

PARTE I

1942-1975

1

La búsqueda de una teoría del todo

1980

En el centro de Cambridge, Inglaterra, hay un puñado de estrechos caminos que apenas parecen tocados por los siglos xx o xxi. Esas casas y edificios representan una mezcla de épocas pero, al doblar la esquina de las calles más amplias y penetrar en esos pequeños vericuetos, se da un paso atrás en el tiempo y se entra en un camino que transcurre entre paredes de antiguas facultades o por una calle de pueblo que pasa junto a una iglesia medieval, un cementerio o una cervecería. Apenas se perciben los ruidos del tráfico de las carreteras cercanas, igualmente viejas pero más transitadas. El silencio es casi absoluto, roto solo por cantos de pájaros, voces y pisadas. Los estudiantes y la gente del pueblo han caminado por aquí durante siglos.

Cuando escribí mi primer libro sobre Stephen Hawking en 1990, comencé la historia en una de esas pequeñas calles, en Free School Lane. Esa calle sale de Bene't Street, junto a la iglesia de San Bene't con su torre campanario del siglo xi. A la vuelta de la esquina, las flores y las ramas aún se marchitan en el camino, entre las estacas de hierro de la verja del cementerio de la iglesia, como ocurría hace veinte años. Las bicicletas encadenadas allí contrastan con el aspecto vetusto del lugar, pero un poco más allá, a la derecha, hay una pared de piedras ásperas negras con estrechas ventanas hendidas en la fachada del antiguo patio del *college* del Corpus Christi del siglo xiv, el patio más antiguo de Cambridge. Si nos damos media vuelta, veremos, arriba, junto a una puerta de estilo gótico, una placa en la que se lee «LABORATORIO CAVENDISH». Esa puerta y el pasillo que hay al otro lado de ella son un portal a una época más reciente, extrañamente enclavado en la calle medieval.

No queda ni un indicio del monasterio que estuvo en este emplazamiento en el siglo xii o de los jardines que más tarde se plantaron sobre sus ruinas. En su lugar, edificios lóbregos con aspecto de fábrica, casi tan agobiantes

como una prisión, descuellan sobre el asfalto gris del pavimento. La situación mejora en el interior del complejo, y en las dos décadas desde que escribí por primera vez sobre ello se han construido algunos nuevos edificios, pero las paredes de cristal de estas modernas y bien diseñadas estructuras están aún condenadas a reflejar poco más que la desolación de sus vecinos más antiguos.

Durante un siglo, hasta que la Universidad de Cambridge construyó los «Nuevos» Laboratorios Cavendish en 1974, este complejo albergaba uno de los más importantes centros de investigación de física del mundo. Aquí, «J. J.» Thomson descubrió el electrón, Ernest Rutherford investigó la estructura del átomo, y la lista sigue y sigue. Cuando asistí a clases aquí hacia 1990 (ya que no todo se trasladó al Nuevo Cavendish en 1974), todavía se utilizaban enormes pizarras de tiza, que se subían y bajaban muy ruidosamente con un sistema de poleas con cadenas que se activaba con manivela para hacer sitio a las interminables cadenas de ecuaciones en una clase de física.

El Aula Cockcroft, situada en ese mismo lugar, está mucho más actualizada. Aquí, el 29 de abril de 1980, científicos, invitados y dignatarios de universidad se reunieron en las filas de asientos del anfiteatro, delante de una pizarra de tiza de una altura de dos pisos y una pantalla de diapositivas (fue mucho antes del advenimiento del Power Point). Se celebraba la lección inaugural del nuevo profesor lucasiano de matemáticas, de treinta y ocho años de edad, matemático y físico, Stephen William Hawking. Se le había concedido esa ilustre cátedra el otoño anterior.

El título anunciado de su ponencia era una pregunta: «Is the End in Sight for Theoretical Physics?» «¿Se acerca el final de la física teórica?». Hawking sobresaltó a sus oyentes al anunciar que él creía que era así. Los invitó a unirse a él en una escapada sensacional a través del tiempo y el espacio en una búsqueda del Santo Grial de la ciencia: la teoría que explica el universo y todo lo que sucede en él, y que algunos dieron en llamar la teoría del todo.

Al ver a Stephen Hawking, sentado en silencio en una silla de ruedas mientras uno de sus estudiantes leía su ponencia a la audiencia, cualquiera que no lo conociera habría pensado que no era la mejor elección para dirigir tal aventura. Para él, la física teórica era una fantástica forma de escapar de una prisión más lúgubre que cualquiera de las que sugerían los viejos laboratorios Cavendish. Desde que era un estudiante de licenciatura de veintipocos años, había tenido que convivir con una discapacidad invasiva y con la promesa de una muerte temprana. Hawking sufre esclerosis lateral amiotrófica, conocida en Estados Unidos como la enfermedad de Lou Gehrig, en recuerdo al que fuera primer base de los Yankees de Nueva York, que murió de ella.*

* Hay evidencias recientes de que Gehrig pudo no haber tenido esclerosis lateral amiotrófica, sino otra enfermedad parecida.

Aunque en el caso de Hawking el avance de la enfermedad había sido lento, cuando llegó a ser profesor lucasiano ya no podía caminar, escribir, comer solo, o levantar la cabeza si se le caía hacia delante. Al hablar arrastraba las palabras y era casi ininteligible excepto para aquellos que mejor lo conocían. Para su ponencia lucasiana, dictó el texto con anterioridad con grandes y dolorosos esfuerzos, para que un estudiante pudiera leerlo. No obstante, Hawking en realidad no era y no es un inválido. Al contrario, es un activo matemático y físico, a quien algunos incluso entonces consideraban la personalidad más brillante en esas disciplinas desde Einstein. Ser profesor lucasiano es una posición de tremendo prestigio en la Universidad de Cambridge, que se remonta a 1663. El segundo ocupante de la cátedra fue sir Isaac Newton.

Era típico de la iconoclastia de Hawking empezar su distinguida carrera profesoral prediciendo el final de su propio campo. Afirmaba que había una gran probabilidad de descubrir una teoría del todo antes del final del siglo xx, lo que dejaría poco que hacer a los físicos teóricos como él mismo.

Desde esa conferencia mucha gente consideró a Stephen Hawking como el portaestandarte de la búsqueda de esa teoría. Sin embargo, el punto de partida que él propuso para elaborar esa teoría del todo no era ninguna de sus propias teorías sino «la supergravedad $N=8$ », una teoría que muchos físicos en aquel tiempo esperaban que unificara todas las partículas y las fuerzas de la naturaleza. Hawking se apresuró a señalar que su trabajo era solo una parte de un lienzo mucho más grande, en el que participaban físicos de todo el mundo, y que, además, provenía de una búsqueda muy antigua. El anhelo por comprender el universo debe de ser tan antiguo como la conciencia humana. Desde que los seres humanos empezaron por primera vez a observar los cielos nocturnos así como la enorme variedad de la naturaleza que nos rodea, y se preguntaron por su propia existencia, intentaron explicar todas estas cuestiones con mitos, religión y más tarde con las matemáticas y la ciencia. Tal vez no estemos más cerca de comprender la pintura completa que nuestros más remotos ancestros, pero a la mayoría de nosotros nos gusta pensar, como hace Stephen Hawking, que sí lo estamos.

La historia de la vida de Hawking y de su ciencia continúan llenas de paradojas. Las cosas a menudo no son lo que parecen. Piezas que deberían encajar, se resisten a hacerlo. Los comienzos pueden ser finales; circunstancias crueles pueden conducir a la felicidad, aunque la fama y el éxito no lo hagan; dos teorías científicas geniales y de gran éxito unidas parecen producir un sinsentido; el espacio vacío no está vacío; los agujeros negros no son negros; el esfuerzo por incluir todo en una explicación sencilla revela una imagen fragmentada; y un hombre cuya apariencia produce impacto y lástima nos lleva alegremente adonde los límites del tiempo y el espacio deberían estar (pero no están).

Miremos adonde miremos en nuestro universo, encontraremos que la realidad es asombrosamente compleja y escurridiza, a veces ajena, no siempre fácil de percibir y a menudo imposible de predecir. Más allá de nuestro universo puede haber un número infinito de otros universos. El final del siglo xx llegó y pasó, y todavía nadie ha descubierto la teoría del todo. ¿Dónde queda entonces la predicción de Stephen Hawking? ¿Puede una teoría científica explicar realmente *todo*?

2

Nuestro objetivo es simplemente una descripción completa del universo en el que vivimos

LA IDEA DE QUE toda la increíble complejidad y variedad que experimentamos en el mundo y el cosmos puede reducirse a algo sorprendentemente sencillo no es nuevo ni inverosímil. El sagaz Pitágoras y sus seguidores del sur de Italia en el siglo VI a. C. estudiaron las relaciones entre la longitud de las cuerdas de una lira y los tonos musicales que estas producían, y se dieron cuenta de que escondidos detrás de la confusión y la complejidad de la naturaleza hay modelos, orden, racionalidad. Durante los dos milenios y medio que han pasado desde entonces, nuestros antepasados han seguido investigando y han descubierto (a menudo, como los pitagóricos, para su sorpresa y asombro) que la naturaleza es menos complicada de lo que parece a primera vista.

Imagine, si puede, que es usted un alienígena superinteligente que no tiene ninguna experiencia de nuestro universo: ¿hay un juego de reglas tan completo cuyo estudio nos permita descubrir exactamente cómo es nuestro universo? Supongamos que alguien le diera ese libro de reglas. ¿Sería un libro *corto*?

Durante décadas muchos físicos creyeron que el libro de reglas no era largo y que contenía un juego de principios bastante sencillos, quizá incluso un solo principio que está detrás de todo lo que ha sucedido, está sucediendo, y sucederá en nuestro universo. En 1980 Stephen Hawking hizo la osada afirmación de que tendríamos el libro de reglas en nuestras manos a finales del siglo XX.

Mi familia poseía un facsímil de museo de un antiguo juego de mesa. Los arqueólogos que trabajaban en las ruinas de la ciudad de Ur en Mesopotamia desenterraron un tablero de marquetería exquisito con unas pocas piecitas talladas. Era obviamente un elaborado juego, pero nadie conocía sus reglas. Los autores del facsímil habían intentado deducir las reglas a partir del diseño del tablero y sus piezas, pero se animaba a quienes, como nosotros, com-

praran el juego a tomar sus propias decisiones y descubrir por cuenta propia cómo jugar con él.

El universo se puede concebir como algo parecido: un juego magnífico, elegante y misterioso. Ciertamente hay reglas, pero el libro que las recogía no venía con el juego. El universo no es una bella reliquia como el juego encontrado en Ur. Sí, es viejo, pero el juego continúa. Y en el centro de la jugada nos encontramos nosotros y todo nuestro conocimiento del universo (que no es mucho). Si hay una teoría del todo, nosotros y todo en el universo debemos obedecer sus principios, incluso mientras intentamos descubrir cuáles son.

Deberíamos esperar que las reglas completas, no abreviadas del universo, llenasen una amplia biblioteca o superordenador. Habría reglas que marcarían cómo se forman las galaxias y cómo se mueven, cómo funciona el cuerpo humano y cómo deja de funcionar, cómo se relacionan entre sí los seres humanos, cómo interactúan las partículas subatómicas, cómo se congela el agua, cómo crecen las plantas, cómo ladran los perros... Reglas intrincadas dentro de otras reglas, que a su vez se engloban dentro de otras reglas. ¿Cómo se podría llegar a pensar que todo esto podría reducirse a unos pocos principios?

Richard Feynman, físico estadounidense y premio Nobel, dio un ejemplo excelente de cómo tiene lugar ese proceso de reducción. Hubo un tiempo, señaló, en el que teníamos algo que llamábamos movimiento y otra cosa llamada calor y otra cosa más que llamábamos sonido. Feynman escribió:

No obstante, pronto se descubrió, después de que sir Isaac Newton explicara las leyes del movimiento, que algunas de esas cosas aparentemente diferentes eran aspectos de la misma cosa. Por ejemplo, los fenómenos del sonido pueden explicarse como el movimiento de los átomos en el aire. Así, el sonido ya no se consideró algo añadido al movimiento. Más tarde, también se descubrió que los fenómenos del calor se comprenden fácilmente a partir de la leyes del movimiento. De este modo, grandes pegotes de teoría física se sintetizaron en una teoría simplificada.¹

LA VIDA ENTRE PEQUEÑAS PIEZAS

Toda la materia, tal y como normalmente la concebimos en el universo (usted, yo, el aire, el hielo, las estrellas, los gases, los microbios, este libro), está formada por bloques de construcción minúsculos llamados átomos. Los átomos a su vez están hechos de objetos más pequeños llamados partículas, y mucho espacio vacío.

Las partículas de materia que nos resultan más familiares son los electrones que orbitan en torno a los núcleos de los átomos, y los protones y neu-

trones que se arraciman en sus núcleos. Los protones y neutrones están hechos de partículas de materia aún más diminutas llamadas «quarks». Todas las partículas de materia pertenecen a una clase de partículas llamadas «fermiones», en honor al gran físico italiano Enrico Fermi. Entre ellas, existe un sistema de mensajes, según el cual actúan y se modifican de varias maneras. Un grupo de humanos podría tener un sistema de mensajes que consistiera en cuatro servicios diferentes: teléfono, fax, e-mail y correo normal tradicional. No todos los humanos enviarían y recibirían mensajes ni influirían en los demás por medio de los cuatro servicios de mensaje. De manera semejante, se puede concebir el sistema de mensajes entre los fermiones como esos cuatro servicios de mensajes, que, en este caso, llamaremos fuerzas. Hay otra clase de partículas que transmite esos mensajes entre los fermiones, y a veces también entre ellas mismas: son las partículas «mensajeras», que con mayor propiedad habría que llamar «bosones». Al parecer, toda partícula en el universo es un fermión o un bosón.

Una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza es la gravedad. Podemos concebir la fuerza de la gravedad que nos mantiene sujetos a la Tierra como «mensajes» que unos bosones llamados gravitones transportan entre las partículas de los átomos de nuestros cuerpos y las partículas de los átomos de la Tierra, y que influyen en las partículas para que se compriman más. La gravedad es la más débil de las fuerzas, pero, como veremos más tarde, es una fuerza de largo alcance y actúa sobre todas las cosas del universo. Cuando se suma puede dominar a todas las demás fuerzas.

Una segunda fuerza, la fuerza electromagnética, consiste en mensajes que transportan unos bosones llamados fotones entre los protones del núcleo de un átomo, entre los protones y los electrones cercanos, y entre los electrones. La fuerza electromagnética hace que los electrones orbiten alrededor del núcleo. En la experiencia diaria, los fotones se muestran como luz, calor, ondas de radio, microondas y otras ondas, todas conocidas como radiación electromagnética. La fuerza electromagnética es también de largo alcance y mucho más fuerte que la gravedad, pero actúa solo sobre partículas con una carga eléctrica.

Un tercer servicio de mensajes, la fuerza nuclear fuerte, hace que el núcleo del átomo se mantenga unido.

El cuarto, la fuerza nuclear débil, produce la radiactividad y desempeña un papel necesario en las estrellas y en el universo temprano, en la formación de los elementos.

Las actividades de estas cuatro fuerzas (la fuerza gravitatoria, la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil) son responsables de trasladar los mensajes entre los fermiones en el universo y de todas las interacciones entre ellos. Sin estas cuatro fuerzas, cada fermión (cada partícula de materia) existiría, si existiese, aislado, y no podría con-

tactar o influir en otros, ni se percataría de los demás. En definitiva, cualquier cosa que *no* ocurra a consecuencia de una de las cuatro fuerzas simplemente no ocurre. Si esta idea es correcta, comprender por completo estas fuerzas nos permitiría entender los principios subyacentes a todo lo que ocurre en el universo, de modo que ya tenemos un libro de reglas notablemente resumido.

Buena parte del trabajo de los físicos en el siglo xx tenía como objetivo aprender más sobre cómo operan las cuatro fuerzas de la naturaleza y cómo están relacionadas. En nuestro sistema de mensajes humano, podríamos descubrir que el teléfono, el fax y el e-mail no están realmente tan alejados después de todo, sino que pueden entenderse como la misma cosa que se muestra de tres maneras diferentes. Ese descubrimiento «unificaría» los tres servicios de mensajes. De manera similar, los físicos han buscado, con cierto éxito, unificar las fuerzas. En los últimos tiempos se espera encontrar una teoría que explique las cuatro fuerzas como una que se presenta de diferentes maneras, una teoría que puede incluso unir fermiones y bosones en una familia única. Esa teoría sería la teoría unificada.

Una teoría que explicara el universo, la teoría del todo, debe llegar un poco más lejos. A Stephen Hawking le interesaba particularmente responder a la pregunta de cómo era el universo cuando se originó, antes de que transcurriera tiempo alguno. Los físicos plantean así la pregunta: ¿cuáles eran las «condiciones iniciales» o «las condiciones límite en el comienzo del universo»? Como el tema de las condiciones límite ha estado y sigue estando en el centro de las investigaciones de Hawking, debemos dedicarle cierto tiempo.

EL RETO DEL LÍMITE

Supongamos que montamos una maqueta de ferrocarril, luego colocamos varios trenes sobre las vías e instalamos los interruptores y válvulas que controlan la velocidad del tren tal y como deseamos, todo ello antes de conectar el aparato. En este momento, hemos establecido las condiciones límite. Cuando empecemos a jugar con el tren, las cosas se hallarán en un estado preciso y no en otro. Dónde esté cada tren después de haber encendido el aparato o si un tren choca con otro dependerá en gran medida de esas condiciones límite.

Imaginemos que después de dejar circular los trenes durante diez minutos, sin ninguna interferencia, un amigo entra en la habitación y apagamos el aparato. Ahora tenemos un segundo grupo de condiciones límite: la posición precisa en la que se encuentran todos los elementos del circuito en el instante en que lo apagamos. Supongamos ahora que retamos a nuestro amigo a que

intente averiguar exactamente dónde estaban todos los trenes diez minutos antes. Se plantearían muchas más preguntas además de cuál era la posición inicial de los trenes y cómo hay que colocar las válvulas e interruptores: ¿con qué velocidad acelera y se detiene cada uno de los trenes? ¿Ofrecen más resistencia algunas partes de las vías que otras? ¿Cuánta inclinación tienen las pendientes? ¿Es constante el suministro de energía? ¿Tenemos certeza de que no ha habido nada que interfiriera con el funcionamiento del juego del tren, es decir, algo que ya no sea evidente? El ejercicio completo sería en realidad sobrecogedor. Nuestro amigo estaría en una posición parecida a la del físico moderno que intenta averiguar cómo empezó el universo, es decir, cuáles eran las condiciones límite al comienzo de los tiempos.

Las condiciones límite en la ciencia no afectan solo a la historia del universo. Con esos términos nos referimos simplemente al estado de las cosas en un momento concreto, por ejemplo la situación inicial de un experimento en un laboratorio. Sin embargo, a diferencia de la situación que planteábamos con la maqueta del tren o un experimento de laboratorio, cuando se investiga el universo, a menudo, no se pueden establecer condiciones límite. Una de las preguntas favoritas de Hawking es de cuántas maneras podría haber comenzado el universo para acabar siendo tal y como lo observamos hoy, suponiendo que tengamos un conocimiento y una comprensión correctos de las leyes de la física y que estas no hayan cambiado. Él usa «la manera en que observamos el universo hoy» como una condición límite y también, en un sentido más sutil, toma las leyes de la física y la suposición de que estas no han cambiado como condiciones límite. Busca la respuesta a la pregunta de cuáles eran las condiciones límite al comienzo del universo, o las «condiciones iniciales del universo», es decir, la distribución exacta en el momento en que todo se puso en marcha, incluyendo las leyes mínimas que debían estar vigentes en ese momento de manera que, en un determinado momento del futuro, produjeran el universo tal y como lo conocemos hoy. Precisamente considerando esa pregunta, Hawking ha producido algunos de sus más interesantes trabajos en los que ha dado sorprendentes respuestas.

Una descripción unificada de las partículas y las fuerzas, y el conocimiento de las condiciones límite del origen del universo serían unos logros científicos muy importantes, pero no podrían considerarse una teoría del todo. Además, esta debería tener en cuenta valores que son «elementos arbitrarios» en todas las teorías actuales.

LECCIÓN DE LENGUAJE

Entre esos *elementos arbitrarios* se incluyen «constantes de la naturaleza» tales como la masa y la carga del electrón o la velocidad de la luz. Pode-

mos observar qué son estos elementos, pero ninguna teoría los explica ni predice. Pongamos otro ejemplo: los físicos conocen la intensidad de la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil. La teoría electrodébil es una teoría que unifica ambos conceptos, pero no puede decirnos cómo calcular la diferencia de intensidad entre las dos fuerzas. La diferencia de fortaleza es un «elemento arbitrario» que no predice la teoría. Sabemos qué es gracias a la observación y, así, lo ponemos en la teoría «a mano». Este elemento se considera un punto débil de la teoría.

La palabra *predecir*, tal y como la usan los científicos, no significa que pretendan adivinar el futuro. La pregunta «¿Predice esta teoría la velocidad de la luz?» no plantea si la teoría nos dirá cuál será la velocidad el próximo martes, sino si esa teoría nos permite averiguar la velocidad de la luz si esta no pudiera conocerse a partir de la observación. Así, en este caso, ninguna teoría actual predice la velocidad de la luz. Es un elemento arbitrario en todas las teorías.

Una de las preocupaciones de Hawking cuando escribió *Historia del tiempo* era que el lector comprendiera claramente qué es una *teoría*. Una teoría no es la Verdad con V mayúscula, no es una regla, ni un hecho, ni la palabra final. Podríamos establecer un paralelismo con un barco de juguete. Para averiguar si flota, tendríamos que colocar el barco en el agua y probarlo. Cuando se vuelque, lo sacaremos del agua y haremos algunos cambios o comenzaremos de nuevo construyendo un barco diferente, aprovechando lo que hemos aprendido del fracaso.

Algunas teorías son buenos barcos. Flotan mucho tiempo. Sabemos que tienen algunas filtraciones, pero a efectos prácticos resultan útiles. Algunas son de tanta utilidad y están tan sólidamente apoyadas por la experimentación y las pruebas, que empezamos a considerarlas verdades. Los científicos, que tienen muy en cuenta lo complejo y sorprendente que es nuestro universo, se muestran extremadamente cautelosos antes de llamarlas así. Aunque algunas teorías tienen un gran éxito experimental que las respalda y otras son apenas una chispa a ojos de los teóricos (es decir, son barcos diseñados muy bien pero que nunca se han probado en el agua) es un riesgo asumir que *alguna* de ellas sea absoluta y fundamentalmente «la verdad» científica.

Es importante, sin embargo, no dudar siempre, ni seguir poniendo en cuestión las teorías bien establecidas sin tener una buena razón para hacerlo. Para que la ciencia avance es necesario decidir si algunas teorías son dignas de confianza y si se ajustan a la observación suficientemente bien como para usarlas a modo de bloques de construcción y seguir progresando a partir de ahí. Por supuesto, algún nuevo pensamiento o descubrimiento podría sobrevenir y amenazar con hundir el barco. Veremos un ejemplo de ello más adelante en este libro.

En *Historia del tiempo*, Stephen Hawking escribió que una teoría científica es «simplemente un modelo del universo, o de una parte de él, y un conjunto de reglas que relacionan las magnitudes del modelo con observaciones que realizamos. Esto solo existe en nuestras mentes y no tiene ninguna otra realidad (signifique eso lo que signifique)». ² La forma más fácil de entender esta definición es valorar algunos ejemplos.

Hay una grabación audiovisual en la que se ve a Hawking dando una clase a sus estudiantes graduados, probablemente a principios de la década de 1980, con la ayuda de su ayudante. Por aquel entonces, la capacidad de Hawking para hablar se había deteriorado hasta tal punto, que era imposible entenderlo excepto para quienes lo conocían bien. En el vídeo, su ayudante interpreta la indescifrable habla de Hawking diciendo: «Imaginemos ahora que tenemos un modelo de universo aquí», y coloca un cilindro grande de cartón vertical sobre la mesa del seminario. Hawking frunce el ceño y murmura algo que solamente el ayudante puede entender. El ayudante pide disculpas, coge el cilindro y le da la vuelta, colocándolo sobre el otro extremo. Hawking asiente moviendo la cabeza, provocando la risa general.

Un «modelo», por supuesto, no tiene que ser algo como un cilindro de cartón o un dibujo que podemos ver y tocar. Puede ser un dibujo mental o incluso un cuento. Las ecuaciones matemáticas o la creación de mitos pueden ser modelos.

Volviendo al cilindro de cartón, ¿en qué se parece al universo? Para desarrollar una teoría con todas las de la ley a partir de ahí, Hawking tendría que explicar cómo se relaciona el modelo con lo que en realidad vemos a nuestro alrededor, con «observaciones», o con lo que podríamos observar si tuviéramos una tecnología mejor. Sin embargo, solo porque alguien coloque una pieza de cartón sobre la mesa y nos diga cómo está relacionada con el universo real no significa que todo el mundo deba aceptar esa idea como *el* modelo del universo. Debemos considerarla, pero no asumirla sin más. Es una idea que existe «solo en nuestras mentes». El cilindro de cartón puede resultar ser un modelo útil, pero también puede aparecer alguna evidencia que pruebe que no lo es. Habremos averiguado que somos parte de un juego ligeramente diferente del que el modelo sugería. ¿Significaría eso que la teoría era «mala»? No, puede haber sido una teoría muy buena, porque nos ha permitido aprender mucho al considerarla, probarla, y tener que cambiarla o descartarla. El esfuerzo para derribarla puede haber requerido un pensamiento innovador y unos experimentos que conduzcan a un descubrimiento más útil o gratificante.

¿Qué convierte, entonces, una teoría en una buena teoría? Citando de nuevo a Hawking, debe «describir con precisión un amplio conjunto de observaciones sobre la base en un modelo que contenga solo unos pocos parámetros arbitrarios, y debe ser capaz de predecir positivamente los resultados de observaciones futuras». ³

Por ejemplo, la teoría de la gravedad de Isaac Newton describe una amplia clase de observaciones. Predice el comportamiento de objetos arrojados o lanzados a la tierra, así como órbitas planetarias.

Es importante recordar, sin embargo, que una buena teoría no tiene que surgir por completo de la observación. Una buena teoría puede ser una teoría salvaje, un gran salto de la imaginación. «La capacidad de hacer esos saltos intuitivos es realmente lo que caracteriza a un buen físico teórico», dice Hawking.⁴ Sin embargo, una buena teoría no debería estar reñida con las cosas ya observadas, a menos que dé razones convincentes para que así sea. La teoría de las supercuerdas, una de las teorías actuales más emocionantes, predice más de tres dimensiones en el espacio, lo que ciertamente parece contradecir a la observación. Los teóricos explican esta discrepancia sugiriendo que las dimensiones extra están tan apretadas y son tan pequeñas que somos incapaces de reconocerlas.

Ya hemos visto a qué se refiere Hawking con su segundo requisito, según el cual una teoría debe contener solo unos pocos elementos arbitrarios.

El requisito final consiste en que debe sugerir lo que hay que esperar de futuras observaciones. Debe retornar a comprobarlo. Debe decirnos lo que observaremos si la teoría es correcta. Debería también decirnos qué observaciones probarían que *no es* correcta. Por ejemplo, la teoría general de la relatividad de Albert Einstein predice que los rayos de luz de estrellas lejanas se doblan un cierto grado al pasar junto a cuerpos enormes como el Sol. Esta predicción se puede comprobar. Las pruebas han demostrado que Einstein tenía razón.

Algunas teorías, incluida la mayoría de las propuestas por Stephen Hawking, son imposibles de comprobar con nuestra tecnología actual, tal vez incluso con cualquier tecnología concebible futura. Solo se pueden comprobar mediante las matemáticas. Deben de ser matemáticamente consistentes con lo que sabemos y observamos. Pero no podemos observar el universo en sus estadios más primitivos para averiguar de modo directo si «la propuesta sin límites» (que discutiremos más tarde) es correcta. Aunque se proponen algunas pruebas para aceptar o descartar los «agujeros de gusano», Hawking no cree que puedan tener éxito. No obstante, sí nos ha dicho qué cree él que encontraremos si alguna vez conseguimos desarrollar la tecnología necesaria, y está convencido de que sus teorías son consistentes con lo que hemos observado hasta la fecha. En algunos casos se ha arriesgado a hacer algunas predicciones muy específicas acerca de los resultados de experimentos y observaciones que rozan los límites de nuestras capacidades actuales.

Si la naturaleza está perfectamente unificada, las condiciones límite que existían en el origen del universo, las partículas más fundamentales y las fuerzas que las gobiernan, así como las constantes de la naturaleza, están in-

terrelacionadas de una forma única y por completo compatible, que podríamos reconocer como inevitable, absoluta y que se explica a sí misma. Alcanzar ese nivel de comprensión sería en realidad descubrir la teoría del todo, de absolutamente todo; incluso la respuesta, tal vez, a la pregunta de *por qué* el universo se ajusta a su descripción. Es decir, podríamos «conocer la mente de Dios», como dice Hawking en *Historia del tiempo*, o bien «el gran diseño», como lo expresa de forma menos dramática en un libro más reciente del mismo título.

ARROJAR EL GUANTE

Ahora podemos enumerar los retos a los que se enfrentaba cualquier candidata a ser «teoría del todo» cuando Hawking dio su conferencia lucasiana en 1980. Veremos a su debido tiempo cómo algunos de los requisitos de esta lista han cambiado de manera sutil desde entonces.

- Debe darnos un modelo que unifique las fuerzas y partículas.
- Debe responder a la pregunta de cuáles son las «condiciones límite» del universo, las condiciones en el preciso instante en el que empezó, antes de que transcurriese tiempo alguno.
- Tiene que ser «restrictiva» y permitir pocas opciones. Debería, por ejemplo, predecir con precisión cuántos tipos de partículas hay. Si deja opciones, tiene que considerar de algún modo el hecho de que tenemos el universo que tenemos y no uno ligeramente diferente.
- Debería contener pocos elementos arbitrarios. Sería mejor que no tuviéramos que echar una miradita muy a menudo al universo propiamente dicho en busca de respuestas. De modo paradójico, la teoría del todo en sí misma puede ser un elemento arbitrario. Pocos científicos esperan que pueda explicar por qué debería existir una teoría o cualquier otra cosa para describirlo. No es probable que responda a la pregunta de Stephen Hawking de «por qué el universo (o, ya puestos, la teoría del todo) se va a tomar la molestia de existir?».⁵
- Debe predecir un universo como el que observamos o si no explicar convincentemente por qué hay discrepancias. Si predice que la velocidad de la luz es de seis kilómetros por hora, o no permite la existencia de pingüinos o pulsares, tenemos un problema. Una teoría del todo debe encontrar la manera de sobrevivir a la comparación con lo que observamos.
- Debería ser sencilla, aunque tiene que permitir una complejidad enorme. El físico John Archibald Wheeler de Princeton escribió:

Detrás de todo
existe seguramente un idea tan sencilla,
tan bella,
tan irresistible que cuando,
en una década, un siglo,
o un milenio,
la comprendamos,
nos diremos unos a otros,
¿cómo podría ser de otro modo?
¿Cómo pudimos ser tan idiotas
durante tanto tiempo?⁶

- Las teorías más profundas, como la teoría de la gravedad de Newton y la teoría de la relatividad de Einstein, son sencillas tal y como dice Wheeler.
- Tiene que conseguir combinar la teoría de Einstein de la relatividad general (una teoría que explica la gravedad) con la mecánica cuántica (la teoría que se usa con éxito cuando se habla sobre las otras tres fuerzas). Este es un reto que Stephen Hawking ha aceptado. Aquí solo presentamos el problema. Lo entenderemos mejor después de tratar el problema de la incertidumbre de la mecánica cuántica en este capítulo y la relatividad general más tarde.

LA TEORÍA CHOCA CON LA TEORÍA

La teoría de la relatividad general de Einstein es una teoría de los objetos grandes y muy grandes como, por ejemplo, las estrellas, los planetas y las galaxias. Explica de manera excelente cómo funciona la gravedad a ese nivel.

La mecánica cuántica es la teoría de lo muy pequeño. Describe las fuerzas de la naturaleza como mensajes entre fermiones (partículas de materia). La mecánica cuántica también contiene algo extremadamente frustrante, el principio de incertidumbre: no podremos nunca conocer con seguridad y al mismo tiempo la *posición* de una partícula y su *momento* (cómo se mueve). A pesar de este problema la mecánica cuántica explica de manera excelente las cosas que son muy pequeñas.

Una forma de combinar estas dos grandes teorías del siglo xx en una teoría unificada sería explicar la gravedad, con más éxito de lo que ha sido posible hasta ahora, como un intercambio de partículas mensajeras, igual que hacemos en el caso de las otras tres fuerzas. Otro camino es volver a considerar la relatividad general a la luz del principio de incertidumbre.

Explicar la gravedad como un intercambio de partículas mensajeras presenta problemas. Si concebimos la fuerza que nos sujeta al suelo como un intercambio de gravitones (las partículas mensajeras de la gravedad) entre las partículas de materia de nuestro cuerpo y las partículas de materia que constituyen la Tierra, describiremos la fuerza gravitatoria de una manera mecánico-cuántica. Pero dado que todos estos gravitones están también intercambiando gravitones entre ellos mismos, nos topamos con un problema que matemáticamente es muy complicado, porque nos da como resultado infinitos, es decir, sinsentidos matemáticos.

Las teorías físicas no pueden manejar infinitos. Cuando han aparecido en otras teorías, los físicos han recurrido a algo conocido como «renormalización». Richard Feynman usó la renormalización cuando desarrolló una teoría para explicar la fuerza electromagnética, pero no quedó en absoluto satisfecho con ella. «No importa lo inteligente que suene la palabra —escribió—, ¡yo lo llamaría un proceso chiflado!»⁷ Consiste en incluir otros infinitos y permitir que los infinitos se anulen entre sí. Suena extraño, pero en muchos casos parece funcionar en la práctica. Las teorías resultantes conciertan muy bien con la observación.

La renormalización funciona en el caso del electromagnetismo, pero falla en el caso de la gravedad. Los infinitos en la fuerza gravitatoria son peores que los de la fuerza electromagnética. Se niegan a desaparecer. La supergravedad, la teoría sobre la que Hawking habló en su conferencia lucasiana, y la teoría de las supercuerdas, según la cual los objetos básicos del universo no son partículas en forma de punto sino pequeñas cuerdas o lazos de cuerda, comienzan a despuntar prometedoramente en el siglo xx; y más adelante en este libro veremos desarrollos recientes incluso más prometedores. No obstante, el problema no está solucionado por completo.

Por otro lado, ¿qué pasa si permitimos a la mecánica cuántica invadir el estudio de los objetos muy grandes, el terreno donde la gravedad parece reinar por encima de todo? ¿Qué sucede si reconsideramos lo que la relatividad general nos explica sobre la gravedad aplicando lo que sabemos sobre el principio de incertidumbre, que establece la imposibilidad de medir con precisión la posición y el momento de una partícula al mismo tiempo? Comprobaremos que el trabajo de Hawking en estos ámbitos ha tenido unos resultados extraños: los agujeros no son negros, y las condiciones límite puede que no tengan límites.

Ya que estamos haciendo una lista de paradojas, aquí hay otra: el espacio vacío no está vacío. Más adelante veremos cómo se llega a esta conclusión. Por ahora, debemos contentarnos con saber que el principio de incertidumbre significa que el llamado espacio vacío está repleto de partículas y antipartículas. (La materia-antimateria que utiliza la ciencia ficción es un ejemplo familiar.)

La relatividad general establece que la presencia de la materia o la energía hace que el espaciotiempo se curve o se combe. Hemos mencionado ya un resultado de esa curvatura: la desviación de los rayos de luz emitidos por estrellas lejanas al pasar junto a cuerpos enormes como el Sol.

Tengamos en mente estos dos puntos: (1) El espacio «vacío» está lleno de partículas y antipartículas, lo que se suma a una enorme cantidad de energía. (2) La presencia de esta energía produce la curvatura del espaciotiempo.

Si estos dos puntos son ciertos, el universo entero debería retorcerse hasta hacerse una pequeña bola, sin embargo, eso no ha sucedido. Cuando la relatividad general y la mecánica cuántica se formulan a la vez, lo que predicen parece estar totalmente equivocado. Ambas teorías son excepcionales buenas y pueden calificarse como dos de los logros intelectuales más sobresalientes del siglo xx. Nos sirven magníficamente no solo para propósitos teóricos, sino también de muchas maneras prácticas. No obstante, unidas producen infinitos y sinsentidos. Y precisamente la teoría del todo debe resolver esos sinsentidos de alguna manera.

PREDECIR LOS DETALLES

Una vez más, imaginemos que somos un alienígena que nunca ha visto nuestro universo. Con la teoría del todo, deberíamos ser capaces de predecirlo todo sobre él... ¿o no? Tal vez podríamos predecir soles y planetas y galaxias y agujeros negros y cuásares, pero ¿podría predecirse el ganador del Derby del año que viene? ¿Qué nivel de precisión puede alcanzar? Uno no demasiado grande.

Los cálculos necesarios para estudiar todos los datos del universo están por completo fuera del alcance de cualquier ordenador imaginable. Hawking señala que, aunque podamos resolver las ecuaciones que describan el movimiento de dos cuerpos en la teoría de la gravedad de Newton, no podemos resolverlas con exactitud si se introduce un *tercer* cuerpo; no porque la teoría de Newton no funcione con tres cuerpos, sino porque las matemáticas son demasiado complicadas. Y no hace falta decir que el universo real engloba a más de tres cuerpos.

Tampoco podemos predecir nuestra salud, aunque comprendemos muy bien los principios que subyacen a la medicina, los principios de la química y de la biología. El problema, otra vez, es que hay demasiados miles de miles de millones de detalles en el sistema de vida real, incluso si ese sistema es un único cuerpo humano.

Curiosamente, aunque contáramos con la teoría del todo seguiríamos muy lejos de predecirlo todo. Aun cuando los principios subyacentes son sencillos y fáciles de comprender, la manera en la que deben calcularse es en

extremo complicada. «Un minuto para aprender, toda una vida del universo para dominarlo», diríamos parafraseando un anuncio publicitario. La expresión «toda una vida del universo para dominarlo» es un craso eufemismo.*

¿En qué lugar nos deja todo esto? Con la teoría del todo se puede predecir qué caballo ganará el Gran National el año que viene, pero ningún ordenador puede contener todos los datos y realizar las matemáticas necesarias para hacer la predicción. ¿Es así?

Hay un problema más. Debemos volver de nuevo la atención al principio de incertidumbre de la mecánica cuántica.

LA CONFUSIÓN DE LO MUY PEQUEÑO

En el nivel de lo muy pequeño, el nivel cuántico del universo, el principio de incertidumbre limita también nuestra capacidad de predecir.

Pensemos en todos esos raros y atareados habitantes del mundo cuántico. Los fermiones y los bosones conforman un impresionante zoológico de partículas. Entre los fermiones se pueden distinguir electrones, protones y neutrones. Cada protón o neutrón está, a su vez, constituido por tres quarks, que son también fermiones. Luego tenemos los bosones, que se dividen en fotones (mensajeros de la fuerza electromagnética), gravitones (la fuerza gravitatoria), gluones (la fuerza fuerte), y Ws y Zs (la fuerza débil). Sería útil saber dónde se encuentran estos elementos y otros muchos, adónde van y con qué rapidez llegan allí. ¿Es posible averiguarlo?

El diagrama de un átomo de la Figura 2.1 es el modelo propuesto por Ernest Rutherford en los Laboratorios Cavendish de Cambridge a principios del siglo xx, y en él se ven electrones orbitando alrededor del núcleo del átomo como los planetas orbitan alrededor del Sol.

Ahora sabemos que en el nivel cuántico, las cosas no tienen este aspecto. Las órbitas de los electrones no pueden trazarse como si los electrones fueran planetas. Haríamos mejor en dibujarlas aglomerándose en una nube alrededor del núcleo. Pero ¿a qué se debe esa representación borrosa?

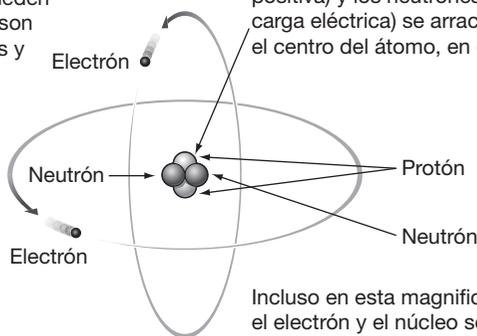
El principio de incertidumbre hace de la vida en el nivel cuántico un asunto difuso e impreciso, no solo en el caso de los electrones, sino en el de todas las partículas. Al margen de cómo intentemos observar lo que sucede, es imposible averiguar con precisión el *momento* y la *posición* de una partícula al mismo tiempo. Si medimos con mayor precisión cómo se mueve la partícula, conoceremos con menor precisión su posición, y viceversa. Funciona como un balancín: cuando la precisión de una medida sube, la preci-

* El anuncio publicitario del juego de Othello es «Un minuto para aprender, una vida entera para controlar».

Los electrones (con carga eléctrica negativa) no pueden estar en el núcleo, pero son atraídos por los protones y suelen estar cerca.

Los protones (con carga eléctrica positiva) y los neutrones (sin carga eléctrica) se arraciman en el centro del átomo, en el núcleo.

Fíjese cuánto espacio vacío hay en el átomo.



Incluso en esta magnificación, el electrón y el núcleo son tan pequeños que no se pueden ver en absoluto.

FIGURA 2.1. En el modelo de un átomo de helio de Rutherford, los electrones orbitan alrededor del núcleo del mismo modo en que los planetas orbitan alrededor del Sol. Ahora sabemos que, a causa de la incertidumbre del principio de la mecánica cuántica, las órbitas de los electrones no son realmente caminos bien definidos como se muestra en este modelo.

sión de la otra baja. Al hacer más precisa una medida, la otra se vuelve más imprecisa.

La mejor manera de describir la actividad de una partícula es estudiar todas las posibles maneras en que podría moverse y luego calcular qué probabilidad tiene un camino de imponerse al otro. Al final, se reduce a una cuestión de probabilidades. Una partícula tiene una determinada probabilidad de moverse *de esa* manera o esta tiene *cierta* probabilidad de estar *aquí*. Esas probabilidades son, sin embargo, una información muy útil.

Es como predecir el resultado de unas elecciones. Los expertos en resultados electorales trabajan con probabilidades. Cuando manejan información sobre el suficiente número de votantes logran unas estadísticas que les permiten predecir quién ganará las elecciones y por qué margen sin tener que saber en qué sentido votará cada individuo. Cuando los físicos cuánticos estudian un gran número de posibles caminos que las partículas pueden seguir, las probabilidades de que sus movimientos sean de un modo o de otro, o de que estén en un lugar más que en otro, se convierten en información concreta.

Los encuestadores admiten que entrevistar a un individuo puede influir en su voto al provocar que un votante tome mayor conciencia de algún asunto. Los físicos tienen un dilema similar. Investigar a nivel cuántico influye en las respuestas que se obtienen.

Hasta aquí la comparación entre predecir elecciones y estudiar el nivel cuántico parece buena, pero ahora se desbarata: el día de las elecciones, cada votante emite un voto definitivo en un sentido u otro, tal vez secreto pero no variable. Si los encuestadores colocaran cámaras ocultas en las cabinas de votos (y no fueran arrestados) podrían averiguar el sentido del voto de cada individuo. En la física cuántica, no ocurre así. Los físicos han concebido ingeniosas maneras de husmear en las partículas, pero todas en vano. El mundo de las partículas elementales no solo *parece* incierto porque no hayamos sido lo suficientemente inteligentes para encontrar una manera eficaz de observarlo, sino que es *realmente* incierto. No es de extrañar que Hawking, en su conferencia lucasiana, llamara a la mecánica cuántica «una teoría de lo que no sabemos y no podemos predecir». ⁸

Teniendo en cuenta esta limitación, los físicos han redefinido el objetivo de la ciencia: la teoría del todo será un conjunto de reglas que hagan posible predecir acontecimientos *hasta el límite fijado por el principio de incertidumbre*, y eso significa en muchos casos que tendremos que conformarnos con probabilidades estadísticas, no específicas.

Hawking resume nuestro problema. En respuesta a la pregunta de si todo está predeterminado ya sea por la teoría del todo o por Dios, él dice que sí, que piensa que lo está. «Pero también podría no estarlo, porque nunca podremos saber lo que está determinado. Si la teoría ha determinado que moriremos ahorcados, no nos ahogaremos. Pero tendríamos que estar completamente seguros de que estamos destinados a la horca para echarnos al mar en un pequeño bote durante una tormenta.» ⁹ Hawking entiende la idea del libre albedrío como «una teoría del comportamiento humano muy bien aproximada». ¹⁰

¿HAY REALMENTE UNA TEORÍA DEL TODO?

No todos los físicos creen que haya una teoría del todo, o, si la hay, no creen que alguien pueda encontrarla. La ciencia puede seguir refinando lo que sabemos realizando un descubrimiento tras otro, abriendo cajas dentro de otras cajas, pero nunca llegará a la última caja. Hay quienes argumentan que los acontecimientos no son totalmente predecibles sino que suceden de una manera arbitraria. Algunos creen que Dios y los seres humanos tienen mucha más libertad de dar-y-recibir dentro de esta creación de lo que una teoría del todo determinista permitiría. Creen que, como en la interpretación de una gran obra de música orquestal, aunque las notas estén escritas, aún puede haber una enorme creatividad en la ejecución de las notas, que no estaba en absoluto predeterminada.

Hay entre nosotros personas que quieren intentar averiguar si una teoría completa para explicar el universo está a nuestro alcance o lo estará alguna

vez. Los humanos son seres intrépidos con una curiosidad insaciable. Algunos, como Stephen Hawking, son especialmente difíciles de desmoralizar. Un portavoz de aquellos que están comprometidos con esta ciencia, Murray Gell-Mann, describió esta búsqueda:

La búsqueda por comprender el universo, cómo funciona y de dónde viene es la mayor y prolongada aventura de la historia de la humanidad. Es difícil imaginar que un puñado de residentes en un pequeño planeta que gira alrededor de una estrella insignificante en una pequeña galaxia tenga como principal objetivo la comprensión completa del universo entero, somos una pequeña manchita de creación que cree que realmente es capaz de comprenderlo todo.¹¹