

3

QUANTUM: PUNTOS EXTREMOS

The Needle's Tip that we would call infinitesimal, is, in its "scanning electron micrograph," the corbelled and tunneled and buttressed and corrugate Tower of Babel as Bruegel envisioned it under construction.

ALBERT GOLDBARTH

Hemos tomado el título de este capítulo del poeta epicúreo Lucrecio, quien en el siglo I a.C., fue quizá hasta ese momento de la historia humana –sin olvidar a Demócrito y Leucipo– el más claro proponente del átomo:

Entonces, más allá, puesto que hay puntos extremos, uno tras otro en ese cuerpo, los cuales nuestros sentidos no pueden ya distinguir, cada punto, podemos estar seguros, existe sin partes y está dotado con lo mínimo de la naturaleza, nunca ha sido separado fuera de sí mismo y no lo será en el futuro.

Si más y más modernos y complejos telescopios y aparatos ópticos, de radio o microondas están demostrando que Einstein está en lo correcto y la relatividad general ha superado su prueba, si no su justificación, con forme los astrónomos son capaces de detectar pulsares u oír la radiación de fondo que dejó el *big bang*, y con cada descubrimiento comprendemos mejor la extensión del universo y su asombrosa naturaleza, a medida que usamos los instrumentos con

los cuales se explora el mundo atómico las maravillas crecen aún más.

A partir del Renacimiento, cuando una temprana ciencia se asomaba curiosa al microscopio, se topaba con sorpresa tras sorpresa, sólo para descubrir, a medida que el microscopio alcanzaba sus límites y tuvo que recurrir a otras herramientas, que mientras se adentraba a escalas más y más pequeñas, el mundo que se percibía no parecía reducirse a lo que se pensaba que eran nuestros bloques de construcción. En este capítulo veremos algunos de los más asombrosos descubrimientos que la ciencia efectuó en el siglo XX y que ponen a prueba la mente. Estos descubrimientos no tratan, como los de la relatividad de Einstein, con el lugar que habitamos, sino con el tejido fundamental del que nosotros y todo lo que nos rodea estamos hechos: los átomos y sus partículas, objetos de estudio del *quantum* o física cuántica.

Como tratamos en el capítulo anterior, al final del siglo XIX los físicos trabajaban con certidumbres. El modelo newtoniano del universo presentaba ciertas paradojas que eran difíciles de solucionar, pero la mayoría de los científicos pensaban que podrían resolverse sin perturbar radicalmente el marco Newtoniano. A pesar de lo conservadores que eran Einstein y muchos otros científicos, sus descubrimientos de principios del siglo XX no sólo revolucionaron la física y la ciencia en general, sino que cambiaron los paradigmas dentro de los cuales la ciencia trabajaba. Como vimos, la relatividad de Einstein hizo eso precisamente. La teoría general sostiene que galaxias, estrellas y planetas se desplazan a

través de un espacio-tiempo tetradimensional el cual se curva en su cuarta dimensión.

Si bien las conclusiones de Einstein parecían de muchas maneras pasmosas, él mismo y muchos de sus contemporáneos trataron no solamente de solucionar las paradojas cosmológicas heredadas de la mecánica clásica, sino que también trabajaron con algunas paradojas y problemas que surgían del estudio del átomo y sus componentes.

Es un hecho que si alguna rama de la ciencia ha retado al sentido común hasta revolucionar por añadidura nuestra concepción del mundo en que vivimos, ésta ha sido la mecánica cuántica, que es tan enigmática en sus afirmaciones que tanto científicos como filósofos han rechazado o se han encogido de hombros ante sus descubrimientos. La famosa cita de Einstein de que Dios no jugaba a los dados con el universo, fue una respuesta directa a una de las más apreciadas premisas de la física cuántica. El filósofo de la Universidad de Columbia, David Z. Albert ha escrito que la del *quantum* es “una historia perturbadora... la más perturbadora historia que quizá ha emergido de cualquiera de las ciencias físicas desde el siglo XVII”.¹ⁱ Igualmente, Nick Herbert en su libro *Quantum Reality: Beyond the New Physics*, discute que, con el *quantum*, los científicos “han perdido su asidero con la realidad”.²

En una de sus mejores popularizaciones del tema, David Lindley explica porqué el *quantum* parece a la vez tan opuesto a la lógica de la física clásica y, usando una palabra que los físicos cuánticos han adoptado, tan extraño:

*This is the heart of the fundamental issue. In classical physics, we are accustomed to thinking of physical properties as having definite values, which we can try to apprehend by measurement. But in quantum physics, it is only the process of measurement that yields any number for a physical quantity, and the nature of quantum measurements is such that it is no longer possible to think of the underlying physical property (magnetic orientation of atoms, for example) as having any definite or reliable reality before the measurement takes place.*³

La dificultad y lo extraño de la física cuántica o *quantum* deriva del hecho de que la realidad que describe –a diferencia de la distancia de un planeta a otro o del tiempo que tarda la luz en llegar del Sol a la Tierra –no puede ser medida a causa de que una vez que se efectúa la medición, la realidad ha cambiado. Como la mayoría de la física cuántica, la anterior afirmación suena paradójica. Sin embargo, más paradójico es el hecho de que si uno ve las diferentes ramas de la ciencia e intenta señalar la disciplina que es capaz de predecir resultados de la manera más precisa, encuentra que la física cuántica es la más exacta de las ciencias. El problema, claro, es que cualquiera que sea la precisión que el *quantum* nos de, es solamente para desafiar nuestro sentido común.

En este capítulo intentaremos entender la mecánica cuántica: qué es lo que estudia, cuáles son sus conclusiones y cómo estas conclusiones se ligan con el macrocosmos que tratamos en el capítulo previo. El *quantum* estudia el comportamiento del átomo y sus componentes, y lo hace prediciendo las probabilidades de los posibles resultados. En otras palabras, una disciplina análoga a la física cuántica en el macromundo puede ser la balística.

La balística, por ejemplo, toma un proyectil, una plataforma de lanzamiento, la fricción, la gravedad, etc., como sus variables, y por medio de fórmulas calcula la manera en la cual el misil viajará y dónde hará impacto. Otro modo de decir esto es que la balística toma ciertas variables y las convierte en posibles resultados. Igualmente, la física cuántica toma el átomo y calcula la probabilidad de su carga o su “color”. La diferencia, claro, es que la balística funciona en un universo clásico. Los expertos en balística tienen que considerar dos cosas primordiales: la materia, o sea la sustancia de que están hechos el proyectil y el aparato de lanzamiento y los campos, en este caso el campo gravitacional de la Tierra. El proyectil está hecho de metal (materia), sigue una trayectoria debida a la inercia y, si no es detenido, eventualmente caerá debido a que el campo gravitacional de la Tierra lo atrae. La física cuántica no es tan simple.

Cuando la gente habla del *quantum*, están a menudo hablando de varias interpretaciones que los científicos tratan de enmarcar para poder describir o explicar lo que el *quantum* está diciendo. Por ejemplo, Niels Bohr, pionero de la física cuántica y conocido por la interpretación de Copenhague,⁴ pudo argumentar que lo que el *quantum* nos dice es que no existe una realidad profunda. Al igual que el Obispo Berkeley tres siglos antes que él, Bohr sostuvo que el mundo que vemos alrededor de nosotros puede ser lo suficientemente real, pero sus componentes, de lo que está construido, no es real. De esto se sigue entonces que la segunda premisa de la interpretación de Copenhague gira alrededor de la idea de que, si no existe una realidad profunda, los científicos observan

una realidad fenomenológica. Esta realidad fenomenológica sostiene que en ausencia de un observador, el fenómeno no existe. Dicho de otro modo, los científicos crean la realidad cuando determinan el espín⁵ o el *momentum* (producto de la masa por la velocidad) del electrón.

Para el no especialista, lo que pretende la interpretación de Copenhague suena escandaloso. Pero Bohr, que estructuró su premisa principal, sostuvo que era pragmática. Para él, el trabajo de los científicos implicaba el estudio de los fenómenos naturales sin explorar las implicaciones éticas, filosóficas o existenciales de sus descubrimientos. Muchos científicos han rechazado esta posición, entre los cuales quizá el principal sea Einstein, quien sostuvo una posición casi mística ante la ciencia. De hecho, Einstein dedicó los últimos años de su vida a un intento de reconciliar la física clásica de su relatividad general con los herméticos descubrimientos del *quantum*. Más tarde otros científicos han brindado diferentes interpretaciones. Estas interpretaciones posteriores, desarrolladas varios años después de la teoría cuántica, la han establecido como la más exacta rama del conocimiento científico. Nosotros examinaremos de cerca estas interpretaciones, puesto que algunas incluyen afirmaciones interesantes, otras son solamente indignantes y otras parecen ofrecer rutas viables para futuras investigaciones. En realidad, estas últimas nos parece que abren nuevos panoramas. Sin embargo, antes de adentrarnos en estas interpretaciones, nos gustaría dar un bosquejo de las principales premisas del *quantum*, porque sin esto es imposible entender ninguna ciencia, menos aun

una que trata con el átomo y sus partículas y que ha inspirado tan variadas y extrañas reacciones.

La mayoría de los libros de texto y de divulgación sobre el *quantum* empiezan por una discusión sobre la luz. La razón de esto es completamente simple. La física cuántica se inventó para tratar las interacciones de la luz con los átomos. Sólo después, una vez que el *quantum* solucionó su problema, fue que los científicos trataron de verificar si sus descubrimientos eran también aplicables a las entidades de mayor orden, puesto que el *quantum* había revelado la estructura del núcleo atómico y de otras partículas subnucleares, así como la naturaleza de los sólidos, líquidos y gases. Mientras un número creciente de físicos intentaron aplicar la teoría cuántica a cada partícula, descubrieron que la teoría no solamente explica el comportamiento de la luz, sino que aclara muchos misterios del átomo y la materia, por lo que finalmente, cuando hablamos acerca de génesis cósmica, acerca del momento en que el universo se inició, la cosmología se tiene que acercar al *quantum*.

¿Qué es exactamente lo que el *quantum* tiene que decir acerca de la luz? Para entender los adelantos del *quantum*, debemos, aunque sea brevemente, ver los diferentes problemas que los científicos se han puesto a resolver. Uno de los más conservadores científicos a comienzos del siglo XX pudo haber iniciado la reacción en cadena del *quantum* cuando trataba de resolver más bien un enigmático problema que había venido a conocerse como la radiación del cuerpo negro, que es, por definición, una superficie que absorbe toda la radiación electromagnética que le llega. Los físicos en el siglo XIX sabían que los objetos poseen un color intrínseco.

Durante la primavera las hojas son verde; la mayoría de la madera cae en el rango del café. Estos objetos están formados por muy pequeñas piezas de materia. Siempre que estas piezas se mueven, vibran y producen ondas de los correspondientes campos electromagnéticos, que nuestro cerebro, a través de los ojos y nervios ópticos, interpreta como color. Cuanto más rápidamente se muevan las partículas, mayor será la frecuencia de la luz que se excita. Por supuesto que la vibración de la partícula puede ser alterada aplicando una energía extra. Nosotros somos testigos de este fenómeno cuando encendemos un foco.

De acuerdo con los físicos, los cuerpos negros no tienen un color intrínseco; sin embargo, paradójicamente emiten radiación. Si calentamos lo suficiente una pieza de metal, brillará con un color rojo.

En 1900, Max Planck abordó el problema de la radiación del cuerpo negro de una nueva manera. Estudiando la radiación de osciladores armónicos en equilibrio térmico y utilizando técnicas mecánico-estadísticas, dividió la energía total del sistema en cantidades discretas. Haciendo esto, se dio cuenta de que obtenía una ley de distribución apropiada de la radiación, a condición de que los osciladores pudieran absorber o emitir energía sólo en cantidades discretas ϵ , que en la actualidad se conocen como *quanta*. La energía de estos *quanta* están relacionadas a la frecuencia ν de la emisión o absorción de la radiación como:

$$\epsilon = h\nu$$

donde h es una constante de proporcionalidad conocida ahora como constante de Planck.

El uso de la constante parecía arbitrario, y si bien resolvió el problema de la radiación del cuerpo negro, a la mayoría de los científicos les pareció un truco, porque para Planck la energía de la partícula tenía que ser un múltiplo de la frecuencia por la constante. Lo que la fórmula finalmente muestra es que la energía viene en paquetes cuya denominación es $h\nu$. Estos paquetes, estos *quanta* vinieron a iniciar una revolución, puesto que forzaron a los científicos a repensar todas sus premisas acerca de la naturaleza de la materia.

Para comenzar, puesto que la teoría cuántica se desarrolló para resolver el problema de la interacción de la luz con las partículas, la concepción científica de la luz cambió completamente. Una vez asimilado este cambio, los científicos pudieron aplicar las nuevas ideas a sus investigaciones, a solucionar más y más problemas, hasta que eventualmente se dieron cuenta de que toda la materia, la naturaleza de sólidos, líquidos y gases, la estructura del núcleo, etc., se comportaba de acuerdo con los principios cuánticos. Estos principios, aunque extraños, son actualmente bastante simples. Durante todo el siglo XIX, los científicos creyeron que la luz era una onda de energía electromagnética. Pensaban que un haz de luz “iluminaba” una superficie y por ello se veía. Puesto que las ondas eran la manifestación de una fuerza, deducían que, como todas las ondas, las ondas de luz podían ejercer su fuerza, y haciendo esto, alteraban la superficie donde brillaban. En otras palabras, tal como las ondas de sonido empujan las moléculas de aire, las ondas de luz golpean los electrones de la superficie donde brillan. De acuerdo con la física clásica, la intensidad de la onda determina la perturbación de la superficie que afecta. Sin embargo,

los científicos cuánticos descubrieron que esto no era verdad para la luz. Una luz de mayor intensidad no golpea los electrones con mayor energía. Este último descubrimiento es uno de los muchos de la física cuántica que confunden. Para entender qué tan contradictorio es al sentido común, lo único que necesitamos es visualizar unas ondas de agua diferentes. Imaginemos que tiramos una pequeña piedra en un estanque: la onda que se produce se desplaza con rizos que se alejan del centro y perturban todo lo que encuentran en su camino. Las hojas que flotan en la superficie podrían equipararse a los electrones y ser “golpeados” por la onda. Si en lugar de tirar una piedra pequeña nos las arreglamos para arrojar una gran roca, la energía con la cual las hojas se mueven será mayor, tal como la fuerza con que la ola al subir la marea golpea la costa es mayor que cuando sólo llegan pequeñas olas. Lo que el *quantum* nos refiere como el efecto fotoeléctrico es una historia aparentemente no apegada al sentido común. Si la persona que conduce un experimento incrementa la intensidad de la luz, más fotones golpearán la superficie, pero llegarán con la misma energía. De hecho, lo que el efecto fotoeléctrico confirma es que para transferir una mayor energía a los electrones, uno debe incrementar no la intensidad sino la frecuencia. La energía de la luz no está en relación con su intensidad, sino con su color. La luz azul, que es de alta frecuencia, golpea los electrones con más fuerza que la luz roja, que es de baja frecuencia. Los resultados de los experimentos nos dicen entonces que las ondas cortas y rápidas son más poderosas que las largas.

Quien explicó el extraño comportamiento de la luz fue Einstein. Tomando en cuenta la constante de Planck, razonó que la luz afecta la superficie sobre la cual brilla, no como una onda, sino como una lluvia de partículas. Estas conclusiones, por supuesto, contradijeron una de las más apreciadas certidumbres de los científicos: el que la luz era una onda. Desde los tiempos de Maxwell, la luz era entendida como la manifestación de un campo magnético; más aún, el comportamiento de la luz en nuestra diaria experiencia parece contradecir el hecho de que la luz sea una partícula. Un haz de luz puede propagarse sobre un área, puede dividirse, redirigirse, difractarse y finalmente puede cruzar su curso con el de otro haz. Todas estas cualidades nos sugieren que la luz es una onda. Las ondas se esparcen, se dividen, se redirigen y cruzan caminos con otros haces. Las partículas, por otro lado, están confinadas a regiones pequeñas; su viaje está limitado a una sola dirección y no pueden interferir unas con otras sin chocar. En pocas palabras, las partículas y las ondas parecen irreconciliablemente diferentes. No obstante, tanto la solución de Einstein al efecto fotoeléctrico como la evidencia experimental nos lo dicen de otra manera. Nos dicen que la luz puede ser ambos, ondas y partículas, que la luz interactúa con una superficie mediante una lluvia de partículas que están divididas en “unidades de energía”. La denominación de estas unidades ha venido a conocerse como fotones.

Si la solución de Planck y Einstein parece contradictoria, cuando algunos de estos descubrimientos empezaron a introducirse en la comunidad científica y los científicos intentaron aplicarlos a otros aspectos de la materia, los resultados fueron aún más

extraños. Planck, Einstein y Compton pudieron mostrar que las ondas son también partículas. En Francia, Louis de Broglie razonó que tal como Einstein había demostrado que las ondas de luz tienen cualidades de partículas, las partículas de materia también tienen propiedades de onda. De hecho, en su tesis de doctorado sólo utilizó formulaciones de Einstein y Planck. Para él, cada partícula de materia podía ser asociada con una onda cuyas frecuencias espacial y temporal podían ser entendidas como energía y *momentum* o, dicho de otra manera, existe una dualidad formal entre las ondas y toda materia, de acuerdo con la cual la longitud de onda se puede asociar a cualquier *momentum*. En pocas palabras, el argumento de De Broglie complementa los descubrimientos de Einstein y Planck. Sin embargo, esto puede ser más difícil de digerir puesto que implica que la materia puede volverse un campo. En otras palabras, rompe con la distinción materia/campo y nos dice que todo está hecho de lo que los científicos han venido a llamar “material cuántico”.

Mientras que estos descubrimientos constituyen la espina dorsal del mundo con el cual la física cuántica trata, no son por sí mismos la teoría cuántica. Hasta 1925, los científicos pudieron haber descubierto nuevas y sorprendentes cosas acerca del átomo, y no obstante, para interpretarlas, *tenían que utilizar* los esquemas provistos por la física clásica y entonces jugar con sus fórmulas a manera de adaptarlas a los experimentos. De acuerdo con Max Jammer, la situación era una “lamentable mezcla de hipótesis, principios, teoremas y recetas computacionales”.⁶ La teoría cuántica, empero, es todo menos una mezcla. Sistematizada y exacta, la teoría es un método para representar el “material cuántico”

matemáticamente. La mecánica cuántica es, entonces, una representación del mundo por medio de símbolos, en la que un valor matemático es dado al material cuántico, una ley científica describe cómo esta cantidad se transforma y, finalmente, una especie de norma determina cómo las matemáticas pueden ser trasladadas a los fenómenos del mundo.

La primera de estas teorías en ser formulada de manera completa fue la de Werner Heisenberg. Conocida como mecánica “matricial”, Heisenberg desarrolló su sistema en 1925 mientras se recuperaba de una enfermedad en la isla de Heligoland. En sus memorias recordaba lo siguiente:

At 3 a.m. one night he could no longer doubt the mathematical consistency and coherence of the kind of quantum mechanics to which my calculations pointed. At first I was deeply alarmed. I had the feeling that, through the surface of atomic phenomena, I was looking at a strangely beautiful interior, and felt almost giddy at the thought that I now had to probe this wealth of mathematical structures nature had so generously spread out before me.⁷

La suposición inicial de Heisenberg parece ahora muy simple; sin embargo, no lo fue cuando él desarrolló sus matrices. Ello implicó algo que había oído cuando estaba trabajando en Gottinga, con Max Born: que una teoría física debería tener que ver con cosas que pudieran ser observadas por experimentos. Mientras que al principio la idea parece obvia, no lo era tanto entonces, y de hecho el llevarla a cabo implicaba desprenderse de paradigmas de la física clásica que los científicos seguían aplicando al mundo atómico. Nadie

había visto un electrón siguiendo una órbita elíptica alrededor del núcleo. El modelo era adoptado de la física clásica. Lo que los experimentos reportaban eran los estados de onda y partícula del electrón, su espín y su *momentum*. Lo que los resultados confirmaban era que había transformaciones entre los estados.

Para tratar con estas transformaciones y con las relaciones entre dos estados, Heisenberg tuvo que recurrir a las matrices. Los científicos que intentan popularizar la mecánica cuántica han sugerido que las matrices de Heisenberg se parecen a las tablas de kilometraje de los mapas. Una analogía aún más fácil puede hacerse con el juego de ajedrez: los cuadros del tablero pueden ser representados por unas únicas coordenadas (A1, A2, B1, etc.) y el “estado” del juego en un momento dado, puede ser representado por la notación de estas coordenadas. En las matrices de Heisenberg, el “estado” de una partícula o un electrón, las “transiciones cuánticas”, pueden ser descritas mediante una notación similar que liga los estados inicial y final.

Aunque actualmente la mecánica matricial de Heisenberg se maneja no solamente para reemplazar las ecuaciones de la mecánica clásica, sino también para redefinir muchos de sus principios, como el de la conservación de la energía, no llegó a tener gran éxito en la comunidad científica. Esta falta de éxito se debió, en parte, a lo poco familiar que eran las matemáticas en las que se fundaba. Pero más importante fue el que no proveía una imagen física del fenómeno que representaba. No había órbitas, no había ondas ni partículas. Por lo tanto, cuando un año después de que las

matrices de Heisenberg fueron publicadas, Erwin Schrödinger propuso una teoría cuántica, la mecánica ondulatoria, que utilizaba la imagen de las familiares ondas, la comunidad científica adoptó este modelo que llegó a ser el estándar.

Desarrollada en 1926, la mecánica ondulatoria, como la mecánica matricial, resolvió los problemas de las interacciones cuánticas; sin embargo, la primera no se basaba en una rama impopular de las matemáticas, sino en unas matemáticas que eran ya usadas ampliamente por los físicos. En pocas palabras, Schrödinger usó una ecuación de onda, una ecuación similar a la que describía las ondas comunes, como las ondas sonoras. Así, mientras que el modelo de Heisenberg suponía que el electrón era una partícula, el de Schrödinger lo establecía como una onda. Ambas teorías llegaron al mismo resultado y eventualmente fue el propio Schrödinger, junto con Carl Eckhart y Paul Dirac, quien pudo demostrar que los dos modelos eran matemáticamente equivalentes. Este último descubrimiento provocó el disgusto de Schrödinger, puesto que él originalmente formuló la mecánica ondulatoria para restablecer la sensatez de la física cuántica, intentando eludir lo extraño, como los saltos cuánticos, lo discontinuo y aleatorio de las transiciones entre estados cuánticos.

De hecho, ninguna de las teorías anteriores, ni las teorías por venir podrán eliminar lo extraño. Si el *quantum* es enigmático, es porque viola al menos dos de nuestros principales paradigmas intelectuales: la causalidad y la identidad. En un salto cuántico, el electrón en cierto nivel de energía –el estado permitido de una cierta cantidad de energía acumulada– puede pasar instantáneamente a

otro nivel energético, emitiendo o absorbiendo energía al hacerlo. No existe un estado intermedio y el salto ocurre sin tomar tiempo. En consecuencia, un salto cuántico viola nuestro apreciado sentido de causalidad, lógica y continuidad. El “y” y el “uno u otro” que George Boole codificó en los símbolos que pudieron anclar su “lógica algebraica”, pierden su habitual significado. De manera similar, en el mundo cuántico, las identidades, nuestra capacidad de identificar ciertas características y añadirlas a los componentes de los átomos, como si el átomo fuera, como los seres vivos, sujeto a la taxonomía, no funciona. El casi arquetípico experimento al que recurren los físicos para explicar los enigmas de la mecánica cuántica es el experimento de la doble rendija. Richard Feynman argumentó que el experimento contenía el “misterio central” del *quantum* porque presentaba “un fenómeno que es imposible, absolutamente imposible explicar de una manera clásica, y que tiene el corazón de la mecánica cuántica”. Feynman añadió: “en realidad contiene el único misterio... las peculiaridades básicas de la mecánica cuántica”.⁸

Desarrollado originalmente a principios del siglo XIX por el físico inglés Thomas Young para confirmar la teoría ondulatoria de la luz propuesta por Christopher Huygens, que se oponía a la teoría corpuscular de Newton, el experimento es sorprendentemente simple: si un haz de luz se proyecta en una pantalla que tiene una estrecha ranura en ella, la luz pasa a través de esta ranura y se proyecta hacia otra pantalla que a su vez tiene dos rendijas. La luz sale a través de ambas rendijas y se proyecta a una pantalla donde forma un patrón de franjas de sombra y luz. Este patrón no es muy

diferente al de los códigos de barras que aparecen en la mayoría de los productos que compramos hoy día, excepto que las barras son menos definidas y más regulares, y esta regularidad es debida a la interferencia de dos ondas que se traslapan. Este comportamiento, entonces, es semejante a lo que sucede con las ondas sonoras en un equipo estereofónico de música: si colocamos las bocinas en cierta forma de manera que las ondas sonoras choquen, uno u otro sonido puede ser eliminado. En una gran pieza sinfónica, por ejemplo, en un momento dado, ciertas frecuencias –como las de la flauta o el clarinete –pueden no ser oídas. Igualmente, en el experimento de las dos rendijas, las barras que se forman en la pantalla final, vinculan las zonas brillantes con la coincidencia de las crestas de las ondas, y las zonas oscuras con las zonas donde las crestas de uno de los conjuntos de ondas pueden coincidir con los valles del otro conjunto, en cuyo caso los dos conjuntos de ondas se cancelan mutuamente.

Los resultados del experimento de Young, no pueden duplicarse cuando se usan partículas. Imaginemos que en lugar de los haces de luz usáramos municiones para hacerlos pasar a través de los agujeros. Las municiones pasarán por el primer agujero y después, de acuerdo con la gravedad y las fuerzas inerciales, pasarán a través de cada uno de los otros dos agujeros. Sin embargo, al final no tendremos un patrón similar al de barras de luz y sombras, sino que tendremos dos pilas de perdigones, una detrás de cada agujero. El aspecto curioso o, mejor, el aspecto verdaderamente sorprendente, emerge cuando los científicos usan un haz de electrones. Recordemos de nuestra discusión previa sobre

el efecto fotoeléctrico que, gracias a Einstein, llegamos a pensar en los electrones como partículas. Si los electrones se lanzan a través de ambas rendijas y llegan a una pantalla de fósforo, a una pantalla como de computadora o de TV, que registre los impulsos eléctricos de cada electrón, lo que obtenemos es exactamente es un patrón semejante al de las ondas de luz. Aun si los electrones fueran lanzados uno por uno, eventualmente la pantalla exhibiría el mismo patrón: cada electrón arribaría a un punto en particular de la pantalla y dejaría un punto de luz y después de –por decir un número– 700,000 electrones que fueran lanzados uno a uno, el patrón sería increíblemente similar al del experimento inicial.

Finalmente, el experimento de Young demuestra no solamente que la luz es una onda, sino algo más asombroso: las entidades cuánticas viajan como ondas pero arriban como partículas. De ahí la eficiencia tanto de la mecánica ondulatoria como de la matricial, pese al hecho de que esta última considera partículas, y la primera ondas. Además, las implicaciones de este experimento van más allá de la sola dualidad onda-partícula. A lo que apunta es a aquello que Feynman llamó el “único misterio”. Abundemos un poco, pues este es un experimento crucial, y otra vez, citando los argumentos de Feynman: “Cualquier otra situación que surge en la mecánica cuántica, puede siempre explicarse diciendo: ¿recuerda el caso del experimento de las dos rendijas? Es la misma cosa”.⁹ Así es que aquí volvemos: las partículas individuales que se lanzan a través de las dos rendijas marcan un solo punto en la pantalla. El sentido común nos dice que cada partícula pasa a través de una u otra de las rendijas. Sin embargo, a medida que más y más puntos se

marcan en la pantalla, el patrón que emerge es el clásico de interferencia de una onda que pasa a través de dos rendijas. Los electrones no solamente son capaces de pasar a través de ambas rendijas al mismo tiempo sino que (y volveremos a esto en un capítulo posterior) tienen que llegar a un determinado punto en la pantalla para contribuir a la formación del patrón.

Las implicaciones del experimento han sido exploradas e interpretadas de diferentes maneras. Cada una de estas interpretaciones ha provocado una plétora de preguntas filosóficas sobre lo que nuestro mundo es y, por lo tanto, con lo que con los físicos cuánticos están tratando es con el tejido, con la estructura fundamental del mundo. Ya hemos tocado brevemente la interpretación de Copenhague, que sostiene que no hay una realidad profunda. Sin embargo, la interpretación de Copenhague no es la única interpretación. Enfrentados con la dualidad onda-partícula del electrón y también con el hecho de que el electrón parece estar “consciente” del observador y afectarse por el acto de la observación, de manera que puede afectar su comportamiento en conformidad, otros físicos como Hugh Everett y Bryce de Witt,¹⁰ y más recientemente David Deutsch en *The Fabric of Reality*, han argumentado que siempre que el mundo se enfrenta a una elección a nivel cuántico –en otras palabras, cada vez que un electrón marca un punto y no otro en la pantalla, o escoge una rendija en lugar de la otra, entonces el universo se divide en dos o en tantas partes como opciones pueda seguir. En otras palabras, la interpretación de los muchos mundos sostiene, como De Witt lo escribe, que 10^{100} copias

un poco imperfectas de uno mismo se están dividiendo constantemente en copias adicionales.

La interpretación de los muchos mundos, como tantas otras interpretaciones, puede ser probada matemáticamente. De hecho, esta interpretación, en su forma completa de desarrollo matemático, es acorde con la interpretación de Copenhague. Sin embargo, aun cuando ha probado ser útil para los cosmólogos que han empezado a especular sobre multiuniversos o multiversos (en su forma más usual), sus defectos son de la clase de defectos a los que, desafortunadamente, demasiados científicos son proclives: a permitir que a una teoría que, como hemos visto brevemente, puede ser matemáticamente precisa pero de ninguna manera completa, se le exijan demasiadas virtudes. En otras palabras, la interpretación sobreextrapola los resultados a tal extremo, que aún la prosa de su explicación tiene ese halo inmaduro que uno encuentra en las investigaciones entusiastas pero filosóficamente indisciplinadas. David Deutsch es el principal ejemplo de esto. Después de discutir que “la teoría cuántica de los universos paralelos no es el problema, [sino] la solución... la explicación –la única que es defendible– de una realidad notable y contraintuitiva”, Deutsch se entusiasma al decir:

Not only do the copies of an object have any privileged position in the explanation of shadows [by shadows Deutsche means the particles in other universes] that I have just outlined, neither do they have a privileged position in the full mathematical explanation provided by quantum theory. I may feel subjectively that I am distinguished among the copies of the

tangible one, because I can directly perceive myself and not the others, but I must come to terms with the fact that all the others feel the same about themselves.

Many of those Davids are at this moment writing these very words. Some are putting it better. Others have gone for a cup of tea.¹¹

La especulación de Deutche es, por supuesto, un buen ejemplo de una falacia central en la cual los científicos a menudo incurren. La falacia es en el fondo semántica e involucra la aplicación indiscriminada de terminología científica que tiene un significado específico en el laboratorio, distinta al que tiene fuera de aquél.

En el corazón del asunto también hay que considerar el hecho de que el *quantum*, con todo y su precisión en la descripción del micromundo y del comportamiento del átomo y sus partículas, de ninguna manera es una ciencia que esté completa. El *quantum* puede resumir en tablas las fuerzas nucleares débil y fuerte, así como la fuerza electromagnética; sin embargo, hasta ahora nadie ha podido arreglárselas para integrar la gravedad en el esquema cuántico. Las razones de esta falla son diversas. Una de ellas puede concluirse si recordamos, del capítulo previo, que la masa inercial y la masa gravitacional son indistinguibles en la relatividad general de Einstein. La segunda razón tiene que ver con las escalas a las cuales el *quantum* trabaja. La gravedad es una fuerza demasiado débil, lo cual significa que sus efectos no pueden detectarse en el reino de las dimensiones de Planck.¹²

Algunas interpretaciones del *quantum* toman en cuenta lo incompleto de las teorías. Admitir lo incompleto del *quantum* no

implica la falla de éste. De hecho, nosotros como muchos científicos –entre ellos el matemático Roger Penrose y los físicos Danah Zohar y John Gribbin– creemos que finalmente el *quantum* desenmarañará no solamente los misterios del mundo físico, sino los más profundos y complejos misterios, como los de la memoria molecular que se ve en la formación del ADN, así como los de nuestra memoria y nuestra conciencia. En la segunda parte de este libro se hará énfasis en estos temas.¹³ Sin embargo, mientras en el futuro estos misterios pueden ser resueltos mediante los principios de la mecánica cuántica, esto sólo sucederá cuando los pretextos, por decirlo de alguna manera, sean borrados.

Una de las interpretaciones del *quantum* que reconoce estos pretextos y enseña las posibilidades de una futura teoría cuántica fue propuesta por David Bohm. Desafortunadamente, las ideas de Bohm, así como su reputación estuvieron sujetas a los caprichos de las políticas académicas. Nacido en Pennsylvania en 1917, Bohm se graduó en el Pennsylvania State College y, como muchos físicos del siglo XX, afinó su técnica primero con Oppenheimer en Berkley y después en Los Álamos. Bohm no solamente tenía una filosofía sospechosa, sino también una ideología política y cuando fue requerido para que delatara a sus colegas al HCUA (*House Committee on Un-American Activities*) de McCarthy, se rehusó, por lo que fue despedido de su cargo en la Universidad de Princeton. Sus tendencias marxistas lo hicieron sospechoso a la comunidad. Mientras escribía lo que es uno de los más claros y accesibles libros de texto sobre la mecánica cuántica, Bohm se convenció de las imperfecciones del *quantum* y desarrolló una nueva interpretación,

indistintamente conocida como onda piloto, el todo indivisible o la interpretación de las variables ocultas.

El estímulo de esta interpretación fue una teoría que llegó a ser más que una mera estadística, una teoría que podría tener alguna relevancia en el mundo:

Se supone que todo lo que importa en una teoría física es el desarrollo de las ecuaciones matemáticas que nos permitan predecir y dirigir el comportamiento de grandes conjuntos estadísticos de partículas... Ciertamente esta clase de suposición está de acuerdo con el espíritu general de nuestra época, pero la principal propuesta de este libro es que no podemos prescindir alegremente de tener un concepto global del mundo... En efecto, uno se da cuenta de que los físicos no pueden sumergirse precisamente ahora en cálculos de predicción y control: necesitan utilizar imágenes que se basen en cierto tipo de nociones generales acerca de la naturaleza del mundo físico...¹⁴

La interpretación con la cual Bohm intenta hacer que el *quantum* adopte una visión general ha sido etiquetada como determinista. Pese a todo, como veremos, la extrañeza misma del *quantum* ha rescatado la interpretación de su etiqueta. Muchos también han señalado el principal defecto de la interpretación, que parece confiar en la pesadilla que perturbó a Einstein tan frecuentemente: la acción a distancia, la idea de que las interacciones operan sin que intervenga ningún mecanismo.

Pese a todos sus detractores, la interpretación es importante, y si tiene fallas, definitivamente, como ha argumentado Timothy Ferris, apunta a “vislumbrar una futura ciencia”.¹⁵ La suposición inicial de

Bohm es que la versión usual de la física cuántica es defectuosa porque es incompleta. Este vacío se funda en el hecho de que, según Bohm, existe una capa subyacente de realidad, un mundo subcuántico que contiene información adicional acerca del mundo. Esta información adicional está en forma de variables ocultas que predicen los resultados precisos de mediciones particulares. En otras palabras, las variables ocultas de Bohm suponen y sostienen un tipo de “conciencia” global, una fuerza que controla, que determina el resultado de los eventos.

Aun cuando esta teoría es infinitamente más elegante y parece tener más sentido común que la de los múltiples universos o que la interpretación de Copenhague, los científicos la rechazaron bruscamente, primero porque el matemático John Von Neumann probó matemáticamente que las variables ocultas no operan en el mundo cuántico y por consiguiente la mayoría de los científicos no se atrevieron a admitir que para determinar el resultado de múltiples eventos, las variables ocultas daban por sentada la acción a distancia.

Recientemente, sin embargo, la interpretación de las variables ocultas ha tenido una especie de resurgimiento. David Z. Albert ha sido uno de sus principales proponentes:

This is the kind of theory whereby you can tell an absolutely low-brow story about the world, the kind of story that is about the motions of material bodies, the kind of story that contains nothing cryptic and nothing metaphysically novel, and nothing ambiguous and nothing inexplicit and

*nothing evasive and nothing unintelligible and nothing inexact and nothing subtle.....in which the whole universe evolves.*¹⁶

Para otros no filósofos-científicos como Albert, la interpretación ha sido reivindicada por el experimento llamado de Aspect. Este experimento consta actualmente mas bien de una serie de experimentos, efectuados por Alain Aspect y sus colegas, y establece que lo que Einstein etiquetó como la “horripilante o fantasmal acción a distancia” realmente opera en el mundo cuántico. El corazón del experimento implica la polarización de los fotones. Los fotones pueden llegar a pensarse con flechas que apuntan hacia “arriba” o hacia “abajo”. Si un átomo es estimulado de manera que produzca dos fotones, éstos se dirigen en direcciones opuestas cancelándose uno al otro. De estos fotones, uno puede ser “arriba” y el otro “abajo”. De acuerdo con la teoría cuántica estándar, los fotones existen en una sobreposición de estados. En otras palabras, pueden existir como “arriba” o “abajo” hasta que el experimentador efectúe la medida; en ese momento se produce un colapso de la función de onda y el fotón se establece en uno de los dos estados. El experimento toma esto en cuenta, pero lo usa a su favor efectuando la medida únicamente sobre un fotón. El experimento revela que tomando la medida del primer fotón, la función de onda del segundo fotón, no medido, se colapsa en el preciso momento en que la medida del primer fotón lo hace cambiar de una superposición de estados a un estado definitivo, y este segundo fotón, sin que se le efectúe ninguna medida, también cambia a un estado definitivo.

La respuesta instantánea del segundo fotón a lo que ocurre al ser medido el primero, contradice la imposibilidad de la acción a distancia. El experimento de Aspect, prueba, en otras palabras, mas allá de cualquier duda, que el mundo cuántico, el mundo del átomo es no local. Esta no localidad que para los científicos significa la manera en la cual una entidad es afectada no sólo por lo que funciona en un punto –su localidad– sino también por lo que funciona en otro lugar en el mismo instante, puede ser aún más misterioso que el resultado del experimento de la doble rendija que Feynman sostuvo como el misterio cuántico central. No obstante, las pruebas experimentales existen y por lo menos dan indicio de la existencia de variables ocultas hasta el punto de que algunos científicos han tomado el asunto donde Bohm lo dejó y, por ejemplo, John Cramer ha propuesto teorías que son afines a la de las variables ocultas de Bohm.

Volveremos a Bohm y las variables ocultas, pero primero dedicaremos un capítulo al intento de mostrar la convergencia entre el *quantum* y la cosmología.

¹ David Z. Albert, *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge, Harvard University Press, 1992, p.1.

² Nick Herbert, *Quantum Reality: Beyond the New Physics*, Nueva York, Doubleday, 1985, p. 15.

³ David Lindley, *Where Does the Weirdness Go: Why Quantum Mechanics is Strange, but not as Strange as You Think*, Nueva York, Basic Books, 1996, p. 14.

⁴ La interpretación de Copenhague, llamada así porque fue en esta ciudad donde Bohr trabajo, une diferentes ideas para hacer de la física cuántica un paquete manejable, sin ninguna teoría que la soporte de una manera coherente. Así por ejemplo, no tiene sentido preguntarse cómo se comportan el átomo y otras entidades cuánticas mientras no se les observa. Como Bohr explicó: todo lo que podemos hacer es calcular la probabilidad (nunca una certeza) de que un experimento particular llegue a un resultado particular. Es la interpretación de la

física cuántica que se da en la mayoría de los libros de texto y de los cursos universitarios.

⁵ El espín o spin es una propiedad de las entidades cuánticas relacionada con el concepto de giro en la física clásica.

⁶ Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Physics*, Nueva York, Mc Graw-Hill, 1996.

⁷ Werner Heisenberg, *Physics and Beyond*, Nueva York, Harper and Row, 1971.

⁸ Richard Feynman, *Lectures in Physics Vol. III*, Boston, Addison Wesley, 1965.

⁹ Richard Feynman, *The Character of Physical Law*, Londres, Penguin, 1992.

¹⁰ Para el trabajo de Everett véase *Reviews of Modern Physics*, vol. 29, p. 454.

Para el trabajo de DeWitt véase *Physics Today* (septiembre de 1970, p. 30).

Para un tratamiento completo de la interpretación de los múltiples mundos, una forma de empezar puede ser el libro de Paul Davies, *Other Worlds*.

¹¹ David Deutch, *The Fabric of Reality*, Londres, Penguin, 1967.

¹² La longitud y el tiempo de Planck son, de muchas maneras, las varas de medir de la mecánica cuántica. La longitud de Planck se refiere a la escala a la cual las ideas clásicas acerca de la gravedad y del espacio-tiempo dejan de ser válidas. Actualmente la longitud de Planck tiene un valor aproximado de 10^{-33} cm. El tiempo de Planck es el tiempo que le tomaría a la luz el recorrer la longitud de Planck. Esta es la medida más pequeña de tiempo que tiene algún significado y su valor es de 10^{-43} seg. Ninguna medida menor de tiempo tiene significado.

¹³ Para el *quantum* como una herramienta para entender la inteligencia y la conciencia véase *La nueva mente del emperador*, de Roger Penrose. Danah Zohar amplificó, para decir lo menos, el argumento de Penrose y usó el *quantum* para razonar las raíces del ser así como la conexión del ser con el universo en su libro *The Quantum Self*. Finalmente, para la relación entre el *quantum*, el DNA y la memoria molecular, véase *In Search of the Double Helix*, de John Gribbin. Futuros capítulos estarán verdaderamente en deuda con el trabajo de estos científicos.

¹⁴ David Bohm, *La Totalidad y el Orden Implicado*, Barcelona, Kairós, 1988.

¹⁵ Timothy Ferris, *The Whole Shebang: A State of the Universe Report*, Nueva York, Simon & Schuster, 1997.

¹⁶ David Z. Albert, "Bohm's Alternative to Quantum Mechanics", *Scientific American*, mayo de 1994.