



LEE SMOLIN

LA REVOLUCIÓN  
INACABADA DE EINSTEIN

Más allá de la física cuántica

Ilustraciones de  
KAĆA BRADONJIĆ

Traducción de  
MARC FIGUERAS



PASADO & PRESENTE  
BARCELONA



## PREFACIO

Los humanos siempre hemos tenido un problema con los límites que separan la realidad de la fantasía. Para explicar el mundo que nos rodea, inventamos historias y luego, como somos unos buenos narradores, nos encaprichamos de ellas y acabamos confundiendo nuestras representaciones del mundo con el mundo en sí mismo. Esta confusión no aqueja solo a los legos, sino también a los científicos; de hecho, nos afecta más, pues disponemos de un arsenal de historias en verdad impactantes.

A medida que profundizamos en nuestra comprensión del mundo natural, progresando hacia fenómenos cada vez más pequeños y más elementales, nuestros propios éxitos imponen barreras a los avances subsiguientes; para no encallarnos, debemos equilibrar nuestra bien merecida confianza en las capacidades del conocimiento ya establecido con una profunda conciencia de cuán tambaleantes son nuestras hipótesis, incluso las más exitosas. Una dolorosa lección que hay que aprender es que, si bien nuestras sensaciones son causadas, en parte, por la realidad, cobran forma definitiva gracias a la acción de nuestro cerebro, que nos presenta el mundo de la forma necesaria para que podamos medrar en medio de la naturaleza. Más allá de esas sensaciones, la naturaleza está ahí afuera, merodeando a nuestro alrededor, misteriosa y siempre situándose en el límite de lo que podemos aprehender.

Los rasgos más importantes de la naturaleza, tal como la entendemos hoy en día, no son características que podamos percibir directamente. Los hechos generales más básicos que sabemos del mundo (por ejemplo, que la materia está formada por átomos, o que la Tierra es un cascarón esférico de roca que rodea un núcleo fundido, cubierto por una fina atmósfera y que se mueve por un vacío casi absoluto girando en torno a un reactor termonuclear natural) los aprendemos apenas salimos del jardín de infancia, pero son el resultado de siglos de enormes esfuerzos por parte de científicos y eruditos. Cada uno de estos hechos surgió como una

idea más o menos alocada en conflicto con hipótesis mucho más evidentes y razonables (aunque, en última instancia, erróneas).

Tener una mentalidad científica implica respetar los hechos sobre los que hay un claro consenso y que son resultado de generaciones de discusiones y debates, a la vez que se mantiene la mente abierta hacia todo aquello que aún no conocemos. En este cometido, siempre es de ayuda un cierto sentido de humildad ante los misterios esenciales del mundo, pues aquellos aspectos que conocemos se vuelven aún más misteriosos cuando los examinamos en más detalle; cuanto más sabemos, más fascinante se vuelve todo. No encontraremos nada en la naturaleza tan insulso que su simple contemplación no nos lleve a una avasalladora sensación de maravilla y de gratitud por el simple hecho de formar parte de todo esto.

En esta mañana de primavera, el aire que entra por la ventana me acerca aromas frescos procedentes del jardín, pero ¿qué milagro hace esto posible? ¿Cómo una nariz transforma las moléculas transportadas por la brisa en ese agradable olor? Vemos colores vivos y recordamos esa historia sobre diferentes longitudes de onda de la luz que excitan neuronas diferentes, pero ¿cómo es posible que la excitación de diferentes neuronas cause las sensaciones de rojo o de azul? ¿Qué tipo de cosa son las sensaciones (los *qualia*, como las denominan algunos filósofos) de los diferentes colores o de los diferentes aromas? ¿En qué medida son los aromas diferentes de los colores? y ¿por qué son diferentes, si al fin y al cabo todo son impulsos eléctricos en nuestras neuronas? ¿Quién es el yo que se despierta por la mañana? ¿Qué es el universo que me rodea cuando abro los ojos? Los hechos más evidentes de nuestra existencia y de nuestra relación con el mundo son auténticos misterios.

Como científico, creo que el mejor modo de llegar a alguna parte es pasar de puntillas por la difícil cuestión de la conciencia y dedicarnos a abordar preguntas más sencillas. Empecemos, pues, con una cuestión muy básica: ¿qué es la materia? Mi hijo ha dejado una piedra en la mesa; la cojo y mi mano la agarra con comodidad, sintiendo su peso y su forma... una sensación harto ancestral, sin duda.

*Pero ¿qué es una piedra?*

Sabemos el aspecto que tiene una piedra, sabemos las impresiones que produce. Pero se trata de sensaciones que casi nos dicen más sobre nosotros mismos que sobre la piedra. Hay muy pocas cosas en el aspecto o el tacto de una piedra que nos den pistas sobre lo que constituye, en esencia, la existencia de una piedra, sobre la *petricidad* de

una piedra, si se me permite decirlo así. La consistencia y la dureza de la piedra son elaboraciones de nuestra mente, que integra percepciones a escalas muy gruesas en comparación con el tamaño de los átomos.

La materia se presenta en muchas formas, algunas de las cuales sabemos que tienen que ser complejas, como sería el caso de la piedra o del material orgánico que, tejido, forma las mantas, las sábanas y la ropa que llevamos. Así, mejor consideremos, para empezar, una forma más simple de materia: el agua de un vaso. ¿Qué es eso? Para nuestra vista y nuestro tacto, el agua parece fluida y continua y, de hecho, hasta hace bien poco, apenas algo más de un siglo, los físicos creían que el agua era una sustancia totalmente continua. A principios del siglo xx, Albert Einstein demostró que esa idea era errónea y que el agua estaba formada por incontables átomos. En el agua, estos átomos se agrupan de tres en tres, formando moléculas cada una de las cuales contiene un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno.

Muy bien, pero ¿qué es un átomo? Poco menos de una década después del avance de Einstein se comprendió que cada átomo es como un sistema solar en miniatura, con un núcleo en su centro a modo de Sol y los electrones a su alrededor en el papel de planetas. De acuerdo, pero ahora, ¿qué es un electrón? Sabemos que los electrones siempre se presentan en unidades discretas, cada una de las cuales contiene una cierta cantidad de masa y de carga eléctrica. Un electrón puede localizarse en el espacio y puede moverse: cuando lo observamos ahora, está aquí, cuando lo observamos luego, está allí. Sin embargo, dejando de lado estas características, no resulta fácil presentar una imagen de lo que es un electrón; de hecho, buena parte de este libro se ocupará de ello.

La mejor comprensión que tenemos de lo que es una piedra, de lo que es el agua, de lo que son las moléculas y los electrones, nos la ofrece la rama de la ciencia que denominamos *física cuántica*. Ahora bien, como casi todo el mundo parece saber actualmente, la física cuántica es un campo lleno de misterios y paradojas. La física cuántica describe un mundo en el que nada tiene una existencia estable: un átomo o un electrón puede ser una onda o puede ser una partícula, según cómo lo observemos; los gatos están a la vez vivos y muertos. Todo esto resulta muy atractivo para la divulgación, que ha convertido el adjetivo *cuántico* en una palabra de moda para designar todo embaucamiento que pueda resultar *guay* a la vez que *friqui*; en cambio, es espantoso para los que queremos comprender el mundo en el que vivimos, pues no parece haber una respuesta sencilla a la pregunta «¿Qué es una piedra?».

En el primer cuarto del siglo XX, para explicar la física cuántica, se elaboró la teoría que llamamos *mecánica cuántica*. Desde sus inicios, esta teoría ha sido el niño mimado de la ciencia. Es la base de nuestra comprensión de los átomos, la radiación y muchas otras cosas, desde las partículas elementales y las fuerzas fundamentales hasta el comportamiento de los materiales. Durante todo este tiempo también ha resultado ser un niño revoltoso. Desde los primeros años, sus creadores han estado divididos acerca de lo que teníamos que hacer con ella: algunos expresaron perplejidad y recelos, e incluso indignación; otros la consideraron una ciencia revolucionaria que hacía añicos las suposiciones metafísicas sobre la naturaleza y nuestra relación con ella, que las generaciones anteriores habían considerado fundamentales para el éxito de la ciencia.

En los capítulos que vienen, espero convenceros de que los problemas conceptuales y las furiosas discrepancias que han aquejado a la mecánica cuántica desde su creación aún están sin resolver y son irresolubles, por la simple razón de que la teoría es errónea. Tiene un éxito impresionante, pero está incompleta. Nuestra tarea (si lo que queremos es disponer de respuestas simples a preguntas sencillas sobre lo que son las piedras) es ir más allá de la mecánica cuántica para llegar a una descripción del mundo a escala atómica que tenga sentido.

Se trata de una tarea que puede parecer abrumadora, si no fuera por un aspecto casi olvidado de la historia de la mecánica cuántica y a menudo ignorado. Ya en los mismos inicios de la teoría, en la década de 1920, apareció una versión alternativa de la física cuántica que resulta lógica; esta teoría «oculta» resuelve las aparentes paradojas y misterios del mundo cuántico. Creo que es un escándalo (un término bien adecuado, a mi parecer) que esta formulación alternativa de la teoría cuántica apenas se enseñe y bien pocas veces aparezca en los libros de texto para los físicos en ciernes y en los libros de divulgación para el público general.

Hay varias formulaciones alternativas de la mecánica cuántica que tienen sentido y son coherentes. El reto es partir de estas para descubrir la manera correcta de comprender la física cuántica (es decir, la que usa la naturaleza). En mi opinión, el resultado tendrá una amplia repercusión, porque la nueva formulación de la física cuántica permitirá solucionar muchos de los numerosos problemas más destacados de la física. Opino que problemas como la gravedad cuántica o la unificación de las fuerzas fundamentales, en los cuales hemos avanzado bien poco, siguen

siendo huesos duros de roer porque en la base de nuestras hipótesis tenemos una teoría incorrecta.

Los físicos están de acuerdo en el comportamiento del mundo cuántico. Los átomos y la radiación se comportan de modo diferente que las piedras y los gatos, y estamos de acuerdo en que la mecánica cuántica tiene éxito en predecir algunos aspectos de ese comportamiento; en lo que no nos ponemos de acuerdo es en lo que significa que nuestro mundo *sea* cuántico. Está claro que se necesita algún cambio radical en nuestra comprensión de la naturaleza, pero no tenemos claro qué tipo de cambio tiene que ser este. Algunos plantean que debemos abandonar cualquier intento de describir la realidad y conformarnos con una teoría que explique solamente el conocimiento que podemos tener del mundo; otros afirman que nuestra noción de la realidad debe ampliarse para abrazar una infinitud de realidades paralelas.

En verdad, no es necesario nada de todo esto. Las formas alternativas de comprender el mundo cuántico no nos obligan a abandonar la idea de que la física describe una realidad independiente del conocimiento que podamos tener de ella. Tampoco exigen que amplíemos la realidad más allá de la idea de sentido común de que hay un solo mundo y de que este mundo es lo que vemos a nuestro alrededor. Tal como explicaré, el realismo del sentido común, según el cual la ciencia puede aspirar a ofrecer una imagen completa del mundo natural tal como es (o tal como sería en nuestra ausencia), no está amenazado por nada que sepamos sobre la física cuántica.

En definitiva, pues, es desafortunado e innecesario presentar el ámbito cuántico como algo misterioso y contrario al sentido común. Uno de los objetivos de este libro es mostrar al público general las teorías cuánticas alternativas y, en el proceso, eliminar todo halo de misterio y exhibir el mundo cuántico de una forma que sea accesible e intuitiva para todos aquellos que no son especialistas en física.

Imagino a mi lector como alguien con una intensa curiosidad por la naturaleza, que se interesa por la ciencia a través de las noticias, blogs y libros de divulgación, pero cuya formación no ha incluido las matemáticas que se suelen usar como lenguaje de la física. Por esta razón, emplearé palabras e imágenes para expresar los fenómenos básicos que hallamos en el mundo cuántico y los principios que su estudio ha inspirado. Tras una introducción, el libro empieza con tres breves capítulos que describen los aspectos más básicos de la física cuántica, lo que nos aportará el equipo necesario para explorar los diversos uni-

versos conceptuales que han surgido de las distintas formulaciones que se han propuesto de la teoría cuántica.

¿Qué es lo que está en juego en la discusión sobre la mecánica cuántica? ¿Por qué es tan relevante si nuestra teoría fundamental del mundo es misteriosa o paradójica? Tras esta discusión centenaria sobre la mecánica cuántica hay un desacuerdo esencial acerca de la naturaleza de la realidad, un desacuerdo que, si se deja sin resolver, se intensifica hasta convertirse en una discusión sobre la naturaleza de la ciencia.

En este cisma hay dos cuestiones básicas. En primer lugar, ¿existe el mundo natural independientemente de nuestras mentes? O, dicho con más precisión, ¿tiene la materia un conjunto de propiedades por sí misma, independientes de nuestras percepciones y de nuestro conocimiento? En segundo lugar, ¿podemos aprehender y describir esas propiedades? ¿Podemos comprender lo suficiente de las leyes de la naturaleza como para explicar la historia del universo y predecir su futuro? Las respuestas que demos a estas dos cuestiones tienen implicaciones para problemas más generales sobre la naturaleza y los objetivos de la ciencia, así como para el papel de la ciencia en la sociedad humana. Se trata de cuestiones sobre los límites que trazamos entre la realidad y la fantasía.

Las personas que responden sí a estas dos preguntas son lo que llamamos *realistas*. Einstein era un realista; yo también lo soy. Los realistas creemos que hay un mundo real ahí afuera, cuyas propiedades no dependen en absoluto del conocimiento o de la percepción que tengamos de él. Es la naturaleza tal como sería (y en general tal como es) si nosotros no estuviésemos ahí. También creemos que podemos entender y describir el mundo con la precisión suficiente como para explicar cómo se comporta cualquier sistema de la naturaleza; si eres un realista, crees que la ciencia es la búsqueda sistemática de esa explicación. Esta postura se basa en una concepción «ingenua» de la verdad; las afirmaciones sobre objetos o sistemas de la naturaleza son verdaderas en tanto en cuanto corresponden a propiedades genuinas de esta.

Si respondes negativamente a ambas preguntas, eres un antirrealista.

La mayoría de los científicos son realistas en lo que concierne a los objetos cotidianos a una escala humana. Las cosas que podemos ver, agarrar y lanzar tienen propiedades simples y fácilmente comprensibles. En cada momento, existen en algún lugar del espacio; cuando se mueven, siguen una trayectoria, y esta trayectoria tiene una velocidad

determinada respecto a alguien que la esté describiendo. Tienen masa y peso. Cuando decimos a un amigo que la libreta roja que está buscando está sobre la mesa, esperamos que tal afirmación sea verdadera o falsa, sin más, independiente por completo de nuestro conocimiento o nuestras percepciones. La descripción de la materia a este nivel, desde las escalas más pequeñas que podemos percibir con nuestros ojos hasta la escala de los planetas y las estrellas es lo que se denomina *física clásica*. Es la obra de Galileo, Kepler y Newton, y las teorías de la relatividad de Einstein son su logro supremo.

Sin embargo, no nos resulta nada fácil ser realistas cuando se trata de la materia a la escala de los átomos individuales. Y la culpa la tiene la mecánica cuántica, la que es, a día de hoy, nuestra mejor teoría de la naturaleza a nivel atómico. Tal como he comentado, esta teoría tiene algunos aspectos sin duda desconcertantes, y es creencia general que estos aspectos descartan el realismo. Dicho de otro modo, la mecánica cuántica exige que respondamos *no* a una o a las dos cuestiones que he planteado antes. En el grado en que la mecánica cuántica sea la descripción correcta de la naturaleza, nos vemos obligados a dejar de lado el realismo.

La mayoría de los físicos no acepta el realismo cuando se trata de átomos, radiación y partículas elementales. Su postura, en general, no procede de ningún deseo de rechazar el realismo a partir de ideas filosóficas radicales, sino de su convicción de que la mecánica cuántica es correcta y de que, tal como se les ha inculcado, la mecánica cuántica obliga a descartar el realismo. Ahora bien, si es cierto que la mecánica cuántica obliga a abandonar el realismo, entonces, si en verdad eres un realista, debes asumir que la mecánica cuántica es falsa; quizá tenga éxito provisionalmente, pero no puede ser la descripción correcta a escala atómica. Es esto lo que llevó a Einstein a rechazar la mecánica cuántica y a considerarla poco más que un recurso temporal.

Einstein y otros realistas creen que la mecánica cuántica nos ofrece una descripción incompleta de la naturaleza y que le faltan unos cuantos aspectos necesarios para una plena comprensión del mundo. Einstein a veces imaginó que había unas «variables ocultas» que completarían la descripción de la naturaleza que ofrece la teoría cuántica y creía que esa descripción completa que incluía las variables ocultas sería coherente con el realismo.

Así pues, si eres físico y eres un realista, tienes una obligación imperiosa: superar la mecánica cuántica y descubrir cuáles son esos as-



pectos que le faltan, para así elaborar una teoría correcta de los átomos. Esta fue la misión inacabada de Einstein, y es también la mía.

Hay varios tipos de antirrealistas, que se adhieren a puntos de vista diferentes sobre la mecánica cuántica. Algunos antirrealistas consideran que las propiedades que asignamos a los átomos y a las partículas elementales no son inherentes a tales objetos, sino que se crean mediante nuestras interacciones con ellos y solo existen en el momento en que las medimos. Niels Bohr fue el representante más influyente de esta postura, que podemos denominar *antirrealismo radical*. Bohr fue el primero en aplicar la teoría cuántica al átomo, tras lo cual se convirtió en el líder y mentor de la siguiente generación de revolucionarios físicos cuánticos. Su antirrealismo radical tiñó de una tonalidad muy definida la manera en que se empezó a entender la teoría cuántica.

Otro grupo de antirrealistas cree que la ciencia, como un todo, no se ocupa de lo que es real en la naturaleza ni lo describe, sino que solo habla de nuestro conocimiento del mundo. Según su punto de vista, las propiedades que la física asigna a un átomo no hacen referencia al átomo, sino solo al conocimiento que tenemos de ese átomo. A estos científicos los podemos bautizar como *epistemólogos cuánticos*.

Para acabar, tenemos a los *operacionalistas*, un grupo de antirrealistas que se declaran agnósticos acerca de si existe alguna realidad fundamental independiente de nosotros. Sostienen que, al fin y al cabo, la mecánica cuántica no se ocupa de la realidad, sino que es un conjunto de procedimientos para interrogar a los átomos; no se ocupa de los átomos en sí mismos, sino de lo que sucede cuando los átomos entran en contacto con los sofisticados aparatos que empleamos para medirlos. Heisenberg, el mejor pupilo de Bohr y creador de las ecuaciones de la mecánica cuántica, era un operacionalista, al menos en parte.

En contraste con las disputas entre los antirrealistas radicales, los epistemólogos cuánticos y los operacionalistas, todos los realistas comparten un punto de vista similar, a saber: que estamos de acuerdo en la respuesta afirmativa a las dos preguntas que he planteado antes. Sin embargo, sí que discrepamos en la respuesta a una tercera cuestión: ¿está formado el mundo natural por las clases de objetos que observamos cuando miramos a nuestro alrededor y por los elementos que los constituyen? En otras palabras, lo que vemos cuando observamos a nuestro alrededor ¿es representativo del universo en general?

Los que respondemos sí a esta pregunta nos podemos denominar *realistas simples*, o *realistas ingenuos*. Aquí uso el adjetivo ingenuo en el sentido más básico de falta de dobleces, directo y sencillo; para mí, un punto de vista es ingenuo si no necesita argumentos sofisticados o justificaciones elaboradas. Mi postura es que, cuando sea posible, siempre es preferible un realismo ingenuo. Hay realistas que no son ingenuos en este sentido y creen que la realidad es en verdad muy diferente del mundo que percibimos y medimos. Un ejemplo de esta postura es la interpretación de los universos paralelos de la mecánica cuántica, que asume que el mundo que percibimos no es más que uno de entre una vastísima cantidad, siempre creciente, de mundos paralelos. Sus proponentes se autodenominan *realistas*, y tienen cierto derecho a tal designación, pues dan una respuesta afirmativa a las dos primeras preguntas planteadas; sin embargo, en mi opinión solo son realistas en el más académico y técnico de los sentidos. Tal vez pudieran denominarse *realistas mágicos*, porque consideran que lo real se sitúa mucho más allá del mundo que percibimos. El realismo mágico, en este sentido, es casi una forma de misticismo, pues asume que el mundo verdadero está oculto a nuestra percepción.

¿Es posible formular una teoría de los átomos que sea realista en el sentido más general e *ingenuo* y, por tanto, que responda con un *sí* a las tres cuestiones que he planteado? La respuesta es que sí, es posible, y es precisamente la historia que quiero explicar en este libro. Pero la teoría que lo permite no es la mecánica cuántica y, si es correcta, implicaría que la mecánica cuántica es falsa en el sentido de que ofrece una descripción muy incompleta de la naturaleza.

Parte de la historia que quiero relatar hace referencia a cómo se apartó de las corrientes dominantes a esta teoría ingenuamente realista de la naturaleza, mientras prosperaba una teoría que nos obligaba a adoptar posturas antirrealistas o místicas. De todos modos, finalizaré con un rayo de esperanza, bosquejando una manera en que podemos avanzar hacia un punto de vista realista de la naturaleza que también englobe los aspectos cuánticos.

Todo esto no es baladí, porque ahora, a inicios del siglo XXI, la ciencia se ve atacada desde muchos frentes, y con estos ataques también se ve amenazada la convicción de que existe un mundo real en el que los hechos o bien son ciertos o bien son falsos. Parece que varios sectores de

nuestra sociedad están perdiendo el contacto con la frontera que separa la realidad de la fantasía.

La ciencia recibe ataques de todos aquellos que consideran que sus conclusiones son incómodas para sus objetivos políticos y empresariales. El cambio climático no debería usarse como un arma arrojada política; no se trata de ideologías, sino de un tema de seguridad nacional y como tal debería considerarse. Es un problema real, que exige soluciones basadas en hechos contrastados.

La ciencia también recibe el ataque de los fundamentalistas religiosos, que insisten en que sus venerables textos enseñan verdades inmutables reveladas por Dios. En mi opinión, hay pocos motivos de conflicto entre la mayoría de las religiones y la ciencia, pues muchas aceptan la ciencia como la manera de llegar al conocimiento del mundo natural, e incluso se congratulan de ello. Más allá de esto, la existencia y el significado del mundo es algo lo bastante misterioso como para que tanto la ciencia como la religión puedan aportar sus argumentos en los debates, sin que ninguna de las dos consiga llegar a una solución. Lo único que necesitamos es que las religiones no ataquen ni socaven los resultados científicos sobre los cuales hay un claro consenso porque están respaldados por incontables pruebas, evaluadas por aquellos con conocimientos suficientes para juzgar su validez. Sin duda, esta es la postura de muchos líderes religiosos de todas las confesiones; a cambio, los científicos deberían considerar a estos líderes tolerantes como sus aliados en la búsqueda de un mundo mejor.

La ciencia se ve asimismo atacada por la tendencia de algunos académicos humanistas (los cuales deberían ser más sensatos) que sostiene que la ciencia no es más que un constructo social que solamente aporta una perspectiva sobre el mundo, entre muchas otras, todas igualmente válidas.

Para que la ciencia pueda responder con claridad y contundencia a estos ataques, debe liberarse de los anhelos místicos y las motivaciones metafísicas de sus profesionales. Los científicos, en tanto que individuos, pueden estar impulsados (y a veces lo están, seamos sinceros) por sentimientos místicos y preconcepciones metafísicas, pero esto no perjudica a la ciencia siempre y cuando uno entienda y cumpla con los estrictos criterios que diferencian las meras hipótesis y las corazonadas de las verdades establecidas.

Cuando la física fundamental queda en manos de la filosofía anti-realista nos enfrentamos a un problema grave. Nos exponemos a

abandonar el centenario proyecto realista, que en el fondo no es más que un ajuste continuo de la frontera entre nuestro conocimiento de la realidad y el reino de la fantasía, que se produce paso a paso con cada avance logrado. Una amenaza del antirrealismo es la que se cierne sobre la propia práctica de la física, pues el antirrealismo rebaja nuestra ambición de una comprensión clara y transparente de la naturaleza y, en consecuencia, debilita nuestros criterios de lo que constituye una correcta comprensión de un sistema físico.

Tras el triunfo del antirrealismo en el mundo atómico, hemos tenido que enfrentarnos a especulaciones antirrealistas sobre la naturaleza en sus escalas más grandes. Una ruidosa minoría de cosmólogos afirma que el universo que observamos es poco más que una burbuja en un vasto océano, llamado *multiverso*, que contiene una infinidad de otras burbujas. Y si bien es prudente considerar que las galaxias que observamos son típicas del resto de nuestro universo, tenemos que considerar que las otras burbujas invisibles están regidas por leyes físicas diferentes y asignadas al azar, de modo que nuestro universo dista mucho de ser representativo de todo el conjunto de universos. Si a esto le añadimos el hecho de que todas las demás burbujas, o casi todas, quedan para siempre fuera de nuestro alcance observacional, llegamos a la conclusión de que la hipótesis del multiverso nunca se podrá ni comprobar ni refutar. Esto sitúa toda esta fantasía fuera de los límites de la ciencia, pero a pesar de ello, es una idea defendida por no pocos físicos y matemáticos de renombre.

No hay que confundir esta fantasía del multiverso con la interpretación de los universos paralelos de la mecánica cuántica. Son ideas diferentes, aunque es cierto que comparten esa subversión mágico-realista del objetivo de la ciencia de explicar el mundo que observamos solo en términos de él mismo. Me atrevo a sugerir que el daño que los entusiastas partidarios del multiverso hacen a la claridad del objetivo y el propósito de la ciencia no habría sido posible si la mayoría de los físicos no hubiera adoptado acriticamente las versiones antirrealistas de la física cuántica.

Sin duda, la mecánica cuántica explica muchos aspectos de la naturaleza, y lo hace con una elegancia exquisita. Los físicos han creado un conjunto de recursos poderosísimos para explicar diversos fenómenos en términos de la mecánica cuántica, de modo que cuando uno domina este campo de la física puede controlar un montón de objetos de la naturaleza. Al mismo tiempo, los físicos siempre andan sorteando las enormes lagunas que la mecánica cuántica va dejando en nuestra comprensión de la naturaleza; la teoría es incapaz de ofrecer una imagen clara de

lo que sucede en procesos individuales y a menudo no puede explicar por qué un experimento da un resultado concreto en lugar de otro.

Estas lagunas y carencias son relevantes porque desvelan el hecho de que solo estamos a medio camino de resolver los problemas centrales de la ciencia y parece que nos hemos quedado sin gasolina. Creo que si todavía no hemos tenido éxito en unificar la teoría cuántica con la gravedad y el espacio-tiempo (que es lo que significa «cuantizar la gravedad») o en unificar las interacciones fundamentales es porque hemos estado trabajando con una teoría cuántica incompleta e incorrecta.

En cualquier caso, tengo la sospecha de que las implicaciones de edificar la ciencia sobre cimientos tambaleantes son aún más profundas y preocupantes. La confianza en la ciencia como método para resolver discrepancias y hallar la verdad queda socavada cuando en la misma base de la ciencia prospera una tendencia antirrealista radical. Cuando los que establecen los criterios de lo que constituye una explicación adecuada se ven seducidos por un misticismo agresivo, la confusión resultante se propaga por toda la cultura humana.

He tenido el privilegio de conocer a unos cuantos representantes de la segunda generación de creadores de la física del siglo xx. Uno de los más contradictorios fue John Archibald Wheeler, físico teórico nuclear y místico que traspasó el legado de Albert Einstein y Niels Bohr a mi generación mediante las historias que nos contaba de su amistad con ellos. Wheeler estuvo comprometido en la lucha durante la Guerra Fría, trabajando en la bomba de hidrógeno mientras lideraba el estudio de los universos cuánticos y los agujeros negros. También fue un gran maestro, con alumnos como Richard Feynman, Hugh Everett y varios pioneros de la gravedad cuántica; incluso podría haber sido mi mentor, si yo hubiera sido un poco más sensato.

Como buen estudiante de Bohr, Wheeler se expresaba por medio de enigmas y paradojas. Su pizarra no se parecía a ninguna otra que yo haya visto; no tenía ecuaciones, solo unas pocas máximas enmarcadas y escritas con elegante caligrafía que condensaban toda una vida buscando la razón por la que nuestro mundo es un universo cuántico. Un ejemplo era «*It from bit*»;\* un aforismo bien pertinente, pues Wheeler fue uno de los

\* Aforismo que, si queremos mantener algo del juego de palabras y la rima original, tal vez podríamos traducir muy libremente como 'Existió por el bit'. (*N. del t.*)

primeros proponentes de la tendencia actual a considerar que el mundo está constituido por información, de tal manera que esta resulta más fundamental que aquello que describe (se trata de una forma de antirrealismo de la que nos ocuparemos a su debido tiempo). Otra de sus máximas era «Ningún fenómeno es un fenómeno real hasta que es un fenómeno observado», y el tipo de conversación que uno podía tener con Wheeler era algo como esto: un día me preguntó «Pongamos que cuando mueres te presentas ante San Pedro para tu examen requetefinal y te hace una sola pregunta: “¿por qué cuántico?” [es decir, por qué vivimos en un mundo descrito por la mecánica cuántica] ¿Qué le responderías?».

Buena parte de mi vida ha estado dedicada a buscar una respuesta adecuada a esta pregunta. Mientras escribo estas páginas, recuerdo con claridad mis primeros encuentros con la física cuántica. Tras abandonar el instituto, a los diecisiete años, solía rebuscar por los estantes de la biblioteca de física de la Universidad de Cincinnati. Allí me topé con un libro que tenía un capítulo escrito por Louis de Broglie (con quien nos volveremos a encontrar en el capítulo 7), el primero en sugerir que los electrones son ondas, además de partículas; en ese capítulo se presentaba su teoría de las ondas piloto, que fue la primera formulación realista de la mecánica cuántica. El texto estaba en francés, un idioma que leía con dificultad tras dos años de estudiarlo en el instituto, pero recuerdo bien mi entusiasmo al entender sus aspectos básicos. Si cierro los ojos, aún puedo ver una página del libro en que se presentaba la ecuación que relaciona la longitud de onda con la cantidad de movimiento.

Mi primer curso real de mecánica cuántica llegó a la primavera siguiente, cuando estaba en el Hampshire College. Ese curso, impartido por Herbert Bernstein, finalizó con una presentación del teorema fundamental de John Bell,<sup>1</sup> que, para expresarlo con brevedad, prueba que el mundo cuántico encaja de una forma incómoda en el espacio. Recuerdo con gran claridad que, cuando entendí la demostración del teorema, salí de la biblioteca de la facultad y me senté en los escalones de la entrada, atónito; saqué una libreta y en un momento escribí un poema para una chica de la que estaba enamorado y en el que le explicaba que cada vez que nos acariciábamos había electrones de nuestras manos que, a partir de ese momento, quedaban entrelazados unos con otros. Ya no recuerdo quién era esa chica ni qué hizo de aquel poema, ni tan solo recuerdo si llegué a mostrárselo, pero mi obsesión por descifrar los misterios del entrelazamiento no local empezó ese día y nunca me ha abandonado; en las décadas que han transcurrido desde en-

tonces tampoco ha disminuido mi apremio por dar sentido a la física cuántica. A lo largo de mi carrera, los enigmas de la física cuántica han sido el misterio central al cual he regresado una vez y otra. Espero que estas páginas inspiren en vosotros una fascinación parecida.

La historia que relato en este libro está organizada como una obra de teatro en tres actos. El primer acto explica los conceptos básicos que necesitaremos de la mecánica cuántica, a la vez que recorre la historia de su creación. El tema principal de esta parte es el triunfo de los anti-realistas, liderados por Niels Bohr y Werner Heisenberg, sobre los realistas, cuyo gran defensor era Albert Einstein. Téngase en cuenta que la historia tal como la explico es solo un bosquejo simplificado; la historia real es bastante más compleja. La segunda parte repasa el resurgimiento de los enfoques realistas en la mecánica cuántica, que empezaron en la década de 1950, y explica sus puntos fuertes y sus flaquezas. Los protagonistas de esta parte son un físico estadounidense llamado David Bohm y un teórico irlandés, John Bell.

La conclusión de la segunda parte nos dirá que los enfoques realistas son perfectamente posibles y funcionan lo bastante bien como para desautorizar las aserciones de que la física cuántica nos obliga a ser antirrealistas. Sin embargo, en mi opinión, ninguno de estos enfoques parece acercarse a la verdad; creo que podemos lograr mucho más y de hecho, por razones que explicaré en su momento, me aventuro a afirmar que completar correctamente la mecánica cuántica solucionará también el problema de la gravedad cuántica y nos aportará una buena teoría cosmológica. La tercera parte del libro presenta los esfuerzos actuales (algunos míos, algunos de otros) que se están llevando a cabo para elaborar esta «teoría del todo» realista.

¡Bienvenidos al mundo cuántico! Espero que os sintáis a gusto, porque es nuestro mundo y somos afortunados de que nos corresponda resolver sus misterios.

## ÍNDICE

<i>Prefacio</i> .....	11
-----------------------	----

### PRIMERA PARTE UNA ORTODOXIA DE LO IRREAL

1. La naturaleza adora ocultarse .....	27
2. Cuentos y cuantos .....	37
3. Cómo cambian los cuantos .....	47
4. Cómo se comparten los cuantos .....	57
5. Lo que la mecánica cuántica no explica .....	75
6. El triunfo del antirrealismo .....	81

### SEGUNDA PARTE EL RENACIMIENTO DEL REALISMO

7. El desafío realista: De Broglie y Einstein .....	109
8. Bohm: el nuevo asalto realista .....	117
9. El colapso físico de los estados cuánticos .....	135
10. El realismo mágico .....	149
11. El realismo crítico .....	157

### TERCERA PARTE MÁS ALLÁ DE LO CUÁNTICO

12. Alternativas a la revolución .....	183
13. ¿Qué hemos aprendido? .....	203



14. Una cuestión de principios .....	221
15. Una teoría causal de los puntos de vista .....	245
<i>Epílogo / Revoluciones. Una nota personal</i> .....	263
<i>Agradecimientos</i> .....	271
<i>Notas</i> .....	275
<i>Glosario</i> .....	287
<i>Lecturas adicionales</i> .....	295
<i>Índice alfabético</i> .....	299
<i>Índice de figuras</i> .....	305