ¿Qué fue lo que la puso en marcha? ¿Por qué se expandió el universo? Guth se inspiró entonces en el modelo estándar. En la teoría cuántica, se empieza con una simetría, que luego se rompe con el bosón de Higgs para obtener el universo que vemos a nuestro alrededor. Así, de manera similar, Guth teorizó que quizás hubiera un nuevo tipo de bosón de Higgs (denominado «inflatón») que hacía posible la

inflación. Como en el caso de la partícula de Dios original, el universo empezó en el falso vacío, que desembocó en la era de la rápida inflación. Pero entonces aparecieron las burbujas cuánticas dentro del campo del inflatón. En el interior de nuestra burbuja afloró el verdadero vacío, en el que la inflación se había detenido. Nuestro universo surgió como una de estas burbujas; se ralentizó dentro de ella, dándonos la expansión actual.

Hasta ahora, la inflación parece ajustarse bien a los datos astronómicos. Actualmente, es la teoría más destacada, pero ha tenido consecuencias inesperadas: si recurrimos a la teoría cuántica, significa que el Big Bang puede suceder una y otra vez. Nuevos universos pueden nacer continuamente a partir del nuestro.

Esto implica que nuestro universo es, en realidad, una única burbuja en un baño de burbujas de universos. Esto crea un multiverso de universos paralelos, y una molesta cuestión sigue abierta: ¿qué es lo que impulsó la inflación en un principio? Esto requiere, como veremos en el próximo capítulo, una teoría aún más avanzada, una teoría del todo.

## EL UNIVERSO DESBOCADO

La relatividad general no solo nos ofrece un conocimiento sin precedentes del principio del universo, sino también una imagen de su destino final. Las religiones antiguas, desde luego, nos han dado desoladoras perspectivas del desenlace de los tiempos. Los remotos vikingos creían que el mundo acabaría en el Ragnarok, o el crepúsculo de los dioses, cuando una gigantesca tempestad de nieve sepultase todo el planeta y los dioses luchasen la batalla definitiva contra sus enemigos celestiales. Para los cristianos, el libro del Apocalipsis pronostica desastres, cataclismos y la llegada de los cuatro jinetes, que precede al segundo advenimiento.

Pero, para un físico, hay tradicionalmente dos formas en las que todo puede acabar. Si la densidad del universo es baja, no hay gravedad suficiente procedente de las estrellas y las galaxias para invertir la expansión cósmica, que seguirá su curso por siempre y el universo sufrirá un Big Freeze, una muerte térmica. Las estrellas terminarán por agotar todo su combustible

nuclear y el cielo se oscurecerá, incluso los agujeros negros se evaporarán. El universo acabará en un mar superfrío de partículas subatómicas a la deriva.

Y si el universo es lo bastante denso, la gravedad de las estrellas y las galaxias podría bastar para invertir la expansión cósmica. En ese caso, todas ellas terminarían por colapsar en un Big Crunch, momento en que las temperaturas se disparen y devoren toda la vida en el universo. (Algunos físicos han conjeturado incluso que el cosmos podría experimentar un nuevo Big Bang, creando así un universo oscilante).

Pero, en 1998, los astrónomos efectuaron un anuncio impactante, que echó por tierra muchas de nuestras creencias más preciadas y nos obligó a revisar los libros de texto. Analizando distantes supernovas por doquier, hallaron que la expansión del universo no se estaba ralentizando, como se había pensado anteriormente, sino que, en realidad, se estaba acelerando. De hecho, se estaba desbocando.

Tuvieron que revisar las dos hipótesis anteriores, y surgió una nueva teoría. Quizá el universo morirá en algo llamado Big Rip, en el que la expansión se acelera hasta una velocidad vertiginosa. El universo se expandirá tan rápido que el cielo nocturno se volverá completamente negro (ya que la luz de las estrellas cercanas no podrá alcanzarnos) y las temperaturas se aproximarán al cero absoluto.

En estas condiciones, la vida no es posible; incluso las moléculas en el espacio exterior pierden su energía.

Lo que podría estar impulsando esta expansión desbocada es algo que Einstein había desecharo una vez, en la década de 1920: la constante cosmológica, la energía del vacío, denominada ahora «energía oscura». Inesperadamente, la cantidad de energía oscura en el espacio es enorme; más del 68,3 por ciento de toda la materia y energía del universo se encuentra en esta misteriosa forma. (En conjunto, la energía y la materia oscuras constituyen la mayor parte de la materia y la energía, pero son dos entidades distintas y no deben confundirse entre sí).

Curiosamente, ninguna teoría conocida puede explicar esto. Si se intenta calcular a ciegas la cantidad de energía oscura del universo (empleando las hipótesis de la relatividad y la teoría cuántica), ¡se halla un valor que es  $10^{120}$  (un 1 seguido de 120 ceros) veces mayor que el real!

Esta es la discordancia más grande de la historia de la ciencia, y lo que está en juego es fundamental: nada más y nada menos que el destino final del universo.

Esto podría decírnos cómo va a morir el universo.

## SE BUSCA: EL GRAVITÓN

**A**unque la investigación sobre la relatividad general estuvo estancada durante décadas, la reciente introducción a esta del cuanto ha abierto nuevas e inesperadas perspectivas, especialmente con la construcción de novedosos y potentes instrumentos. Ha aumentado el número de nuevas investigaciones.

Pero hasta ahora solo hemos hablado de aplicar la mecánica cuántica a la materia que se mueve dentro de los campos gravitatorios de la teoría de Einstein. No hemos hablado de una cuestión mucho más compleja: aplicar la mecánica cuántica a la propia gravedad en forma de gravitones.

Y aquí es donde nos tropezamos con el mayor de los problemas: hallar una teoría cuántica de la gravedad, algo que ha frustrado a los mejores físicos del mundo durante décadas. Así que vamos a repasar lo que sabemos hasta ahora. Recordemos que, al aplicar la teoría cuántica a la luz, introducimos el fotón, una partícula de luz. Cuando este se mueve, está rodeado por los campos eléctrico y magnético, que oscilan y penetran en el espacio, y cumplen las ecuaciones de Maxwell. Esta es la razón por la que la luz tiene propiedades de partícula y de onda. El poder de las ecuaciones de Maxwell reside en sus simetrías; esto es, la capacidad de convertir el campo eléctrico en el magnético, y viceversa.

Cuando el fotón choca con los electrones, la ecuación que describe esta interacción devuelve resultados infinitos. Sin embargo, si usamos los artificios ideados por Feynman, Schwinger, Tomonaga y otros muchos, podemos ocultarlos todos. La teoría resultante se denomina QED. A continuación, aplicamos este método a la fuerza nuclear. Sustituimos el campo de Maxwell original por el campo de Yang-Mills y el electrón, por una serie de quarks, neutrinos, etcétera. Después, introdujimos un nuevo conjunto de artificios desarrollados por 'T Hooft y sus colegas a fin de eliminar los infinitos de nuevo.

Así, tres de las cuatro fuerzas del universo podían unificarse en una sola teoría, el modelo estándar. Esta no era lo que se dice bonita, ya que se creó remendando las simetrías de las fuerzas fuerte, débil y electromagnética, pero funcionaba. No obstante, al aplicar a la gravedad este método comprobado, nos encontramos con problemas.

En teoría, la partícula de la gravedad se debería llamar «gravitón». De manera similar al fotón, es una partícula puntual y se desplaza a la velocidad

de la luz, por lo que está rodeada por ondas gravitatorias que obedecen las ecuaciones de Einstein.

Hasta ahora, bien. El problema aparece cuando el gravitón choca con otros gravitones y también con átomos: la colisión resultante crea respuestas infinitas. Cuando se intentan aplicar los trucos trabajosamente formulados durante los últimos setenta años, nos encontramos con que todos ellos fracasan. Las mejores mentes del siglo han intentado resolver este problema, pero ninguna lo ha logrado.

Está claro que se debe utilizar un enfoque totalmente nuevo, ya que todas las ideas fáciles ya se han investigado y desecharido. Necesitamos algo novedoso y original de verdad. Y eso nos lleva a la que quizá sea la teoría más polémica de la física, la teoría de cuerdas, que podría ser lo bastante disparatada como para suponer la teoría del todo.

## 6

# EL AUGE DE LA TEORÍA DE CUERDAS: PROMESAS Y PROBLEMAS

**C**on anterioridad hemos visto que, alrededor del año 1900, había dos grandes pilares de la física: la ley de la gravitación de Newton y las ecuaciones de la luz de Maxwell. Einstein observó que estaban reñidos entre sí. Uno de los dos iba a tener que derrumbarse. La caída de la mecánica de Newton puso en marcha las grandes revoluciones científicas del siglo xx.

Actualmente, la historia podría estar repitiéndose. De nuevo hay dos grandes pilares de la física. Por un lado, tenemos la teoría de lo muy grande, la teoría de la gravitación de Einstein, que nos da los agujeros negros, el Big Bang y el universo en expansión. Por el otro, tenemos la teoría de lo muy pequeño, la teoría cuántica, que explica la conducta de las partículas subatómicas. El problema es que están en conflicto mutuo. Se basan en dos principios, dos matemáticas y dos filosofías diferentes.

Nuestra esperanza es que la próxima gran revolución sea la unificación de estos dos pilares.

## LA TEORÍA DE CUERDAS

**T**odo empezó en 1968, cuando dos jóvenes físicos, Gabriele Veneziano y Mahiko Suzuki, estaban hojeando libros de matemáticas y se tropezaron con una extraña fórmula hallada por Leonhard Euler en el siglo XVIII. ¡Aquella singular ecuación parecía describir la dispersión de dos partículas

subatómicas! ¿Cómo era posible que una fórmula abstracta del siglo XVIII describiese los últimos resultados de nuestros aparatos rompeátomos? Se suponía que la física no funcionaba así.

Más tarde, otros físicos, entre ellos Yoichiro Nambu, Holger Nielsen y Leonard Susskind, se dieron cuenta de que las propiedades de esta fórmula representaban la interacción de dos cuerdas. Muy rápidamente, la generalizaron en todo un ejército de ecuaciones, que representaban la dispersión de multicuerdas (de hecho, en esto consistió mi tesis doctoral, en calcular el conjunto completo de interacciones en un número arbitrario de cuerdas). Con eso, los investigadores pudieron introducir las partículas con espín en la teoría de cuerdas.

La teoría de cuerdas era como un pozo de petróleo del que de pronto manaban ecuaciones a borbotones. (Personalmente, aquello no me gustaba, porque, desde Faraday, la física había estado representada por campos que condensaban de manera concisa grandes volúmenes de información. La teoría de cuerdas, en cambio, no era más que un conjunto de ecuaciones inconexas. Mi colega Keiji Kikkawa y yo fuimos capaces de reescribirla toda en el lenguaje de los campos, creando así lo que se conoce como «teoría de campo de cuerdas»<sup>[1]</sup>. Toda la teoría de cuerdas se puede resumir, mediante nuestras ecuaciones, en una sola ecuación de poco más de dos centímetros).

Como resultado del torrente de ecuaciones, una nueva imagen estaba empezando a surgir. ¿Por qué había tantas partículas? Como Pitágoras hace más de dos mil años, la teoría decía que cada nota musical —cada vibración de una cuerda— representaba una partícula. Los electrones, los quarks y las partículas de Yang-Mills no eran más que distintas notas en la misma cuerda.

Lo más convincente e interesante de esta teoría es que la gravedad queda necesariamente incluida. Sin hipótesis adicionales, el gravitón surge como una de las vibraciones más bajas de la cuerda. De hecho, aunque Einstein no hubiera nacido, toda su teoría de la gravitación podría haberse hallado con solo examinar la vibración más baja de la cuerda.

Como dijo una vez el físico Edward Witten: «La teoría de cuerdas es extremadamente atractiva, porque la gravedad se nos impone. Todas las teorías de cuerdas coherentes conocidas incluyen la gravedad, de manera que, aunque esta es imposible en la teoría de campos cuántica tal como la conocemos, es obligatoria en la teoría de cuerdas».

## DIEZ DIMENSIONES

**S**in embargo, a medida que la teoría evolucionaba, empezaron a revelarse rasgos cada vez más fantásticos e inesperados. Por ejemplo, se halló que la teoría ¡solo podía existir en diez dimensiones!

Esto supuso una sorpresa para los físicos, porque nadie había visto nunca nada parecido. Por lo general, cualquier teoría se puede expresar en las dimensiones que uno quiera. Lo que hacemos es simplemente descartar las demás, porque es obvio que vivimos en un mundo tridimensional (solo podemos movernos hacia adelante, de lado, arriba y abajo. Si sumamos el tiempo, se necesitan cuatro dimensiones para ubicar cualquier suceso en el universo. Si queremos encontrarnos con alguien en Manhattan, por ejemplo, podríamos quedar en la esquina de la Quinta Avenida y la calle Cuarenta y dos, en el décimo piso, a mediodía. No obstante, movernos en más de cuatro dimensiones es imposible para nosotros, por mucho que lo intentemos. De hecho, nuestro cerebro no puede siquiera visualizar cómo sería movernos en dimensiones superiores. Por tanto, todas las investigaciones que se llevan a cabo en la teoría de cuerdas de más dimensiones son matemáticas puras).

Pero en la teoría de cuerdas, la dimensionalidad del espacio-tiempo está fijada en diez dimensiones. La teoría deja de funcionar matemáticamente con otras dimensiones.

Aún recuerdo el asombro de los físicos al conocer que la teoría de cuerdas postulaba que vivimos en un universo de diez dimensiones. La mayoría lo vio como prueba de que estaba equivocada. Un día en que John Schwarz, uno de los principales arquitectos de la teoría de cuerdas, estaba en el ascensor de Caltech, Richard Feynman lo abordó y le preguntó: «Bueno, John, ¿en cuántas dimensiones estás hoy?».

Y, sin embargo, con el paso de los años, los físicos empezaron a demostrar poco a poco los errores fatales de todas las teorías rivales. Por ejemplo, muchas podían descartarse porque sus correcciones cuánticas eran infinitas o anómalas (es decir, incoherentes desde el punto de vista matemático).

Así, con el tiempo, los físicos empezaron a habituarse a la idea de que quizá nuestro universo podía tener, después de todo, diez dimensiones. Al final, en 1984, John Schwarz y Michael Green demostraron que la teoría de cuerdas carecía de todos los problemas que habían sufrido las anteriores candidatas a una teoría del campo unificado.

Si la teoría de cuerdas es correcta, el universo podría haber tenido, al principio, diez dimensiones. Pero era un espacio inestable, y seis de estas dimensiones, en cierto modo, se contrajeron y se hicieron demasiado pequeñas para ser observables. Así, nuestro universo podría realmente tener diez dimensiones, pero nuestros átomos son demasiado grandes para penetrar en esas minúsculas magnitudes superiores.

## EL GRAVITÓN

**A** pesar de lo descabellado de la teoría de cuerdas, uno de los aspectos que la ha mantenido con vida es que combina satisfactoriamente los dos grandes pilares de la física, la relatividad general y la teoría cuántica, ofreciéndonos una teoría finita de la gravitación cuántica. De ahí viene todo el entusiasmo.

Anteriormente hemos mencionado que, si se añaden correcciones cuánticas a la QED o a la partícula de Yang-Mills, se obtiene un aluvión de infinitos que deben ser eliminados de forma muy cuidadosa y tediosa.

Pero todo esto falla si tratamos de unir a la fuerza las dos grandes teorías de la naturaleza, la de la relatividad y la cuántica. Cuando aplicamos el principio cuántico a la gravedad, nos vemos obligados a dividirla en paquetes de energía, o cuantos, denominados «gravitones». A continuación, calculamos la colisión de estos gravitones con otros gravitones y con la materia, como el electrón. Pero, al hacerlo, el conjunto de trucos hallados por Feynman y 'T Hooft fracasa estrepitosamente: las correcciones cuánticas provocadas al interactuar entre los gravitones son infinitas, y desafían todos los métodos hallados por anteriores generaciones de físicos.

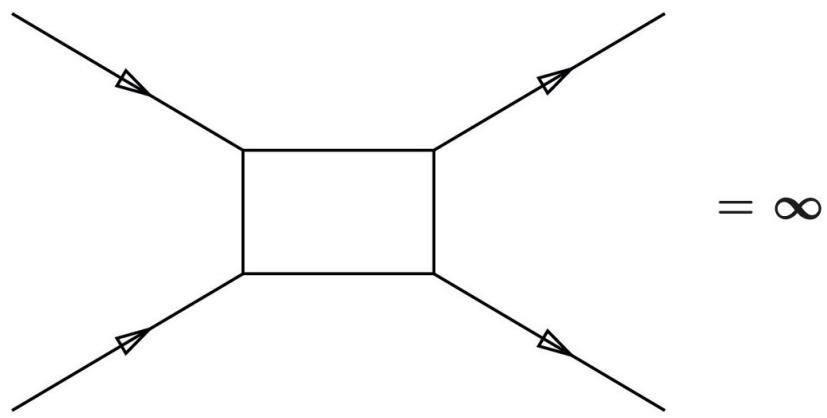
Y aquí es donde aparece el siguiente truco de magia. La teoría de cuerdas puede eliminar estos problemáticos infinitos, que llevan casi un siglo perturbando a los físicos. Y esta magia sucede, una vez más, gracias a la simetría.

## LA SUPERSIMETRÍA

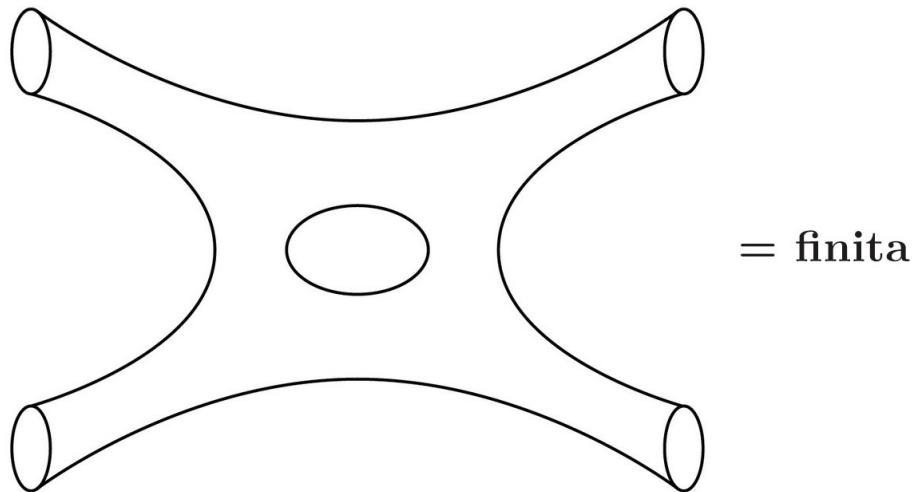
Por costumbre, siempre se había considerado bello que las ecuaciones fueran simétricas, pero se trataba de un lujo que no era estrictamente necesario. Sin embargo, en la teoría cuántica, la simetría se convierte en el rasgo más importante de la física.

Como ya hemos establecido, al calcular las correcciones cuánticas de una teoría, con frecuencia estas son divergentes (esto es, infinitas) o anómalas (es decir, que violan la simetría original de la teoría). En las últimas décadas, los físicos se han dado cuenta de que la simetría no es únicamente un rasgo agradable de una teoría, sino que en realidad es el ingrediente fundamental. A menudo, exigir que una teoría sea simétrica puede eliminar las divergencias y las anomalías que afectan a aquellas no simétricas. La simetría es la espada que los físicos utilizan para vencer a los dragones desatados por las correcciones cuánticas.

Como ya hemos mencionado, Dirac encontró que su ecuación para el electrón predecía que tendría espín (una característica matemática de las ecuaciones que es similar a la rotación que vemos a nuestro alrededor). Más tarde, los físicos hallaron que todas las partículas subatómicas tienen espín. Pero los hay de dos tipos.



**Dos gravitones colisionan**



**Dos cuerdas colisionan**

FIGURA 11. Al calcular la colisión de dos gravitones (*arriba*), la respuesta es infinita y, por tanto, no tiene sentido. Pero cuando dos cuerdas colisionan (*abajo*) tenemos dos términos, uno de los bosones y otro de los fermiones. En la teoría de cuerdas, ambos se anulan exactamente, lo que ayuda a crear una teoría finita de la gravitación cuántica.

En ciertas unidades cuánticas, el espín puede ser entero (como 0, 1 o 2) o semientero (como  $\frac{1}{2}$  o  $\frac{3}{2}$ ). En primer lugar, las partículas que tienen espín entero describen las fuerzas del universo. Entre ellas se encuentran el fotón y la partícula de Yang-Mills (con espín 1) y la partícula de la gravedad, el gravitón (con espín 2). Las de este tipo se denominan «bosones» (por el físico hindú Satyendra Nath Bose). Así, los mediadores de las fuerzas de la naturaleza son los bosones.

Luego están las partículas que constituyen la materia del universo. Tienen espín semientero, como los electrones, los neutrinos y los quarks (con espín

$\frac{1}{2}$ ). Las de este tipo se denominan «fermiones» (por Enrico Fermi) y, a partir de ellas, podemos construir las otras partículas del átomo: los protones y los neutrones. Así, los átomos de nuestro cuerpo son conjuntos de fermiones.

## DOS TIPOS DE PARTÍCULAS SUBATÓMICAS

FERMIONES (MATERIA)

electrón, quark,  
neutrino, protón

BOSONES (FUERZAS)

fotón, gravitón,  
Yang-Mills

**B**unji Sakita y Jean-Loup Gervais demostraron poco después que la teoría de cuerdas poseía un nuevo tipo de simetría llamado «supersimetría». Desde entonces, esta característica se ha ampliado, y es ahora la mayor de las simetrías nunca hallada en física. Como hemos destacado, la simetría es sinónimo de belleza para un físico, y nos permite hallar el vínculo entre diferentes partículas. Todas las del universo podrían, pues, unificarse mediante la supersimetría. Ya hemos dicho que una simetría permite reorganizar los componentes de un objeto y dejarlo inalterado. Aquí, estamos reorganizando las partículas de nuestras ecuaciones de manera que los fermiones se intercambian por bosones, y viceversa. Esto se convierte en el punto central de la teoría de cuerdas, así que todas las partículas del universo se pueden sustituir unas por otras.

Esto significa que cada partícula tiene una supercompañera, o «spartícula». Por ejemplo, la superpartícula del electrón se llama «selectrón»; la del quark, «squark»; y la del leptón (como el electrón o el neutrino) se denomina «sleptón».

Pero en la teoría de cuerdas sucede algo extraordinario; al calcular sus correcciones cuánticas, hay dos aportaciones independientes: las que proceden de los fermiones y las de los bosones. Milagrosamente, miden lo mismo, pero ocurren con signo opuesto. Un término puede tener un signo positivo, pero hay otro que es negativo. De hecho, cuando se suman, se anulan entre sí, dejando un resultado finito.

El matrimonio entre la relatividad y la teoría cuántica ha estado casi un siglo perturbando a los físicos, pero la simetría entre fermiones y bosones, denominada «supersimetría», nos permite anular muchos de estos infinitos entre sí. Los expertos no tardaron en descubrir otros medios de eliminarlos para obtener un resultado finito. Así, este es el origen de toda la conmoción que rodea a la teoría de cuerdas: puede unificar la gravedad y la teoría cuántica. Ninguna otra teoría puede afirmar una cosa así. Esto podría satisfacer la objeción original de Dirac, que odiaba la teoría de renormalización porque, a pesar de sus fantásticos e innegables éxitos, implicaba la adición y sustracción de cantidades infinitas. Aquí vemos que la teoría de cuerdas es finita por sí misma, sin renormalización.

Esto podría, a su vez, satisfacer la imagen originalmente propuesta por el propio Einstein. Este comparó una vez su teoría de la gravitación con el mármol, que es suave, elegante y pulido. La materia, en cambio, era más como la madera. El tronco de un árbol está retorcido y es caótico, rugoso, sin un patrón geométrico regular. Su objetivo era crear, en última instancia, una teoría unificada que combinase el mármol y la madera en una única forma, una teoría hecha completamente de mármol. Ese era su sueño.

La teoría de cuerdas puede completar este panorama. La supersimetría es un tipo de simetría que puede transformar el mármol en madera, y viceversa. Se convierten ambos en dos caras de la misma moneda. En esta imagen, el mármol está representado por los bosones; la madera, por los fermiones. A pesar de que no hay pruebas experimentales de la supersimetría en la naturaleza, es algo tan elegante y bello que ha captado la imaginación de la comunidad de la física.

Como dijo una vez Steven Weinberg: «Aunque las simetrías están ocultas para nosotros, podemos percibir que están latentes en la naturaleza, controlándolo todo. Es la idea más apasionante que conozco, la de que la naturaleza es mucho más simple de lo que parece. No hay nada que me inspire más esperanza que la idea de que nuestra generación de seres humanos pueda tener en las manos la clave del universo; que, quizás a lo largo de nuestra vida, podamos saber por qué todo aquello que vemos en este inmenso universo de galaxias y partículas es lógicamente inevitable»<sup>[2]</sup>.

En resumen, ahora vemos que la simetría puede ser la clave para unificar todas las leyes del universo, debido a diversos logros extraordinarios:

- La simetría convierte en orden el desorden. La tabla de Mendeléyev y el modelo estándar pueden conferir organización y simetría al caos de elementos químicos y partículas subatómicas.

- La simetría ayuda a completar los huecos. Permite aislar las lagunas de estas teorías y, así, predecir la existencia de nuevos elementos y partículas subatómicas.
- La simetría unifica objetos de lo más inesperados y aparentemente sin relación entre ellos. Gracias a ella se encuentra el vínculo entre espacio y tiempo, materia y energía, electricidad y magnetismo, así como entre fermiones y bosones.
- La simetría revela fenómenos inesperados. Predijo la existencia de nuevos fenómenos como la antimateria, el espín y los quarks.
- La simetría elimina las consecuencias no deseadas que pueden destruir la teoría. Las correcciones cuánticas suelen acarrear desastrosas divergencias y anomalías que esta característica puede eliminar.
- La simetría altera la teoría clásica original. Las correcciones cuánticas de la teoría de cuerdas son tan rigurosas que, de hecho, modifican la teoría original, fijando la dimensionalidad del espacio-tiempo.

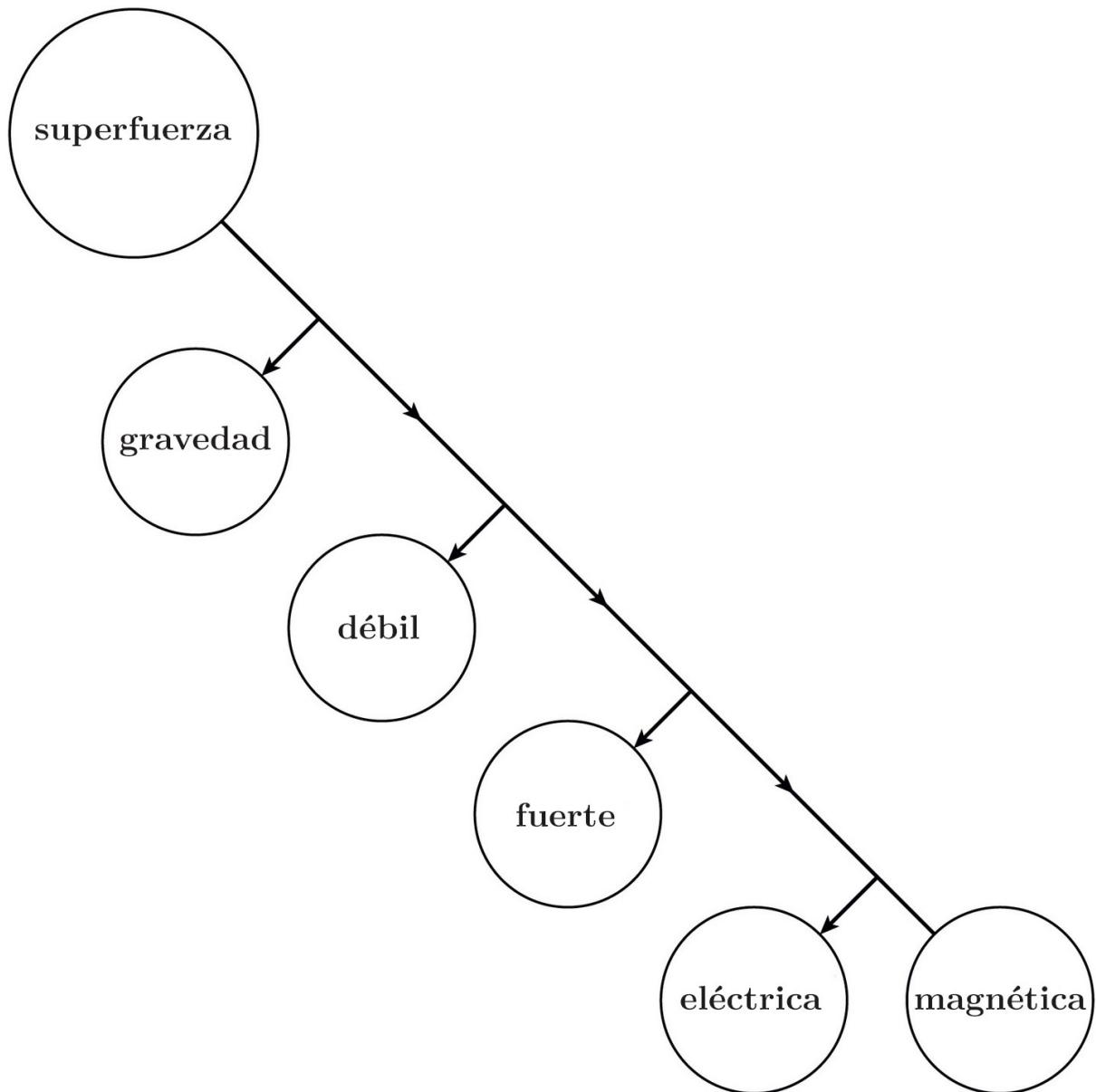


FIGURA 12. Se cree que, al principio del tiempo, había una única superfuerza cuya simetría incluía todas las partículas del universo. Pero esta era inestable, y la simetría se empezó a romper. La primera que se separó fue la gravedad. Luego la siguieron la fuerza nuclear fuerte y la débil, y quedó la fuerza electromagnética. Así, el universo actual parece roto, y todas las fuerzas son diferentes entre sí. Es trabajo de los físicos volver a montar las piezas en una única fuerza.

La teoría de supercuerdas saca partido de todos estos rasgos. Su simetría es la supersimetría (aquella que puede intercambiar bosones y fermiones). Esta, a su vez, es la mayor simetría nunca hallada en la física, capaz de unificar todas las partículas conocidas del universo.

## LA TEORÍA M

**A**ún tenemos que completar el último paso de la teoría de cuerdas y encontrar sus principios físicos fundamentales; esto es, aún no comprendemos cómo derivarla toda de una sola ecuación. En 1995 hubo una convulsión cuando la teoría de cuerdas sufrió una nueva metamorfosis y surgió una nueva de ella, la llamada «teoría M». El problema con la teoría de cuerdas original era que había cinco versiones distintas de la gravedad cuántica, cada una de ellas finita y bien definida. Estas tenían un aspecto muy similar entre ellas, salvo por sus espines, que estaban organizados de forma ligeramente distinta. Hubo gente que empezó a preguntar: ¿por qué tiene que haber cinco? La mayor parte de físicos pensaba que el universo tenía que ser único.

Edward Witten halló que, en realidad, había una teoría de once dimensiones oculta, denominada «teoría M», basada en membranas (como las superficies de esferas o de rosquillas) y no solo en cuerdas. Fue capaz de explicar por qué había cinco teorías de cuerdas distintas: había cinco formas en las que condensar una membrana de once dimensiones en una cuerda de diez.

En otras palabras, las cinco versiones de la teoría de cuerdas eran representaciones matemáticas diferentes de la misma teoría M (así, tanto una como otra son, en realidad, la misma teoría, salvo que la teoría de cuerdas es una reducción de la teoría M, de once dimensiones a diez). Pero ¿cómo podía una teoría de once dimensiones dar lugar a cinco teorías de diez?

Pensemos, por ejemplo, en una pelota de playa. Si dejamos escapar el aire, la bola se encoge y se parece, cada vez más, a una salchicha. Si dejamos salir aún más aire, la salchicha se convierte en una cuerda. De ahí que una cuerda sea, en realidad, una membrana camuflada, de la que se ha dejado escapar el aire.

Con una pelota de playa de once dimensiones se puede demostrar matemáticamente que hay cinco formas en las que esta puede encogerse hasta convertirse en una cuerda de diez dimensiones.

O pensemos en la narración del ciego que se encuentra por primera vez con un elefante. Un sabio, al tocar la oreja del animal, afirma que este es plano y bidimensional, como un abanico. Otro sabio toca la cola y asume que el elefante es como una soga o una cuerda unidimensional. Otro, tocándole una pata, concluye que el paquidermo es como un tambor o cilindro tridimensional. Pero, en realidad, si retrocedemos hasta la tercera dimensión,

podemos ver el elefante como un animal tridimensional. De la misma forma, las cinco teorías de cuerdas distintas son como la oreja, la cola y la pata, pero aún nos falta revelar el elefante completo, la teoría M.

## EL UNIVERSO HOLOGRÁFICO

Como hemos mencionado, con el tiempo se han ido revelando nuevos niveles de la teoría de cuerdas. La teoría M se propuso en 1995, y dos años después Juan Maldacena hizo otro asombroso descubrimiento<sup>[3]</sup>.

Causó una sacudida en toda la comunidad de físicos al demostrar algo que había sido considerado imposible: que una teoría de Yang-Mills supersimétrica, que describe la conducta de las partículas subatómicas en cuatro dimensiones, era dual, o matemáticamente equivalente, a cierta teoría de cuerdas en diez dimensiones. Esto causó un tremendo alboroto en el mundo de la física. En 2015, el artículo estaba referenciado en otros diez mil, lo que lo convertía en el artículo más influyente, de lejos, de la física de altas energías. (La simetría y la dualidad están relacionadas, pero son distintas. La primera surge cuando, al reorganizar los componentes de una única ecuación, esta sigue siendo la misma. La segunda surge cuando demostramos que dos teorías diferentes por completo son, en realidad, matemáticamente equivalentes. Lo más increíble es que la teoría de cuerdas tiene ambos rasgos, en absoluto triviales).

Como hemos visto, las ecuaciones de Maxwell tienen una dualidad entre los campos eléctrico y magnético; es decir, son las mismas si invertimos ambos campos, y convertimos los eléctricos en magnéticos (podemos ver este comportamiento matemáticamente, porque las ecuaciones del electromagnetismo contienen con frecuencia términos como  $E^2 + B^2$ , que son iguales si se cambia un campo por el otro, como en el teorema de Pitágoras). De manera similar, hay cinco teorías de cuerdas distintas en diez dimensiones, y se puede demostrar que son duales entre sí, por lo que son, en realidad, una única teoría M de once dimensiones camuflada. Así que, increíblemente, la dualidad muestra que dos teorías diferentes son, en realidad, dos aspectos de la misma teoría.

Maldacena, no obstante, demostró que aún había otra dualidad entre la teoría de cuerdas, en diez dimensiones, y la teoría de Yang-Mills, en cuatro dimensiones. Se trataba de una novedad muy inesperada, pero con enormes implicaciones. Significaba que había conexiones profundas y no previstas entre la fuerza gravitatoria y la fuerza nuclear definidas en dimensiones del todo diferentes.

Por lo general, se pueden hallar dualidades entre cuerdas en la misma dimensión. Al reorganizar los términos que describen estas cuerdas, por ejemplo, con frecuencia podemos cambiar una teoría de cuerdas por otra. Esto crea una maraña de dualidades entre diferentes teorías de cuerdas, todas ellas definidas en la misma dimensión. Pero una dualidad entre dos objetos definidos en dimensiones diferentes era algo nunca visto.

Esta no es una cuestión puramente teórica, porque tiene profundas implicaciones en la comprensión de la fuerza nuclear. Por ejemplo, antes habíamos visto cómo la teoría de gauge en cuatro dimensiones nos da la mejor descripción de la fuerza nuclear al estar representada por el campo de Yang-Mills, pero nadie ha logrado hallar una solución exacta a este. Sin embargo, como la teoría de gauge en cuatro dimensiones podría ser dual de la teoría de cuerdas en diez dimensiones, esto significaba que la gravedad cuántica podía representar la clave para la fuerza nuclear. Se trataba de una revelación asombrosa, porque implicaba que la teoría de cuerdas podía describir mejor los rasgos básicos de la fuerza nuclear (como calcular la masa del protón).

Esto provocó cierta crisis de identidad entre los físicos. Los que trabajan exclusivamente en la fuerza nuclear se pasan todo el tiempo estudiando objetos tridimensionales, como protones y neutrones, y con frecuencia se burlan de los colegas que teorizan en más dimensiones. No obstante, con esta nueva dualidad entre gravedad y teoría de gauge, de pronto estos físicos se hallaban tratando de aprenderlo todo sobre teoría de cuerdas en diez dimensiones, que podría representar la clave para entender la fuerza nuclear en cuatro dimensiones.

Esta extraña dualidad aún nos tenía reservado otro acontecimiento inesperado, denominado «principio holográfico». Los hologramas son láminas de plástico bidimensionales que han sido especialmente codificadas con la imagen de un objeto tridimensional. Al iluminar una con un rayo láser, esta imagen aparece de pronto. En otras palabras, toda la información necesaria para crear una imagen tridimensional ha sido codificada en una lámina plana, bidimensional, con el uso de láseres, como la imagen de la

princesa Leia proyectada por R2-D2 o la mansión encantada de Disneylandia, en la que fantasmas tridimensionales flotan a nuestro alrededor.

Este principio también funciona para los agujeros negros. Como vimos antes, si tiramos una enciclopedia a un agujero negro, la información contenida en los libros no puede desaparecer, según la mecánica cuántica. Pero ¿adónde va entonces toda ella? Una teoría postula que se distribuye en la superficie del horizonte de sucesos del agujero negro. Así, la superficie (que es bidimensional) de un agujero negro contiene toda la información de todos los objetos tridimensionales que han caído en él.

Esto tiene también implicaciones en nuestra concepción de la realidad. Estamos convencidos, desde luego, de que somos objetos tridimensionales que pueden moverse en el espacio, definido por tres números: longitud, anchura y altura. Pero puede que esto sea una ilusión y quizás vivamos en un holograma.

Puede que el mundo tridimensional que experimentamos no sea más que una sombra del mundo real, que, en realidad, tiene diez u once dimensiones. Cuando nos movemos en las tres dimensiones del espacio, es, en realidad, nuestra verdadera identidad moviéndose en diez o en once dimensiones. Cuando caminamos por la calle, nuestra sombra nos sigue y se mueve como nosotros, salvo que la sombra existe en dos dimensiones. Del mismo modo, quizás nosotros seamos sombras tridimensionales, pero nuestra verdadera identidad se esté moviendo en diez o en once dimensiones.

En resumen, vemos que, con el tiempo, la teoría de cuerdas ha ido revelando resultados nuevos y completamente inesperados. Y esto significa que aún no entendemos bien los principios básicos que hay tras ella. Puede que, en última instancia, la teoría de cuerdas no sea en absoluto una teoría sobre cuerdas, ya que las cuerdas se pueden expresar como membranas cuando se formulan en once dimensiones.

Por eso es prematuro comparar la teoría de cuerdas con los experimentos. Cuando hayamos revelado los verdaderos principios que hay detrás de ella, puede que hallemos una forma de comprobarla, y quizás entonces podamos decir, de una vez por todas, si es una teoría del todo o una teoría de la nada.

## COMPROBAR LA TEORÍA

Pero, a pesar de todos los aparentes éxitos de la teoría de cuerdas, aún tiene algunos evidentes puntos débiles. Cualquier teoría que haga afirmaciones tan poderosas como las de la teoría de cuerdas atraerá, desde luego, a un ejército de detractores. No podemos olvidar las palabras de Carl Sagan, quien dijo que «las afirmaciones extraordinarias requieren pruebas extraordinarias».

(También me acuerdo de las cínicas palabras de Wolfgang Pauli, un maestro del menoscenso, que podía decir sobre una charla: «Lo que ha dicho es tan confuso que no hay manera de decir si tenía o no sentido —y añadir—: No me importa que piense lentamente, pero sí me opongo a que publique más rápido de lo que piensa». Si estuviera vivo, podría aplicar estas palabras a la teoría de cuerdas<sup>[4]</sup>).

El debate es tan intenso que los mejores cerebros de la física están divididos en esta cuestión. Desde 1930, en la célebre sexta conferencia Solvay, cuando Einstein y Bohr se enfrentaron por la cuestión de la teoría cuántica, la ciencia no ha sido testigo de un cisma mayor.

Algunos nobles han tomado posturas opuestas en esta cuestión. Sheldon Glashow escribió al respecto: «Años de intensos trabajos por parte de docenas de las mejores y más brillantes mentes no han producido una sola predicción comprobable, ni se espera que la haya pronto»<sup>[5]</sup>. Gerard't Hooft ha llegado a decir que el interés que rodea a la teoría de cuerdas es como los «anuncios de televisión en Estados Unidos», es decir, todo revuelo y algarabía, pero ninguna sustancia.

Otros han elogiado las virtudes de la teoría de cuerdas. David Gross escribió: «Einstein habría estado complacido con esto; al menos con la meta, si no con la concreción. [...] Le habría gustado el hecho de que haya un principio geométrico subyacente, que, por desgracia, aún no comprendemos del todo».

Steven Weinberg comparó la teoría de cuerdas con el esfuerzo histórico de encontrar el polo norte. Todos los mapas antiguos de la Tierra tenían un inmenso hueco allí donde debía estar el polo, pero nadie lo había visto nunca. Las agujas de todas las brújulas del planeta señalaban hacia este mítico lugar, pero todos los intentos de hallar el legendario polo norte acababan fracasando. En su corazón, los antiguos marineros sabían que tenía ser real, pero nadie podía demostrarlo. Algunos dudaban incluso de su existencia. Sin embargo, después de siglos de especulación, por fin, en 1909, Robert Peary llegó hasta allí.

Glashow, el crítico de la teoría de cuerdas, ha reconocido que, en este debate, está en minoría. Una vez comentó: «Me siento como un dinosaurio en

un mundo de mamíferos advenedizos»<sup>[6]</sup>.

## CRÍTICAS A LA TEORÍA DE CUERDAS

La teoría de cuerdas ha sido objeto de diversos reproches. Los críticos han afirmado que no es más que bombo; que la belleza en sí misma es un indicador poco fiable en física; que la teoría predice demasiados universos; y, lo más importante, que no es verificable.

El gran astrónomo Kepler fue, en su momento, confundido por el poder de la belleza. Se había enamorado de la idea de que el sistema solar se pareciera a un conjunto de poliedros regulares metidos uno dentro de otro. Siglos antes, los griegos habían enumerado cinco de estas figuras (esto es, el cubo, el tetraedro, etcétera). Kepler se dio cuenta de que, poniendo secuencialmente estos poliedros uno dentro de otro, como muñecas rusas, se podían reproducir algunos de los detalles del sistema solar. Era una idea muy hermosa, pero resultó ser errónea por completo.

Recientemente, algunos físicos han criticado la teoría de cuerdas afirmando que la belleza es un criterio engañoso en física. Solo porque la teoría de cuerdas tenga brillantes propiedades matemáticas no significa que contenga el menor atisbo de verdad. Señalan con acierto que las teorías hermosas han resultado ser, a veces, callejones sin salida.

Pero los artistas citan con frecuencia el poema «Oda a una urna griega», de John Keats:

*La belleza es verdad y la verdad, belleza.  
Todo eso y nada más habéis de saber en la tierra.*

Paul Dirac se declaró un claro seguidor de este principio cuando escribió: «El investigador, en su esfuerzo por expresar las leyes fundamentales de la naturaleza en forma matemática, debería aspirar sobre todo a la belleza matemática»<sup>[7]</sup>. De hecho, aseguraría que descubrió su célebre teoría del electrón mientras manipulaba fórmulas de matemática pura, no examinando los datos.

No obstante, por muy poderosa que sea la belleza en la física, también puede guiarnos por el mal camino. Como ha escrito la física Sabine Hossenfelder: «Las teorías bellas han sido descartadas a cientos, teorías sobre fuerzas unificadas, nuevas partículas, simetrías adicionales y otros universos. Todas ellas estaban completamente equivocadas. Confiar en la belleza, claramente, no es una estrategia ganadora»<sup>[8]</sup>.

Los críticos afirman que la teoría de cuerdas tiene unas matemáticas hermosas, pero esto puede no tener relación alguna con la realidad física.

Esta crítica puede guardar cierta validez, pero hay que comprender que algunos aspectos de la teoría de cuerdas, como la supersimetría, no son inútiles ni están exentos de aplicaciones físicas. Aunque aún no se han hallado pruebas de la supersimetría, se ha demostrado que esta es esencial para eliminar muchos de los defectos de la teoría cuántica; al anular bosones con fermiones, nos permite resolver un problema histórico, eliminar las divergencias que afectan a la gravedad cuántica.

No todas las teorías bellas tienen aplicación física, pero todas las teorías fundamentales de la física halladas hasta ahora, sin excepción, incorporan cierta belleza o simetría.

## ¿PUEDE SER VERIFICADA?

La principal crítica que se ha planteado a la teoría de cuerdas es que no se puede verificar. La energía que poseen los gravitones se denomina «energía de Planck», que es mil billones de veces superior a la que produce el LHC. ¡Imagine tratar de construir un acelerador de partículas mil billones de veces mayor que el actual! Es probable que se necesitase uno del tamaño de la galaxia para poder comprobar la teoría de forma directa.

Es más, cada solución de la teoría de cuerdas es todo un universo, y parece haber un número infinito de soluciones. Para poder comprobar directamente la teoría, ¡sería necesario crear miniuniversos en un laboratorio! En otras palabras, solo un dios puede comprobar directamente la teoría, ya que se basa en universos, no en átomos ni en moléculas.

Así que, en principio, parece que la teoría de cuerdas no pasa la prueba de fuego para cualquier otra, la verificabilidad. Pero esto no arredra a sus

defensores. Como ya hemos establecido, la mayoría de la ciencia se hace de manera indirecta, examinando los ecos del Sol, del Big Bang, etcétera

Asimismo, buscamos ecos de la décima y la undécima dimensión. Quizá las pruebas de la teoría de cuerdas estén ocultas a nuestro alrededor, pero debemos estar atentos a sus ecos, en lugar de tratar de observarlos directamente.

Por ejemplo, un posible signo del hiperespacio es la existencia de materia oscura. Hasta hace poco, se creía que el universo estaba compuesto sobre todo por átomos, pero los astrónomos han hallado, para su sorpresa, que solo el 4,9 por ciento son átomos como el hidrógeno y el helio. En realidad, la mayor parte del universo está oculto para nosotros en la forma de materia y energía oscuras (recordemos que son dos cosas distintas. El 26,8 por ciento del universo está compuesto de materia oscura, que es materia invisible que rodea las galaxias e impide que se disgreguen; mientras que el 68,3 por ciento del universo está compuesto de energía oscura, que es aún más misteriosa, la energía del espacio vacío que está alejando las galaxias unas de otras). Quizá las pruebas de la teoría del todo estén ocultas en este universo invisible.

## LA BÚSQUEDA DE LA MATERIA OSCURA

La materia oscura es extraña e invisible y, sin embargo, mantiene unida la Vía Láctea. Sin embargo, como tiene peso pero no carga, si se intentase sostener en la mano se escurriría entre los dedos como si esta no estuviese ahí. Caería, atravesaría el suelo y también el centro de la Tierra, y llegaría hasta el otro lado del planeta, donde la gravedad acabaría por invertir su dirección y hacer que cayera otra vez hacia la mano que la intentaba sostener. Y volvería a oscilar entre esta y el otro lado del planeta, como si la Tierra no estuviese ahí.

Por extraña que sea la materia oscura, sabemos que tiene que existir. Si utilizamos las leyes de Newton para analizar la rotación de la Vía Láctea, hallamos que no hay masa suficiente para contrarrestar la fuerza centrífuga. Dada la cantidad de masa que vemos, las galaxias del universo deberían ser inestables y disgregarse, pero han permanecido estables durante miles de millones de años. Así que hay dos opciones: o las ecuaciones de Newton son

incorrectas cuando se aplican a las galaxias, o hay algún objeto invisible que las mantiene intactas (recordemos que Neptuno se encontró de la misma forma, postulando un nuevo planeta que explicase las desviaciones de Urano de una elipse perfecta).

Actualmente, las partículas masivas de interacción débil (más conocidas como WIMP, por sus siglas en inglés) son las candidatas más firmes para ser materia oscura. Entre ellas, una posibilidad es el fotino, el compañero supersimétrico del fotón. Esta partícula es estable, tiene masa, es invisible y no tiene carga, lo cual se ajusta con precisión a las características de la materia oscura. Los físicos creen que la Tierra se mueve en una corriente invisible de materia oscura, que tal vez esté atravesando su cuerpo en este mismo momento. Si un fotino colisiona con un protón, podría hacer que este se desintegrase en una lluvia de partículas subatómicas que sí se pueden detectar. De hecho, aún hoy hay enormes detectores del tamaño de una piscina (con inmensas cantidades de fluidos como xenón y argón) que tal vez, algún día, capturen la chispa creada por la colisión de un fotino. Hay unos veinte grupos de investigación activos en busca de la materia oscura, con frecuencia en lo más profundo de pozos mineros, bajo la superficie de la Tierra, lejos de las interferencias provocadas por los rayos cósmicos, de manera que es concebible que las colisiones de materia oscura sean captadas por nuestros instrumentos. Una vez detectadas, los físicos estudiarán las propiedades de las partículas de materia oscura y las compararán con las propiedades predichas para los fotinos. Si las predicciones de la teoría de cuerdas coinciden con los resultados experimentales para la materia oscura, esto convencería con mucho a los físicos de que ese es el camino correcto.

Otra posibilidad es que el fotino sea producido por la próxima generación de aceleradores de partículas de la que se está hablando.

## MÁS ALLÁ DEL LHC

Los japoneses se están planteando financiar el Colisionador Lineal Internacional, en el cual se dispararía un haz de electrones por un tubo recto que chocaría con un haz de antielectrones. Si se aprueba, el dispositivo se construirá dentro de doce años. La ventaja de un colisionador como este es

que utiliza electrones en lugar de protones. Los protones constan de tres quarks unidos mediante gluones, por lo que la colisión entre estos es muy confusa, pues en ella se crea una avalancha de partículas superfluas. El electrón, en cambio, es una sola partícula elemental, por lo que la colisión con un antielectrón es mucho más limpia y requiere mucha menos energía. En consecuencia, con solo doscientos cincuenta mil millones de electronvoltios, debería poder crear bosones de Higgs.

Los chinos también han expresado interés en construir el Colisionador Circular de Electrones y Positrones. Los trabajos se iniciarían, aproximadamente, en 2022, y podría estar acabado alrededor de 2030, con un coste de cinco mil a seis mil millones de dólares. El proyecto alcanzaría una energía de doscientos cuarenta mil millones de electronvoltios y tendría una circunferencia de cien kilómetros.

Para no ser superados, los físicos del CERN están planeando el sucesor del LHC, llamado Futuro Colisionador Circular, que alcanzaría la asombrosa cifra de cien billones de electronvoltios, y también tendría unos cien kilómetros de circunferencia.

No está claro si estos aceleradores acabarán por construirse, pero el propósito indica que sí hay esperanza de encontrar la materia oscura en la próxima generación de aceleradores, más allá del LHC. Si descubrimos partículas de materia oscura, podremos compararlas con las predicciones de la teoría de cuerdas.

Otra predicción de este modelo que podrían verificar estos aceleradores es la presencia de miniagujeros negros. La teoría de cuerdas es una teoría del todo, por lo que incluye tanto la gravedad como las partículas subatómicas, así que los físicos esperan encontrar minúsculos agujeros negros en el acelerador (estos, a diferencia de los agujeros negros estelares, son inofensivos y tienen la energía de las pequeñas partículas subatómicas, no la de estrellas moribundas. De hecho, la Tierra es bombardeada por rayos cósmicos mucho más potentes que cualquier agujero negro que pueda producirse en estos aceleradores, sin daño alguno).

## EL BIG BANG COMO COLISIONADOR DE ÁTOMOS

También tenemos la esperanza de poder sacar partido del mayor de los colisionadores de átomos, el propio Big Bang. La radiación remanente puede darnos claves acerca de la materia y la energía oscuras. En primer lugar, el eco, o posluminiscencia, del Big Bang es fácil de detectar. Nuestros satélites han podido captarla con una enorme precisión.

Fotografías de la radiación de fondo de microondas muestran que esta es notablemente uniforme, apenas tiene unas pequeñas ondulaciones en la superficie. Estas, a su vez, representan diminutas fluctuaciones cuánticas que existían en el momento del Big Bang y que la explosión amplificó.

No obstante, lo polémico es que en la radiación de fondo parece haber irregularidades, o manchas, a las que no podemos dar explicación. Se ha especulado que estas extrañas manchas son las huellas de colisiones con otros universos. En particular, el Punto Frío es una marca inusualmente fría en una generalmente uniforme radiación de fondo de microondas que, según han especulado algunos físicos, podría ser el residuo de algún tipo de conexión o colisión entre nuestro universo y uno paralelo en el principio de los tiempos. Si estas extrañas marcas representan la interacción de nuestro universo con otros paralelos, entonces la teoría del multiverso podría hacerse más plausible para los escépticos.

De hecho, ya hay planes para llevar al espacio tecnología capaz de perfeccionar todos estos cálculos utilizando detectores de ondas gravitatorias.

## LISA

En 1916, Einstein demostró que la gravedad podía viajar en ondas. Igual que los anillos concéntricos en expansión que se crean al tirar una piedra en un estanque, el alemán predijo que las ondas gravitatorias viajarían a la velocidad de la luz. Por desgracia, serían tan tenues que no creyó que pudiéramos detectarlas en un futuro cercano.

Tenía razón. No fue hasta 2016, cien años después de su predicción, cuando se observaron las ondas gravitatorias. Señales de dos agujeros negros que chocaron en el espacio hace unos mil millones de años fueron captadas por inmensos detectores. Cada uno de ellos, construidos en los estados de

Luisiana y Washington, ocupa una superficie de varios kilómetros cuadrados. Son como una gran «L», cada uno de cuyos segmentos recorren haces láser. Cuando los dos se encuentran, crean un patrón de interferencia tan sensible a las vibraciones que fue capaz de detectar esta colisión.

Por su innovador trabajo, los físicos Rainer Weiss, Kip S. Thorne y Barry C. Barish obtuvieron el Premio Nobel en 2017.

Para lograr una sensibilidad aún mayor, está previsto enviar detectores de ondas gravitatorias al espacio exterior. El proyecto, denominado «antena espacial de interferometría láser» (LISA, por sus siglas en inglés), podría ser capaz de captar vibraciones desde el mismo instante del Big Bang. Otra versión de LISA consiste en tres satélites distintos conectados entre sí por una red de haces láser, formando un triángulo de alrededor de un millón y medio de kilómetros de lado. Cuando una onda gravitatoria del Big Bang llega al detector, sacude ligeramente los haces láser, lo cual puede medirse con instrumentos de mucha sensibilidad.

El objetivo último es registrar las ondas de choque del Big Bang y luego rebobinar para obtener la mejor conjectura de la radiación antes de la gran explosión. Estas ondas previas al Big Bang se compararían entonces con lo que predicen diversas versiones de la teoría de cuerdas y, de esta forma, sería posible obtener datos numéricos del multiverso antes de la bola de fuego.

Mediante dispositivos más avanzados que LISA se podrían obtener fotos de la infancia del universo, y quizás incluso hallar pruebas del posible cordón umbilical que conectaba nuestro universo recién nacido a un universo progenitor.

## VERIFICAR LA LEY DEL CUADRADO INVERSO

Otra de las objeciones que se plantean con frecuencia a la teoría de cuerdas es que postula que vivimos realmente en diez u once dimensiones, de lo cual no hay prueba experimental alguna.

Sin embargo, este aspecto podría ser, de hecho, verificable con instrumentos existentes. Si nuestro universo es tridimensional, la fuerza de la gravedad disminuye según el cuadrado de la distancia que la separa de la fuente de dicha gravedad. Esta famosa ley de Newton es la que guía nuestras

sondas espaciales millones de kilómetros a través del espacio con una impresionante precisión, hasta el punto de que podemos hacer que pasen entre los anillos de Saturno si nos apetece. Pero la famosa ley del cuadrado inverso de Newton solo se ha comprobado con distancias astronómicas, raramente en el laboratorio. Si la fuerza de la gravedad a distancias cortas no la obedeciese, eso indicaría la presencia de una dimensión superior. Por ejemplo, si el universo tuviera cuatro dimensiones espaciales, la gravedad debería disminuir según el cubo de la distancia de separación hasta la fuente. (Si el universo tuviera  $n$  dimensiones espaciales, la gravedad debería disminuir según la potencia  $[n - 1]$  de la distancia desde la fuente de dicha gravedad).

Pero la fuerza de la gravedad apenas se ha medido entre dos objetos en un laboratorio. Estos experimentos son difíciles de llevar a cabo, porque las fuerzas gravitatorias con que trabajamos en tierra son muy pequeñas. Aun así, en Colorado se efectuaron las primeras mediciones, y los resultados fueron negativos; esto es, la ley del cuadrado inverso de Newton sigue siendo válida. (Pero esto solo quiere decir que no hay dimensiones adicionales en Colorado).

## EL PROBLEMA DEL PAISAJE

Para un teórico, todas estas críticas son incómodas, pero no terribles. Lo que, en cambio, sí le causa problemas es que el modelo parezca predecir un multiverso de universos paralelos, muchos de los cuales son aún más descabellados que los que pasan por la imaginación de un guionista de Hollywood. La teoría de cuerdas tiene un número infinito de soluciones, cada una de las cuales describe una teoría de la gravitación finita y lógica, que no se parece en absoluto a nuestro universo. En muchos de estos universos paralelos, el protón no sería estable, sino que se desintegraría en una inmensa nube de electrones y neutrinos. Además, la materia compleja que nosotros conocemos (los átomos y las moléculas) no puede existir, sino que consiste únicamente en un gas de partículas subatómicas. (Se podría afirmar que estos universos alternativos no son más que posibilidades matemáticas y que no son reales. Pero el problema es que la teoría carece de poder de predicción, ya que no puede decírnos cuál de estos universos alternativos es el real).

Este problema no es, en realidad, exclusivo de la teoría de cuerdas. Por ejemplo, ¿cuántas soluciones hay para las ecuaciones de Newton, o para las de Maxwell? El número es infinito, según lo que uno esté estudiando. Si partimos de una bombilla o un láser y resolvemos las ecuaciones de Maxwell, hallaremos una solución única para cada instrumento. Así, las teorías de uno y otro tienen también un número infinito de soluciones, en función de las condiciones iniciales, esto es, de la situación a partir de la cual empezamos.

Es probable que este problema sea común a cualquier teoría del todo, que tendrá un número infinito de soluciones en función de las condiciones iniciales. Pero ¿cómo se determinan estas para todo el universo? Esto significa tener que introducir a mano, desde fuera, las condiciones del Big Bang.

Muchos físicos consideran que eso es hacer trampas. Lo ideal es que sea la propia teoría la que dé las condiciones que originaron el Big Bang, que la teoría nos lo diga todo, incluidas la temperatura, la densidad y la composición del momento original. Una teoría del todo debería contener en sí misma, de algún modo, sus propias condiciones iniciales.

Dicho de otra forma, queremos una predicción única del principio del universo. Así, la teoría de cuerdas tiene un problema de exceso. ¿Puede predecir nuestro universo? Sí, y eso es una afirmación sensacional, pues ha sido la meta de los físicos durante casi un siglo. Pero ¿puede predecir solo un universo? Es probable que no. Esto es lo que se llama el «problema del paisaje» de la teoría de cuerdas.

Este problema tiene varias posibles soluciones, ninguna de las cuales es ampliamente aceptada. La primera es el principio antrópico, según el cual nuestro universo es especial porque, para empezar, nosotros somos seres conscientes y estamos aquí debatiendo esta cuestión. En otras palabras, podría haber un número infinito de universos, pero el nuestro es el único que tiene las condiciones necesarias para hacer posible la vida inteligente. Las condiciones iniciales del Big Bang están fijadas en el principio del tiempo, de forma que actualmente pueda haber vida inteligente. Los otros universos podrían no poseer vida consciente.

Recuerdo con claridad la primera vez que se me presentó este concepto, en segundo de primaria. Uno de mis profesores dijo que Dios amaba tanto a la Tierra que la situó «en la posición justa» respecto del Sol: ni muy cerca, o los océanos hervirían, ni muy lejos, o se congelarían. Incluso de niño, el argumento me impactó, porque utilizaba la lógica pura para determinar la naturaleza del universo. Pero hoy, los satélites han revelado la existencia de

cuatro mil planetas orbitando otras estrellas. Por desgracia, la mayor parte de ellos están demasiado cerca o demasiado lejos de su estrella para poder albergar vida. Así que hay dos formas de analizar el argumento de aquel profesor de segundo. Después de todo, quizá realmente haya un Dios afectuoso, o quizá haya miles de planetas muertos que están demasiado lejos o demasiado cerca de su estrella, y nosotros vivimos en uno que está justo en la posición que permite tener vida inteligente y, por tanto, podemos debatir la cuestión. Asimismo, quizá coexistimos en un océano de universos muertos, y el nuestro solo es especial porque nosotros estamos aquí para discutir la cuestión.

El principio antrópico permite, de hecho, explicar un dato experimental curioso sobre nuestro universo: que las constantes básicas de la naturaleza parecen estar totalmente ajustadas para permitir la vida. Como escribió el físico Freeman Dyson, es como si el universo supiese que veníamos. Por ejemplo, si la fuerza nuclear fuese un poco más débil, el Sol nunca se habría encendido y el sistema solar sería oscuro; y si la fuerza nuclear fuerte fuese un poco más intensa, el Sol se habría consumido hace miles de millones de años, así que esta interacción tiene la intensidad justa.

De manera parecida, si la gravedad fuese un poco más débil, quizá el Big Bang habría acabado en un Big Freeze, con un universo en expansión frío y muerto. Si la gravedad fuese un poco más intensa, podríamos haber acabado en un Big Crunch, y toda la vida habría terminado por abrasarse. Sin embargo, nuestra gravedad es la justa para que las estrellas y los planetas se formasen y durasen lo suficiente para que surgiera la vida.

Se puede enumerar toda una lista de accidentes parecidos que hacen que la vida sea posible, y cada vez caemos en la zona de habitabilidad. Así, el universo es una gigantesca mesa de dados, y nos ha salido la tirada ganadora. Pero, de acuerdo con la teoría del multiverso, eso significa que coexistimos con un inmenso número de universos muertos.

De modo que, quizá, el principio antrópico pueda seleccionar nuestro universo de los millones de universos del paisaje, porque hay vida consciente en él.

## MI PUNTO DE VISTA SOBRE LA TEORÍA DE CUERDAS

**H**e estado trabajando en la teoría de cuerdas desde 1968, así que, por supuesto, tengo mi punto de vista al respecto. Se mire como se mire, la forma última de la teoría aún está por revelarse, por lo que es prematuro comparar la teoría de cuerdas con el universo actual.

Una de las características de la teoría de cuerdas es que está evolucionando hacia atrás, hacia sus fundamentos, y va descubriendo nuevas matemáticas y nuevos conceptos por el camino. Alrededor de cada década hay una nueva revelación que cambia nuestro punto de vista en lo que respecta a la naturaleza de esta teoría. He sido testigo de tres de estas sobrecogedoras revoluciones. Y, sin embargo, aún no hemos sido capaces de expresar la teoría de cuerdas en su forma completa; todavía no conocemos sus principios fundamentales definitivos. Solo cuando los descubramos podremos examinarla a la luz de los resultados experimentales.

### **REVELAR UNA PIRÁMIDE**

**A**mí me gusta comparar el trabajo en la teoría de cuerdas con la búsqueda de tesoros en el desierto de Egipto. Digamos que un día nos tropezamos con una diminuta roca que sobresale de la arena. A medida que la apartamos, empezamos a darnos cuenta de que ese guijarro es, en realidad, la punta de una pirámide gigantesca. Tras años de excavación, encontramos toda clase de extrañas cámaras y obras de arte. En cada piso nos topamos con nuevas sorpresas y, al final, después de excavar muchos más, llegamos a la última puerta, y estamos a punto de abrirla para descubrir quién construyó la pirámide.

Personalmente, yo creo que aún no hemos llegado al piso inferior, ya que cada vez que analizamos esta teoría descubrimos nuevos niveles matemáticos. Creo que aún hay más capas que revelar antes de llegar a su forma definitiva. Dicho de otro modo, la teoría es más inteligente que nosotros.

Es posible expresar toda la teoría de cuerdas en términos de teoría de campo de cuerdas mediante una ecuación de poco más de dos centímetros. Pero, para diez dimensiones, necesitamos cinco ecuaciones como esa.

Aunque podemos expresar la teoría de cuerdas en forma de teoría de campos, esto no es aún posible para la teoría M. Tenemos la esperanza de que, algún día, los físicos puedan hallar una única ecuación que resuma la totalidad de esta última. Por desgracia, es sumamente complicado expresar una membrana (que puede vibrar de numerosas maneras) en forma de teoría de campos. En consecuencia, la teoría M consiste en docenas de ecuaciones inconexas que, de milagro, describen lo mismo. Si logramos escribir la teoría M en forma de teoría de campos, aquella debería surgir por entero de una única ecuación.

Nadie puede predecir si esto va a suceder, ni cuándo. Pero, después de presenciar el alboroto provocado por la teoría de cuerdas, el público ya está impaciente.

Sin embargo, incluso entre los expertos de la teoría de cuerdas hay cierto pesimismo sobre las perspectivas futuras de esta. Como ha mencionado el premio Nobel David Gross, la teoría de cuerdas es como la cima de una montaña. A medida que los escaladores ascienden, la cima es visible con claridad, pero parece retroceder conforme se acercan. La meta está tentadoramente cerca, pero siempre parece quedar fuera de nuestro alcance.

Por mi parte, yo creo que esto es comprensible, ya que nadie sabe cuándo hallaremos la supersimetría en un laboratorio, o si la encontraremos, pero hay que observar esto con la perspectiva adecuada. La corrección o incorrección de una teoría debería depender de resultados concretos, no de los deseos subjetivos de los físicos. Todos esperamos que nuestras teorías favoritas se confirmen durante nuestra vida; es un deseo profundamente humano. Pero, a veces, la naturaleza tiene sus propios planes.

La teoría atómica, por ejemplo, tardó dos mil años en ser reivindicada, y hace muy poco que los científicos han podido tomar imágenes de gran vividez de átomos individuales. Incluso en el caso de las grandes teorías de Newton y de Einstein, pasaron décadas hasta que se comprobaron y verificaron por completo muchas de sus predicciones. Los agujeros negros los predijo por primera vez John Michell en 1783, pero no fue hasta 2019 cuando los astrónomos lograron obtener las primeras imágenes concluyentes de su horizonte de sucesos.

Personalmente, yo creo que el pesimismo de muchos científicos puede llevarlos por el mal camino, porque las pruebas de la teoría podrían no encontrarse en un gigantesco acelerador de partículas, sino en el hallazgo de la formulación matemática definitiva de la teoría.

Lo que quiero decir es que quizá no necesitamos en absoluto una prueba experimental de la teoría de cuerdas. Una teoría del todo es también una teoría de todo lo ordinario. Si podemos derivar la masa de los quarks y de otras partículas subatómicas conocidas a partir de principios fundamentales, esa podría ser una prueba convincente de que estamos ante la teoría definitiva.

El problema no es en absoluto experimental. El modelo estándar tiene una veintena de parámetros libres que se introducen a mano (como la masa de los quarks y la fuerza de sus interacciones). Tenemos abundantes datos experimentales sobre las masas y las interacciones de las partículas subatómicas. Si la teoría de cuerdas pudiera calcular con precisión estas constantes fundamentales a partir de principios básicos, sin hacer hipótesis alguna, esto demostraría, en mi opinión, su corrección. Sería realmente un acontecimiento histórico que los parámetros conocidos del universo surgieran de una única ecuación.

Pero, cuando tengamos esta ecuación de poco más de dos centímetros, ¿qué haremos con ella? ¿Cómo podemos eludir el problema del paisaje?

Una posibilidad es que muchos de estos universos sean inestables y se desintegren en el nuestro. Recordemos que el vacío, lejos de ser algo aburrido e indiferenciado, está en realidad repleto de universos burbuja que aparecen y desaparecen de repente, como en un baño de burbujas. Hawking lo llamaba la «espuma del espacio-tiempo». La mayor parte de estos minúsculos universos burbuja son inestables; saltan fuera del vacío y de nuevo dentro de él.

Del mismo modo, cuando hallemos la formulación definitiva de la teoría, se podrá demostrar que la mayor parte de estos universos alternativos son inestables y se desintegran en el nuestro. Por ejemplo, la escala de tiempo natural para estos universos burbuja es el tiempo de Planck,  $10^{-43}$  segundos, un intervalo increíblemente breve. La mayor parte de universos viven solo durante ese instante, pero la edad del nuestro es de 13 800 millones de años, lo cual es, en comparación, astronómicamente mayor que la vida de la mayoría en esta formulación. Dicho de otro modo, quizá nuestro universo sea especial entre la infinidad del paisaje, pues los ha superado en duración a todos, y por eso estamos nosotros hoy aquí, planteándonos esta cuestión.

Pero ¿qué hacemos si la última ecuación resulta ser tan compleja que es imposible de resolver a mano? Parecerá entonces imposible demostrar que nuestro universo es especial entre todos los demás. En ese momento, creo que tendremos que recurrir a un ordenador. Es el camino que hemos tomado para la teoría del quark. Recordemos que la partícula de Yang-Mills actúa como un pegamento para enlazar los quarks en un protón. Sin embargo, después de

cincuenta años, nadie ha podido demostrar esto matemáticamente de forma rigurosa. De hecho, muchos físicos han abandonado la esperanza de lograrlo. Pero las ecuaciones de Yang-Mills se han resuelto en un ordenador.

Para ello, se aproxima el espacio-tiempo como una serie de puntos en una retícula. Normalmente, lo concebimos como una superficie uniforme, con un número infinito de puntos, y, cuando los objetos se mueven, pasan por esa secuencia infinita. Pero podemos aproximar esta superficie uniforme a una retícula o malla. A medida que dejamos que el espacio entre puntos se haga cada vez más pequeño, se convierte en el espacio-tiempo ordinario, y la teoría definitiva empieza a aflorar. Asimismo, una vez que tengamos la ecuación definitiva de la teoría M, podremos ponerla en una retícula y hacer el cálculo en un ordenador.

En este escenario, nuestro universo surge de un superordenador.

(Recuerdo, sin embargo, la *Guía del autoestopista galáctico*, cuando se construye un gigantesco ordenador para hallar el sentido de la vida. Tras eones de cálculos, la máquina llega finalmente a la conclusión de que el sentido del universo es «cuarenta y dos»).

Así que es concebible que la siguiente generación de aceleradores de partículas, o un detector de partículas situado en lo más profundo de la galería de una mina, o un detector de ondas gravitatorias ubicado en el espacio, hallen pruebas experimentales de la teoría de cuerdas. Pero, si no es así, quizá algún físico emprendedor tenga la energía y la visión para encontrar la formulación matemática definitiva de la teoría del todo. Solo entonces podremos compararla con los datos experimentales.

Probablemente los físicos deberán enfrentarse a más vericuetos antes de finalizar el viaje, pero estoy seguro de que acabaremos encontrando la teoría del todo.

Sin embargo, la próxima pregunta es: ¿de dónde vino la teoría de cuerdas? Si la teoría del todo tiene un designio global, ¿tuvo acaso un diseñador? Y, en tal caso, ¿tiene el universo un propósito y un sentido?

## LA BÚSQUEDA DE SENTIDO EN EL UNIVERSO

Hemos visto cómo el dominio de las cuatro fuerzas fundamentales no solo ha revelado muchos de los secretos de la naturaleza, sino que también ha desencadenado las grandes revoluciones científicas que han alterado el propio destino de la civilización. Cuando Newton escribió las leyes del movimiento y de la gravedad, sentó los cimientos de la Revolución Industrial. Cuando Faraday y Maxwell postularon la unidad de las fuerzas eléctrica y magnética, iniciaron la revolución eléctrica. Y cuando Einstein y los físicos cuánticos desvelaron la naturaleza probabilística y relativista de la realidad, pusieron en marcha la actual revolución tecnológica.

Pero ahora podríamos estar acercándonos a una teoría del todo que unifique las cuatro fuerzas fundamentales. De modo que vamos a suponer, por el momento, que por fin hemos logrado llegar a ella. Supongamos que ha sido rigurosamente comprobada y universalmente aceptada por los científicos de todo el mundo. ¿Cómo va a afectar a nuestra vida, a nuestro pensamiento, a nuestra concepción del universo?

En cuanto al impacto directo sobre la vida inmediata, lo más probable es que sea mínimo. Cada solución de la teoría del todo es un universo entero, por lo que la energía a la que esta adquiere relevancia es la energía de Planck, un trillón de veces superior a la que produce el Gran Colisionador de Hadrones. La escala energética de la teoría del todo tiene que ver con la creación del universo y con los misterios de los agujeros negros, no con nuestros asuntos cotidianos.

El verdadero impacto que tendrá en nuestra vida puede ser más bien filosófico, porque la teoría del todo puede dar finalmente respuesta a profundas cuestiones existenciales que han obsesionado a grandes pensadores durante generaciones, como ¿es posible viajar en el tiempo?, ¿qué sucedió antes de la creación? y ¿de dónde viene el universo?

Como dijo en 1863 el gran biólogo Thomas H. Huxley: «La pregunta de todas las preguntas para la humanidad, el problema que hay detrás de todos los demás y que tiene más interés que ninguno de ellos, es el de determinar el lugar del hombre en la naturaleza y su relación con el cosmos».

Pero esto sigue dejando abierta una cuestión: ¿qué tiene que decir la teoría del todo acerca del sentido en el universo?

La secretaria de Einstein, Helen Dukas, mencionó una vez que el alemán estaba abrumado por la cantidad de cartas que recibía, en las que se le suplicaba que explicase el sentido de la vida y le preguntaban si creía en Dios. Él decía que era incapaz de dar respuesta a estas preguntas sobre el propósito del universo.

En la actualidad, estas cuestiones, así como la existencia de un creador, siguen fascinando al público en general. En 2018 se subastó una carta privada que Einstein escribió sobre Dios poco antes de morir. Curiosamente, la puja ganadora fue de 2,9 millones de dólares, más alta incluso que las expectativas de la casa de subastas.

En esta y otras cartas, Einstein se desesperaba por hallar respuestas a preguntas sobre el sentido de la vida, pero su pensamiento acerca de Dios estaba claro: un problema, según escribió, es que en realidad hay dos tipos de Dios, y solemos confundirlos. En primer lugar está el Dios personal, aquel al que se reza, el Dios de la Biblia, que aniquila a los filisteos y premia a los creyentes. Él no creía en ese Dios. No creía que el Dios que creó el universo interfiriese en los asuntos de los simples mortales.

Sí creía, sin embargo, en el Dios de Spinoza, es decir, el Dios del orden en un universo que es bello, simple y elegante. El universo podría ser feo, aleatorio y caótico, pero también tiene un orden oculto que es misterioso y, sin embargo, profundo.

Como analogía, Einstein dijo una vez que se sentía como un niño entrando en una inmensa biblioteca. Estaba rodeado de montañas de libros con respuestas a los misterios del universo. Su meta en la vida era, de hecho, poder leer unos pocos capítulos de esos libros.

Sin embargo, dejó abierta esta cuestión: si el universo es como una inmensa biblioteca, ¿tiene un bibliotecario? ¿Quién fue el autor de esos libros? Dicho de otro modo: si la teoría del todo puede explicar todas las leyes físicas, ¿de dónde vino esa ecuación?

Y había otra pregunta que impulsaba a Einstein: ¿tuvo Dios elección al crear el universo?

## DEMOSTRAR LA EXISTENCIA DE DIOS

Estas preguntas, no obstante, no están tan claras cuando se trata de utilizar la lógica para demostrar o refutar la existencia de Dios. Hawking, por ejemplo, no creía en un creador. Escribió que el Big Bang ocurrió en un breve momento de tiempo, así que, simplemente, Dios no tuvo tiempo de crear el universo tal como lo vemos.

En la teoría original de Einstein, el universo se expandió casi al instante. Pero, en la teoría de los multiversos, el nuestro no es más que una burbuja que coexiste con otros universos burbuja, que se están creando constantemente.

Si esto es así, quizá el tiempo no empezó a existir de repente con el Big Bang, sino que había un tiempo antes del principio de nuestro universo. Cada universo nació en un breve momento de tiempo, pero el número de aquellos en el multiverso podría ser eterno. Así, la teoría del todo deja abierta la cuestión de la existencia de Dios.

Pero, a lo largo de los siglos, los teólogos han abordado esta cuestión desde el punto de vista opuesto: utilizar la lógica para demostrar la existencia de Dios. Santo Tomás de Aquino, el gran teólogo católico del siglo XIII, postuló cinco famosos argumentos para la existencia de Dios. Son interesantes porque, incluso en el presente, siguen suscitando profundas cuestiones acerca de la teoría del todo.

Dos son en realidad redundantes, así que pueden reducirse a tres argumentos:

1. Cosmológico: los objetos se mueven porque son empujados; es decir, algo los pone en movimiento. Pero ¿cuál es el primer motor o primera causa que puso el universo en movimiento? Debe de ser Dios.
2. Teleológico: a nuestro alrededor vemos objetos de gran complejidad y sofisticación, pero, en última instancia, todo diseño precisa de un diseñador. El primer diseñador fue Dios.
3. Ontológico: Dios, por definición, es el ser más perfecto imaginable. Se puede imaginar que no existe. Pero, si Dios no existiera, no sería perfecto, por tanto, debe existir.

Estas pruebas de la existencia de Dios perduraron durante cientos de años. No fue hasta el siglo XIX cuando Immanuel Kant halló un defecto en el argumento ontológico, porque la perfección y la existencia son dos categorías independientes. Que algo sea perfecto no implica necesariamente que exista.

No obstante, los otros dos argumentos deben volver a examinarse a la luz de la ciencia moderna y de la teoría del todo. El análisis del argumento teleológico no tiene complicaciones. A nuestro alrededor, miremos donde miremos, vemos objetos de gran complejidad, pero la sofisticación de las formas de vida que nos rodean puede explicarse por la evolución. Con suficiente tiempo, el azar puro puede impulsar la evolución mediante la supervivencia del más apto, de manera que diseños más sofisticados surgen aleatoriamente a partir de otros más sencillos. No es necesario un primer diseñador de la vida.

En cambio, el análisis del argumento cosmológico no está tan claro. Los físicos actuales pueden hacer retroceder la película y demostrar que el universo empezó cuando un Big Bang lo puso en movimiento. Sin embargo, para retroceder antes de ese momento, tenemos que utilizar la teoría del multiverso. Pero, si asumimos que esta teoría explica de dónde vino el Big Bang, entonces tenemos que preguntarnos: ¿y de dónde vino el multiverso? Finalmente, si se afirma que este es una consecuencia lógica de la teoría del todo, habremos de preguntarnos: ¿de dónde viene la teoría del todo?

Llegados a este punto, la física se detiene y empieza la metafísica. La física no dice nada sobre la procedencia de las leyes de la física. Así, el argumento cosmológico de santo Tomás de Aquino acerca del primer motor o primera causa sigue siendo relevante, incluso hoy.

La principal característica de cualquier teoría del todo es, probablemente, su simetría. Pero ¿de dónde viene esta simetría? Sería un subproducto de profundas verdades matemáticas. Y ¿de dónde viene la matemática? Sobre esta cuestión, la teoría del todo guarda de nuevo silencio.

Preguntas suscitadas por un teólogo católico hace ochocientos años siguen siendo pertinentes, a pesar de nuestros enormes avances en la comprensión del origen de la vida y del universo.

## MÍ PROPIO PUNTO DE VISTA

**E**l universo es un lugar extraordinariamente bello, ordenado y simple. Me resulta muy fascinante que todas las leyes conocidas del universo físico se puedan resumir en una única hoja de papel.

Este papel contiene la teoría de la relatividad de Einstein. El modelo estándar es más complicado, y ocupa la mayoría de la página con su muestrario de partículas subatómicas, que pueden describir todo el universo conocido, desde el interior del protón hasta los propios límites del universo visible.

Dada la absoluta brevedad de esta hoja de papel, es difícil no llegar a la conclusión de que todo esto se planificó, de que su elegante proyecto es una muestra de la mano de un diseñador cósmico. Para mí, este es el argumento más sólido para la existencia de Dios.

Pero nuestra base para comprender el mundo es la ciencia, que, al fin y al cabo, se basa en hechos que son verificables, reproducibles, falsables. La conclusión es esa. En disciplinas como la crítica literaria, las cosas se complican con el tiempo; los críticos se preguntarán eternamente qué quiso decir en verdad James Joyce con este o aquel pasaje. Pero la física se mueve en la dirección opuesta, se va haciendo cada vez más simple y potente, hasta que todo es consecuencia de un puñado de ecuaciones, lo cual me parece realmente extraordinario. Sin embargo, los científicos son, con frecuencia, reacios a admitir que hay algunas cosas que están más allá del reino de la ciencia.

Por ejemplo, es imposible demostrar una negativa.

Digamos que queremos demostrar que los unicornios no existen. Aunque hemos recorrido la mayor parte de la superficie del planeta y nunca hemos visto ninguno, siempre existe la posibilidad de que haya unicornios en alguna isla o cueva no descubiertas. Por tanto, es imposible demostrar que los unicornios no existen. Esto significa que, dentro de cien años, es posible que sigamos debatiendo la existencia de Dios y el sentido del universo. Y esto sucede porque estos conceptos no son verificables y, por ende, son indecidibles; están fuera del dominio de la ciencia ordinaria.

Asimismo, aunque nunca nos hayamos tropezado con Dios en nuestros viajes por el espacio exterior, siempre hay la posibilidad de que exista en regiones que no hemos explorado.

Por consiguiente, yo soy agnóstico. No hemos hecho más que arañar la superficie del universo, y resulta presuntuoso hacer afirmaciones acerca de la naturaleza de todo el universo mucho más allá de nuestros instrumentos.

Pero aún tenemos que enfrentarnos al argumento de santo Tomás de Aquino de que tiene que haber un primer motor. En otras palabras, ¿de dónde vino todo? Aunque el universo empezase según afirma la teoría del todo, ¿de dónde vino entonces la teoría del todo?

Yo creo que la teoría del todo existe porque es la única teoría matemáticamente coherente. Las demás son imperfectas e incoherentes por naturaleza. Creo que, si partimos de una teoría alternativa, en última instancia podremos demostrar que  $2 + 2 = 5$ ; es decir, que estas teorías alternativas se contradicen a sí mismas.

Recordemos que la teoría del todo se enfrenta a numerosos obstáculos. Cuando añadimos correcciones cuánticas a una teoría cualquiera, hallamos que, en general, la teoría queda destruida debido a divergencias infinitas, o bien la simetría original termina arruinada por anomalías. Yo creo que, quizás, hay una única solución a estas restricciones de la teoría que descarta el resto de las posibilidades. El universo no puede existir en quince dimensiones, porque sufriría de estos errores fatales (en la teoría de cuerdas en diez dimensiones, cuando calculamos las correcciones cuánticas, con frecuencia estas contienen el término  $[D - 10]$ , donde  $D$  es la dimensionalidad del espacio-tiempo. Obviamente, si establecemos  $D = 10$ , estas perturbadoras anomalías desaparecen, pero, si no lo hacemos, hallamos un universo alternativo lleno de contradicciones, en el que se incumple la lógica matemática. Del mismo modo, si se añaden membranas y se calcula con la teoría M, aparecen términos no deseados que contienen el factor  $[D - 11]$ . Así, dentro de la teoría de cuerdas, hay un único universo autoconsistente donde  $2 + 2 = 4$ , y eso sucede en diez o en once dimensiones).

Esta es, pues, una posible respuesta a la pregunta formulada por Einstein en su búsqueda de la teoría del todo: ¿tuvo Dios elección al hacer el universo? ¿Es el universo único, o hay muchas formas en las que puede existir?

Si estoy en lo cierto, no hay elección. Solo una ecuación puede describir el universo, porque todas las demás son matemáticamente incoherentes.

Así, la ecuación definitiva del universo es única. Puede haber un número infinito de soluciones para esta ecuación maestra, que nos den un paisaje de soluciones, pero la propia ecuación es única.

Esto arroja cierta luz sobre otra cuestión: ¿por qué hay algo en lugar de nada?

En la teoría cuántica, la nada absoluta no existe. Hemos visto que no hay oscuridad total, así que los agujeros negros son, en realidad, grises, y deben evaporarse. Asimismo, al resolver la teoría cuántica, hallamos que la menor energía no es cero. Por ejemplo, no es posible alcanzar el cero absoluto, porque los átomos, en su estado de energía cuántico más bajo, siguen vibrando (del mismo modo, según la mecánica cuántica, no se puede alcanzar este valor, porque siempre tenemos la energía del punto cero, esto es, las

vibraciones cuánticas más bajas. Un estado de vibración cero infringiría el principio de incertidumbre, ya que la energía cero es un estado de incertidumbre cero, que no es posible).

Y ¿de dónde vino entonces el Big Bang? Lo más probable es que de una fluctuación cuántica de la Nada. Incluso la Nada, o un vacío puro, está repleta de partículas de materia y antimateria que continuamente saltan fuera del vacío y colapsan de nuevo en el vacío. Así es como algo salió de la Nada.

Hawking, como hemos visto, llamaba a esto la «espuma del espacio-tiempo»; es decir, un hervidero de diminutos universos burbuja apareciendo y desapareciendo continuamente en el vacío. Nunca vemos esta espuma del espacio-tiempo porque cada burbuja es mucho más pequeña que cualquier átomo. Pero, de vez en cuando, una de ellas no desaparece, sino que continúa expandiéndose, hasta inflarse y crear todo un universo.

Entonces ¿por qué hay algo en lugar de nada? Porque, en su origen, nuestro universo vino de las fluctuaciones cuánticas en la Nada. A diferencia de otras innumerables burbujas, la nuestra saltó de la espuma del espacio-tiempo y siguió expandiéndose.

## ¿TUVO UN PRINCIPIO EL UNIVERSO O NO?

Esta teoría del todo ¿nos mostrará el sentido de la vida? Hace años vi un extraño póster de una asociación de meditación. Reconocí que reproducía fielmente la totalidad de los detalles de las ecuaciones de la supergravedad en todo su esplendor matemático. Junto a cada término de la ecuación, no obstante, había una flecha que decía «paz», «tranquilidad», «unidad», «amor», etcétera.

En otras palabras, el sentido de la vida estaba incorporado en las ecuaciones de la teoría del todo.

En mi opinión, creo que no es probable que un término puramente matemático de una ecuación física pueda igualarse al amor o a la felicidad.

Sin embargo, sí creo que la teoría del todo puede tener algo que decir sobre el sentido del universo. De niño recibí una educación presbiteriana, pero mis padres eran budistas. Estas dos grandes religiones tienen, a su vez, dos puntos de vista diametralmente opuestos en cuanto al Creador. Para la Iglesia

cristiana hubo un instante en el que Dios creó el mundo. El teólogo y físico Georges Lemaître, uno de los arquitectos de la teoría del Big Bang, creía que la teoría de Einstein era compatible con el Génesis.

En el budismo, en cambio, no hay Dios. El universo no tuvo principio ni fin. Solo hay un Nirvana intemporal.

Así pues, ¿cómo podemos decidirnos por estos puntos de vista tan opuestos? El universo tuvo un principio o no lo tuvo, no hay punto medio que valga.

Pero, en realidad, la teoría del multiverso ofrece una forma radicalmente nueva de ver esta contradicción.

Quizá nuestro universo sí tuvo un principio, como se menciona en la Biblia, pero puede que esté habiendo *big bangs* todo el tiempo, según la teoría de la inflación, y se esté creando un baño de burbujas cósmicas. Quizá estos universos se estén expandiendo en un terreno de juego mucho mayor, un Nirvana del hiperespacio. Así, nuestro universo tuvo un principio y es una burbuja tridimensional flotando en un Nirvana de once dimensiones, un espacio mucho mayor, en el que surgen continuamente otros universos.

De esta manera, la idea del multiverso nos permite combinar la mitología de la creación del cristianismo con el Nirvana del budismo en una única teoría compatible con las leyes físicas conocidas.

## EL SIGNIFICADO EN UN UNIVERSO FINITO

Finalmente, lo que yo creo es que nosotros mismos creamos nuestro propio significado en el universo.

Es demasiado simple que un gurú baje de la cima de una montaña y nos traiga el significado de todo. El sentido de la vida es algo que debemos luchar para comprender y apreciar. El hecho de que alguien nos lo dé frustra su propia finalidad. Si el sentido de la vida estuviera a nuestra disposición sin esfuerzo alguno, perdería su significado. Todo lo que importa es el resultado del esfuerzo y el sacrificio, y vale la pena luchar por ello.

Pero es difícil sostener que el universo tiene sentido si va a acabar por morir. En cierto modo, la física contiene la sentencia de muerte del universo.

A pesar de los eruditos debates sobre el sentido y el propósito del universo, quizá sea todo para nada, porque este está condenado a una muerte térmica. De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, todo lo que hay en un sistema cerrado debe deteriorarse en algún momento, corroerse o descomponerse. El orden natural de las cosas es degradarse y, finalmente, dejar de existir. Parece algo ineludible que todo deba morir cuando lo haga el propio universo. Así, sea cual fuera el sentido que le demos, desaparecerá cuando el universo muera.

Pero de nuevo quizá la combinación de la teoría cuántica con la relatividad nos proporcione una cláusula de salvaguardia. Hemos dicho que la segunda ley de la termodinámica acaba por condenar al universo en un sistema cerrado. La palabra clave es «cerrado». En un universo abierto, donde puede entrar energía del exterior, es posible revertir la segunda ley.

Por ejemplo, un aparato de aire acondicionado parece quebrantar la segunda ley, porque toma aire caliente y lo enfriá. Pero lo que hace el aparato es tomar energía del exterior, de una bomba, y no es, por tanto, un sistema cerrado. Asimismo, incluso la vida en la Tierra parece violar la segunda ley, porque se tarda solo nueve meses en convertir hamburguesas y patatas fritas en un bebé, lo cual es un verdadero milagro.

Entonces ¿por qué es posible la vida en la Tierra? Porque tenemos una fuente de energía externa, el Sol. Nuestro planeta no es un sistema cerrado: la luz solar nos permite obtener energía para crear la comida necesaria con que alimentar a un bebé. Así, la segunda ley de la termodinámica tiene una cláusula de salvaguardia. La luz del Sol hace posible la evolución de formas de vida superiores.

De igual modo, es posible utilizar agujeros de gusano para abrir un portal hacia otro universo. Este parece estar cerrado, pero puede que, algún día, nuestros descendientes se enfrenten a la muerte de nuestro universo y sean capaces de emplear sus magníficos conocimientos científicos en canalizar suficiente energía positiva para abrir un túnel a través del espacio y el tiempo, y luego aplicar energía negativa (del efecto cuántico Casimir) para estabilizar el portal. Algún día, nuestros descendientes dominarán la energía de Planck, aquella ante la que el espacio y el tiempo son inestables, y utilizarán su potente tecnología para huir de nuestro moribundo universo.

De esta manera, la gravedad cuántica, en lugar de ser un ejercicio matemático en el espacio-tiempo de once dimensiones, se convierte en un bote salvavidas cósmico interdimensional que permite a la vida inteligente

eludir la segunda ley de la termodinámica y huir hacia un universo mucho más cálido.

Así, la teoría del todo es algo más que un bello constructo matemático: podría llegar a ser nuestra única salvación.

## CONCLUSIÓN

**L**a búsqueda de la teoría del todo nos ha conducido a una misión para hallar la simetría de la unificación definitiva del universo. Desde una cálida brisa de verano hasta la magnificencia de una resplandeciente puesta de sol, la simetría que vemos a nuestro alrededor es un fragmento de la que había al principio de los tiempos. Esa simetría original de la superfuerza se rompió en el instante del Big Bang, y vemos sus restos dondequiera que admiramos la belleza de la naturaleza.

Me gusta pensar que, quizá, somos como habitantes de Planilandia, que viven en un mítico plano, incapaces de visualizar la tercera dimensión, que se considera una superstición y nada más. Al principio de los tiempos, en Planilandia, había un bello cristal tridimensional que, por alguna razón, era inestable y se rompió en un millón de pedazos que llovieron sobre el mundo. Durante siglos, los planilandeses han tratado de volver a montar estas piezas como si fuese un rompecabezas. Con el tiempo, pudieron unirlas hasta obtener dos trozos gigantes: uno de ellos se llamaba gravedad y el otro, teoría cuántica. Pero, por mucho que lo intentaban, los habitantes de Planilandia eran incapaces de unir estas dos piezas. Un día, un emprendedor planilandés realizó una conjetaura tan extravagante que hizo reír a todo el mundo. ¿Por qué no, dijo, utilizando las matemáticas, levantamos una de las piezas en una imaginaria tercera dimensión para poder unirlas, una encima de la otra? Después de hacer esto, los planilandeses quedaron asombrados y estupefactos al ver la espectacular y deslumbrante joya que apareció de repente ante ellos, con su perfecta y magnífica simetría.

O bien, como escribió Stephen Hawking:

Si descubrimos una teoría completa, sus principios deberían ser, con el tiempo, comprensibles para todos, no solo para unos pocos científicos.

Entonces, todos —filósofos, científicos y personas comunes y corrientes — podríamos tomar parte en el debate de por qué nosotros y el universo existimos. Hallar la respuesta a esta pregunta representaría el triunfo definitivo de la razón, porque entonces conoceríamos la mente de Dios<sup>[1]</sup>.

## Bibliografía recomendada

- Bartusiak, Marcia, *Einstein's Unfinished Symphony*, Londres, Yale University Press, 2017. [Hay trad. cast.: *La sinfonía inacabada de Einstein*, Océano Ámbar, Barcelona, 2002].
- Becker, Katrin, Melanie Becker y John Schwarz, *String Theory and M-Theory*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007.
- Crease, Robert P., y Charles C. Mann, *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics*, Nueva York, Macmillan, 1986.
- Einstein, Albert, *The Special and General Theory*, Dover Books, Nueva York, Mineola, 2001. [Hay trad. cast.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Madrid, Alianza, 2019].
- Feynman, Richard, *Surely You're Joking, Mr. Feynman: Adventures of a Curious Character*, Nueva York, W. W. Norton, 2018. [Hay trad. cast.: *¿Está usted de broma, Sr. Feynman?*, Madrid, Alianza, 2017].
- , Robert Leighton y Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Nueva York, Basic Books, 2010.
- Green, Michael, John Schwarz y Edward Witten, *Superstring Theory*, vols. 1 y 2, Cambridge, Cambridge University Press, 1987.
- Greene, Brian, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, Nueva York, W. W. Norton, 2010. [Hay trad. cast.: *El universo elegante. Supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría final*, Barcelona, Crítica, 2018].
- Hawking, Stephen, *A Brief History of Time*, Nueva York, Bantam Books, 1988. [Hay trad. cast.: *Historia del tiempo. Del Big Bang a los agujeros negros*, Barcelona, Crítica, 2013].
- , y Leonard Mlodinow, *The Grand Design*, Nueva York, Bantam, 2010. [Hay trad. cast.: *El gran diseño*, Barcelona, Crítica, 2012].
- Hossenfelder, Sabine, *Lost in Math: How Beauty Leads Physics Astray*, Nueva York, Basic Books, 2010. [Hay trad. cast.: *Perdidos en las matemáticas. Cómo la belleza confunde a los físicos*, Barcelona, Ariel, 2019].

- Isaacson, Walter, *Einstein: His Life and Universe*, Nueva York, Simon and Schuster, 2008. [Hay trad. cast.: *Einstein. Su vida y su universo*, Barcelona, Debate, 2020].
- Kaku, Michio, *Parallel Worlds. A Journey Through Creation, Higher Dimensions, and the Future of the Cosmos*, Nueva York, Random House, 2006. [Hay trad. cast.: *Universos paralelos*, Girona, Atalanta, 2015].
- , *Hyperspace. A Scientific Odyssey Through Parallel Universes, Time Warps, and the Tenth Dimension*, Nueva York, Oxford University Press, 1995. [Hay trad. cast.: *Hiperespacio. Una odisea científica a través de universos paralelos, distorsiones del tiempo y la décima dimensión*, Barcelona, Crítica, 2016].
- , *Introduction to String Theory and M-Theory*, Nueva York, Springer-Verlag, 1999.
- Kumar, Manhit, *Quantum. Einstein, Bohr, and the Great Debate About the Nature of Reality*, Nueva York, W. W. Norton, 2010.
- Lederman, Leon, *The God Particle. If the Universe Is the Answer, What Is the Question?*, Nueva York, Mariner Books, 2012. [Hay trad. cast.: *La partícula divina. Si el universo es la pregunta, ¿cuál es la respuesta?*, Barcelona, Crítica, 2007].
- Levin, Janna, *Black Holes Blues and Other Songs from Outer Space*, Nueva York, Anchor Books, 2017. [Hay trad. cast.: *El blues de los agujeros negros*, Madrid, Capitán Swing, 2021].
- Maxwell, Jordan, *The History of Physics. The Story of Newton, Feynman, Schrödinger, Heisenberg, and Einstein*, autoeditado, 2020.
- Misner, Charles W., Kip Thorne y John A. Wheeler, *Gravitation*, Princeton, Princeton University Press, 2017.
- Mlodinow, Leonard, *Stephen Hawking. A Memoir of Friendship and Physics*, Nueva York, Pantheon Books, 2020.
- Polchinski, Joseph, *String Theory*, 2 vols., Cambridge, Cambridge University Press, 1999.
- Smolin, Lee, *The Trouble with Physics. The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next*, Nueva York, Houghton Mifflin, 2006.
- Thorne, Kip, *Black Holes and Time Warps. Einstein's Outrageous Legacy*, Nueva York, W. W. Norton, 1994. [Hay trad. cast.: *Agujeros negros y tiempo curvo. El escandaloso legado de Einstein*, Barcelona, Crítica, 2018].
- Tyson, Neil deGrasse, *Death by Black Hole and Other Cosmic Quandaries*, Nueva York, W. W. Norton, 2007.
- Weinberg, Steven, *Dreams of a Final Theory. The Scientific Search for the Ultimate Laws of Nature*, Nueva York, Vintage Books, 1992. [Hay trad. cast.: *El sueño de una teoría final. La búsqueda de las leyes fundamentales de la naturaleza*, Barcelona, Crítica, 2010].

Wilczek, Frank, *Fundamentals. Ten Keys to Reality*, Nueva York, Penguin Books, 2021.

Woit, Peter, *Not Even Wrong. The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*, Nueva York, Basic Books, 2006.

## Agradecimientos

En la elaboración de este libro, tengo una profunda deuda con mi agente, Stuart Krichevsky, que ha estado fielmente a mi lado durante décadas, aconsejándome de la forma más sabia y sensata. Siempre he confiado en su buen juicio y en su profunda comprensión de los asuntos tanto literarios como científicos.

Quiero también dar las gracias a mi editor, Edward Kastenmeier, que ha llevado varios de mis libros con mano firme y aguda intuición. Él fue quien me sugirió que escribiese este, y lo ha acompañado en sus diversas fases. El libro habría sido imposible sin su atento y sincero consejo.

También quiero dar las gracias a mis colegas, compañeros y amigos en el terreno científico. En particular, a los siguientes nobeles por otorgarme generosamente su tiempo y su profundo conocimiento de la física y las ciencias en general: Murray Gell-Mann, David Gross, Frank Wilczek, Steve Weinberg, Yoichio Nambu, Leon Lederman, Walter Gilbert, Henry Kendall, T. D. Lee, Gerald Edelman, Joseph Rotblat, Henry Pollack, Peter Doherty y Eric Chivian. Por último, quisiera dar las gracias a los más de cuatrocientos físicos y científicos con los que he tenido el placer de relacionarme, tanto en la investigación de la teoría de cuerdas como en mis programas de radio semanales sobre ciencia, los diversos espacios de televisión que he presentado para BBC-TV y para Discovery Channel y Science Channel y mi trabajo como corresponsal científico para CBS-TV.

Para acceder una lista más completa de los científicos a los que he tenido el placer de entrevistar, consulte mi libro *La física del futuro. Cómo la ciencia determinará el destino de la humanidad y nuestra vida*. Para una lista más completa de destacados personajes de la teoría de cuerdas a cuya obra hago referencia en este libro, consulte mi libro de texto para doctorandos *Introduction to String Theory and M-Theory*.



Michio Kaku, nacido en 1947 en Estados Unidos, de padres japoneses, es un eminente físico teórico, uno de los creadores de la teoría de campos de cuerdas.

Es considerado como un futurista, un gran comunicador y un divulgador de la ciencia moderna. Es autor de varios libros relacionados con la física tales como *Física de lo imposible* publicado en 2008, y *Física del futuro* publicado en 2011. Ha aparecido en varios programas de televisión, programas de radio, películas y pone a disposición, a través de sus blogs, su trabajo.

## Índice de contenido

### Introducción a la teoría última

El sueño de Einstein

Un ejército de críticos

### 1. Unificación: el antiguo sueño

Renacer durante el renacimiento

La teoría de fuerzas de newton

¿Qué es la simetría?

Confirmación de las leyes de Newton

El misterio de la electricidad y el magnetismo

Las ecuaciones de Maxwell

¿El fin de la ciencia?

### 2. Einstein y la búsqueda de la unificación

Simetría y belleza

La gravedad como espacio curvado

Eclipse solar y gravedad

Newton y Einstein: polos opuestos

En busca de una teoría unificada

### 3. El auge del cuánto

La revolución cuántica

Ondas de electrones

Explicar la tabla periódica

La teoría del electrón de Dirac

¿Qué es lo que ondula?

Choque de titanes

El gato de Schrödinger

La energía del sol

La mecánica cuántica y la guerra

### 4. La teoría de casi todo

QED

Aplicaciones de la revolución cuántica

¿Qué es la vida?

La fuerza nuclear

Polos opuestos (segunda parte)

La fuerza débil y las partículas fantasma

La teoría de Yang-Mills

El bosón de Higgs: la partícula de Dios

La teoría de casi todo

El LHC

## 5. El universo oscuro

¿Qué es un agujero negro?

A través del agujero de gusano

Viajar en el tiempo

¿Cómo se creó el universo?

¿Por qué es negro el cielo nocturno?

La relatividad general y el universo

El resplandor cuántico después del Big Bang

La inflación

El universo desbocado

Se busca: el gravitón

## 6. El auge de la teoría de cuerdas: promesas y problemas

La teoría de cuerdas

Diez dimensiones

El gravitón

La supersimetría

Dos tipos de partículas subatómicas

La teoría M

El universo holográfico

Comprobar la teoría

Críticas a la teoría de cuerdas

¿Puede ser verificada?

La búsqueda de la materia oscura

Más allá del LHC

El Big Bang como colisionador de átomos

LISA

Verificar la ley del cuadrado inverso

El problema del paisaje

Mi punto de vista sobre la teoría de cuerdas

Revelar una pirámide

## 7. La búsqueda de sentido en el universo

Demostrar la existencia de Dios

Mi propio punto de vista

¿Tuvo un principio el universo o no?

El significado en un universo finito

Conclusión

Bibliografía recomendada

Agradecimientos

Sobre el autor

## **Notas**

**Introducción a la teoría última**

[1] En el pasado, muchos de los gigantes de la física han tratado, sin éxito, de crear su propia teoría del campo unificado. En retrospectiva, vemos que esta debe satisfacer tres criterios:

1. Debe contener la totalidad de la teoría de la relatividad general de Einstein.
2. Debe contener el modelo estándar de partículas subatómicas.
3. Debe producir resultados finitos.

Erwin Schrödinger, uno de los fundadores de la teoría cuántica, hizo una propuesta para la teoría del campo unificado que, de hecho, Einstein ya había estudiado. Fracasó porque no se ajustaba correctamente a la teoría del alemán ni podía explicar las ecuaciones de Maxwell (además, también carecía de descripción alguna de los electrones o de los átomos).

Wolfgang Pauli y Werner Heisenberg propusieron también una teoría del campo unificado que incluía los campos fermiónicos (de materia), pero no era renormalizable y no incorporaba el modelo de quarks, que haría su aparición décadas más tarde.

El propio Einstein investigó una serie de teorías que, en última instancia, no fueron válidas. Básicamente, trató de generalizar el tensor métrico de la gravedad y los símbolos de Christoffel para incluir tensores antisimétricos, con la intención de incorporar la teoría de Maxwell en la suya; pero, al final, su intento fracasó. La simple expansión del número de campos en la teoría original de Einstein no bastaba para explicar las ecuaciones de Maxwell. En este enfoque tampoco se mencionaba la materia.

A lo largo de los años se ha intentado varias veces sumar simplemente campos de materia a las ecuaciones de Einstein, pero se ha demostrado que divergían en el nivel de un bucle cuántico. De hecho, se han empleado ordenadores para calcular la dispersión de gravitones, en este caso, y se ha observado, de forma concluyente, que era infinita. Hasta ahora, la única forma conocida de eliminar estos infinitos en el nivel más bajo de un bucle es incorporar la supersimetría.

Ya en 1919 Theodor Kaluza expuso una idea más radical: expresó las ecuaciones de Einstein en cinco dimensiones. Sorprendentemente, cuando se reduce una dimensión a un diminuto círculo, se halla como resultado el

campo de Maxwell unido al campo gravitatorio de Einstein. El alemán estudió este punto de vista, pero al final se dejó de lado porque nadie entendía cómo condensar una dimensión. Más recientemente, el enfoque se ha incorporado en teoría de cuerdas, que condensa diez dimensiones en cuatro y, en el proceso, genera el campo de Yang-Mills. Así, de los muchos enfoques para una teoría del campo unificado, el único que ha llegado hasta nuestros días es el modelo de dimensiones superiores de Kaluza, pero generalizado para incluir supersimetría, supercuerdas y supermembranas.

En los últimos tiempos ha surgido una teoría llamada «gravedad cuántica de bucles», que investiga la teoría tetradimensional original de Einstein de una nueva forma. Sin embargo, es una teoría gravitatoria pura y dura, sin electrones ni partículas subatómicas, por lo que no se puede calificar de teoría del campo unificado; no menciona en absoluto el modelo estándar, porque carece de campos de materia. Asimismo, no está claro si la dispersión de multibucle en este formalismo es realmente finita; se especula que la colisión entre dos bucles tiene resultados divergentes. <<

## **1. Unificación: el antiguo sueño**

[1] Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, Nueva York, Pantheon, 1992, p. 11. [Hay trad. cast.: *El sueño de una teoría final. La búsqueda de las leyes fundamentales de la naturaleza*, Barcelona, Crítica, 2010]. <<

[2] Los *Principia* estaban escritos de forma puramente geométrica, por lo que está claro que Newton era consciente de la potencia de la simetría. También lo está que, con gran intuición, sacó partido de esta para calcular el movimiento de los planetas. Sin embargo, como no utilizó la forma analítica del cálculo, que implicaría el uso de símbolos como  $x^2 + y^2$ , su manuscrito no representa la simetría analíticamente en términos de coordenadas  $x$  e  $y$ . <<

[3] James Clerk Maxwell, *Quotefancy.com*, [quotefancy.com/quote/1572216.](http://quotefancy.com/quote/1572216)

<<

[4] Desde un punto de vista técnico, las ecuaciones de Maxwell no son completamente simétricas entre los campos eléctrico y magnético. Por ejemplo, los electrones son la fuente de los campos eléctricos, pero las ecuaciones de Maxwell predicen también la presencia de otras para el campo magnético, denominadas «monopolos» (es decir, los polos norte y sur del magnetismo, aislados), que no se han detectado nunca. Por tanto, algunos físicos han conjeturado que, algún día, es posible que se descubran estos monopolos. <<

## **2. Einstein y la búsqueda de la unificación**

[1] Abraham Pais, *Subtle Is the Lord*, Nueva York, Oxford University Press, 1982, p. 41. [Hay trad. cast.: *El Señor es sutil. La ciencia y la vida de Albert Einstein*, Barcelona, Ariel, 1984]. <<

[2] Albert Einstein, *Quotation.io*, [<u>quotation.io/page/quote/storm-broke-loose-mind</u>](https://www.quotation.io/page/quote/storm-broke-loose-mind). <<

[3] Albrecht Fölsing, *Albert Einstein*, trad. al inglés y abreviado por Ewald Osers, Nueva York, Penguin Books, 1997, p. 152. <<

[4] G. H. Hardy, *Wikiquote*, [en.wikiquote.org/wiki/G.\\_H.\\_Hardy](https://en.wikiquote.org/wiki/G._H._Hardy). <<

[5] Así, a pesar de que la relatividad especial tiene una simetría tetradimensional, como se ve por el simple teorema de Pitágoras en cuatro dimensiones  $x^2 + y^2 + z^2 - T^2$  (en determinadas unidades), el tiempo entra con un signo menos adicional, comparado con las otras dimensiones espaciales. Esto significa que el tiempo es, en efecto, la cuarta dimensión, pero de un tipo especial; en particular, que no es posible viajar al futuro y al pasado con facilidad (en caso contrario, los viajes temporales serían cosa de cada día). Es sencillo avanzar y retroceder en el espacio, pero no en el tiempo, debido a ese signo negativo extra. (Asimismo, observe que hemos definido la velocidad de la luz como 1, en ciertas unidades, para que quede claro que el tiempo entra en la relatividad especial como la cuarta dimensión). <<

[6] Brandon R. Brown, «Max Planck: Einstein's Supportive Skeptic in 1915», *OUPblog*, 15 de noviembre de 2015, [blog.oup.com/2015/11/einstein-planck-general-relativity. <<](http://blog.oup.com/2015/11/einstein-planck-general-relativity. <<)

[7] Albrecht Fölsing, *Albert Einstein*, op cit., p. 374. <<

[8] Denis Brian, *Einstein*, Nueva York, Wiley, 1996, p. 102. [Hay trad. cast.: *Einstein*, Madrid, Acento, 2004]. <<

[9] Max Planck, *Scientific Autobiography and Other Papers*, Leipzig, Johann Ambrosius Barth, 1948, p. 22. <<

[10] Jeremy Bernstein, «Secrets of the Old One», 2.<sup>a</sup> parte, *The New Yorker*, 17 de marzo de 1973, p. 60. <<

### **3. El auge del cuanto**

[1] Richard Feynman, *Wikiquote*, [<< en.wikiquote.org/wiki/Talk:Richard\\_Feynman](http://en.wikiquote.org/wiki/Talk:Richard_Feynman)

[2] Citado en Albrecht Fölsing, *Albert Einstein*, trad. al inglés y abreviado por Ewald Osers, Nueva York, Penguin Books, 1997, p. 516. <<

[3] Citado en Denis Brian, *Einstein*, Nueva York, Wiley, 1996, p. 306. [Hay trad. cast.: *Einstein*, Madrid, Acento, 2004]. <<

[4] Aún en nuestros días, no hay una solución universalmente aceptada al problema del gato. La mayor parte de los físicos utilizan la mecánica cuántica tan solo como un recetario que siempre ofrece la respuesta apropiada, e ignoran las implicaciones filosóficas más sutiles y profundas. La mayoría de las asignaturas universitarias no avanzadas de mecánica cuántica (incluida la que yo mismo imparto) se limitan a mencionar el problema del gato sin ofrecer una solución definitiva. Se han propuesto distintas soluciones al respecto, generalmente variaciones de dos enfoques bien conocidos. Uno de ellos consiste en suponer que la conciencia del observador debe formar parte del proceso de cálculo. Hay variaciones en este punto de vista en función de cómo se define «conciencia». Otra solución, que está ganando popularidad entre los físicos, es la teoría del multiverso, en la que el universo se divide en dos: uno de ellos con el gato vivo y el otro, con el gato muerto. No obstante, es casi imposible pasar de uno de estos universos al otro, porque se han «descohesionado» entre sí, es decir, ya no vibran al unísono, de manera que ya no pueden comunicarse entre ambos. De la misma forma que dos emisoras de radio no pueden interactuar entre sí, nos hemos descohesionado de todos los demás universos paralelos. Así, extravagantes universos cuánticos pueden coexistir con el nuestro, pero es casi imposible comunicarse con ellos. Quizá tengamos que esperar más tiempo que la propia edad del universo para pasar a alguno de ellos. <<

#### **4. La teoría de casi todo**

[1] Denis Brian, *Einstein*, Nueva York, Wiley, 1996, p. 359. [Hay trad. cast.: *Einstein*, Madrid, Acento, 2004]. <<

[2] Citado en Walter Moore, *A Life of Erwin Schrödinger*, Cambridge, Cambridge University Press, 1994, p. 308. <<

[3] Nigel Calder, *The Key to the Universe*, Nueva York, Viking, 1977, p. 15.

<<

[4] Citado en William H. Cropper, *Great Physicists*, Oxford, Oxford University Press, 2001, p. 252. <<

[5] Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, Nueva York, Pantheon, 1992; Nueva York, Vintage, 1994, p. 115. [Hay trad. cast.: *El sueño de una teoría final*, Barcelona, Crítica, 2001]. <<

[6] John Gribbin, *In Search of Schrödinger's Cat*, Nueva York, Bantam Books, 1984, p. 259. [Hay trad. cast.: *En busca del gato de Schrödinger*, Barcelona, Salvat, 1994]. <<

[7] Citado en Dan Hooper, *Dark Cosmos*, Nueva York, HarperCollins, 2006, p. 59. <<

[8] Frank Wilczek y Betsy Devine, *Longing for Harmonies*, Nueva York, Norton, 1988, p. 64. <<

[9] Robert P. Crease y Charles C. Mann, *The Second Creation*, Nueva York, Macmillan, 1986, p. 326. <<

[10] La simetría matemática que combina tres quarks se llama SU(3), el grupo unitario especial de grado 3 del álgebra de Lie. Así, al reorganizar los tres quarks de acuerdo con la simetría SU(3), la ecuación final para la fuerza nuclear fuerte debe seguir siendo la misma. La simetría que combina el electrón y el neutrino en la fuerza nuclear débil se denomina SU(2), el grupo de grado 2 del álgebra de Lie. (En general, si empezamos con  $n$  fermiones, es pura lógica escribir una teoría con simetría SU[ $n$ ]). La simetría que viene de la teoría de Maxwell se denomina U(1), por lo tanto, al fusionar estas tres teorías, hallamos que el modelo estándar tiene simetría  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ .

<<

A pesar de que el modelo estándar se ajusta a todos los datos experimentales de la física subatómica, la teoría parece artificiosa, porque se basa en remendar mecánicamente tres fuerzas entre ellas.

[11] Para comparar la simplicidad de las ecuaciones de Einstein con la complejidad del modelo estándar, digamos que la teoría del alemán se puede resumir en una única y breve ecuación:

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Mientras que las ecuaciones del modelo estándar (escritas de forma muy abreviada) requieren casi toda una página, pues detallan los diversos quarks, electrones, neutrinos, gluones, partículas de Yang-Mills y bosones de Higgs:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{2}\text{Tr}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} - \frac{1}{2}\text{Tr}W_{\mu\nu}W^{\mu\nu} - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ & +(D_\mu\phi)^\dagger D^\mu\phi + \mu^2\phi^\dagger\phi - \frac{1}{2}\lambda(\phi^\dagger\phi)^2 \\ & + \sum_{f=1}^3(\bar{\ell}_L^f i\cancel{D}\ell_L^f + \bar{\ell}_R^f i\cancel{D}\ell_R^f + \bar{q}_L^f i\cancel{D}q_L^f + \bar{d}_R^f i\cancel{D}d_R^f + \bar{u}_R^f i\cancel{D}u_R^f) \\ & - \sum_{f=1}^3y_\ell^f(\bar{\ell}_L^f\phi\ell_R^f + \bar{\ell}_R^f\phi^\dagger\ell_L^f) \\ & - \sum_{f,g=1}^3\left(y_d^{fg}\bar{q}_L^f\phi d_R^g + (y_d^{fg})^*\bar{d}_R^g\phi^\dagger q_L^f + y_u^{fg}\bar{q}_L^f\tilde{\phi} u_R^g + (y_u^{fg})^*\bar{u}_R^g\tilde{\phi}^\dagger q_L^f\right) \end{aligned}$$

Sorprendentemente, sabemos que todas las leyes físicas del universo pueden, en principio, derivarse de esta página de ecuaciones. El problema es que las dos teorías —la de la relatividad de Einstein y el modelo estándar— se basan en matemáticas, hipótesis y campos diferentes. El objetivo final es combinar estos dos conjuntos de ecuaciones en algo exclusivo, unificado y finito. La observación fundamental es que cualquier teoría que aspire a ser una teoría del todo debe contener ambos conjuntos de ecuaciones y seguir siendo finita. Hasta ahora, de las diversas que se han propuesto, la única que puede hacerlo es la teoría de cuerdas. <<

## **6. El auge de la teoría de cuerdas: promesas y problemas**

[1] El doctor Kikkawa y yo somos cofundadores de una rama de la teoría de cuerdas denominada «teoría de campo de cuerdas», que permite expresar la totalidad de aquella en el lenguaje de los campos, lo cual resulta en una ecuación simple de pocos centímetros:

$$L = \Phi^\dagger(i\partial_\tau - H)\Phi + \Phi^\dagger * \Phi * \Phi$$

Aunque esto nos permite expresar toda la teoría de cuerdas de un modo compacto, no es su formulación última. Como veremos, hay cinco tipos diferentes de teoría de cuerdas, cada uno de los cuales requiere una teoría de campo de cuerdas. Pero, si vamos a la undécima dimensión, las cinco teorías parecen converger en una sola ecuación, descrita por algo llamado «teoría M», que incluye toda una variedad de membranas, aparte de cuerdas. Actualmente, como es tan difícil trabajar con membranas en términos matemáticos, sobre todo en once dimensiones, nadie ha podido expresar la teoría M en una única ecuación de teoría de campo de cuerdas. Esto es, de hecho, uno de los principales objetivos de la teoría de cuerdas: hallar la formulación definitiva de la teoría a partir de la cual podemos extraer resultados físicos. En otras palabras, es probable que la teoría de cuerdas aún no haya llegado a su forma final. <<

[2] Nigel Calder, *The Key to the Universe*, Nueva York, Viking, 1977, p. 185.

<<

[3] Más exactamente, la dualidad hallada por Maldacena estaba entre  $n = 4$ , la teoría supersimétrica de Yang-Mills en cuatro dimensiones, y la teoría de cuerdas de tipo IIB, en diez dimensiones. Se trata de una dualidad en absoluto trivial, porque muestra la equivalencia entre una teoría de gauge con partículas de Yang-Mills en cuatro dimensiones y la teoría de cuerdas en diez dimensiones, que en general se consideran distintas. Esta dualidad demostraba una profunda relación entre las teorías de gauge, que se hallan en las interacciones fuertes en cuatro dimensiones, y la teoría de cuerdas de diez dimensiones, lo cual no deja de ser relevante. <<

[4] Citado en William H. Cropper, *Great Physicists*, Oxford, Oxford University Press, 2001, p. 257. <<

[5] Sean Carroll, «Column: Welcome to the Multiverse», *Preposterous Universe* (blog), [Página 187](http://preposterousuniverse.com/blog/2011/10/18/column>Welcome to the Multiverse/comment-page-2.</a> <<</p></div><div data-bbox=)

[6] Sheldon Glashow y Ben Bova, *Interactions*, Nueva York, Warner Books, 1988, p. 330. [Hay trad. cast.: *Interacciones. Una visión del mundo desde el encanto de los átomos*, Barcelona, Tusquets, 1994]. <<

[7] Citado en Howard A. Baer y Alexander Belyaev, *Proceedings of the Dirac Centennial Symposium*, Singapur, World Scientific Publishing, 2003, p. 71.

<<

[8] Sabine Hossenfelder, «You Say Theoretical Physicists Are Doing Their Job All Wrong. Don't You Doubt Yourself?», *Back Reaction* (blog), 4 de octubre de 2018, [backreaction.blogspot.com/2018/10/you-say-theoretical-physicists-are.html](http://backreaction.blogspot.com/2018/10/you-say-theoretical-physicists-are.html). <<

## 7. La búsqueda de sentido en el universo

[1] Stephen Hawking, *A Brief History of Time*, Nueva York, Bantam Books, Nueva York, 1988, p. 175. [Hay trad. cast.: *Historia del tiempo. Del Big Bang a los agujeros negros*, Barcelona, Crítica, 2013]. <<

[\*] Para entenderlo mejor, vamos a considerar que  $z = 0$ . Entonces, la esfera se reduce a un círculo en el plano  $x, y$ , igual que antes. Hemos visto que, al movernos alrededor de este círculo, tenemos  $x^2 + y^2 = R^2$ . Ahora vamos a incrementar  $z$  poco a poco: el círculo se hace menor a medida que nos elevamos (el círculo corresponde a las líneas de igual latitud en una esfera).  $R$  sigue siendo igual, pero la ecuación para el círculo pequeño con un valor fijo de  $z$  se convierte en  $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$ . Ahora, si dejamos que  $z$  varíe, veremos que cualquier punto de la esfera tiene unas coordenadas dadas por  $x, y$  y  $z$ , por lo que se cumple el teorema de Pitágoras tridimensional. Así, en resumen, todos los puntos de una esfera se pueden describir por el teorema de Pitágoras en tres dimensiones, de manera que  $R$  sigue siendo igual, pero  $x, y$  y  $z$  varían al movernos por la esfera. La gran idea de Einstein fue generalizar esto a cuatro dimensiones, siendo el tiempo la cuarta dimensión. <<

[\*] En inglés, *glue*. (*N. del T.*) <<