

un alcance infinitamente mayor que la «teoría total» que buscan los físicos de partículas elementales, ya que la estructura de la realidad no consiste sólo en ingredientes reduccionistas, tales como espacio, tiempo y partículas subatómicas, sino también, por ejemplo, en vida, pensamiento y calculabilidad. Las *cuatro vías principales* de explicación que podrían constituir la primera teoría total de la realidad son:

Física cuántica: capítulos 2, 9, 11, 12, 13 y 14

Epistemología: capítulos 3, 4, 7, 10, 13 y 14

Teoría de la calculabilidad: capítulos 5, 6, 9, 10, 13 y 14

Teoría de la evolución: capítulos 8, 13 y 14

El próximo capítulo trata de la primera y más importante de esas cuatro vías: la física cuántica.

"La estructura de la realidad"

David Deutsch

Anagrama, 1999

2. SOMBRAS

No existe puerta mejor, ni más abierta, para entrar en el estudio de la filosofía natural, que la consideración de los fenómenos físicos que se dan en una vela.

MICHAEL FARADAY

En sus populares disertaciones sobre ciencia en la Royal Institution, Michael Faraday solía instar a sus oyentes a aprender sobre el mundo mediante la observación de lo que ocurre cuando arde una vela. En su lugar, consideraré una linterna eléctrica. Ello resulta muy adecuado, ya que gran parte de la tecnología que utiliza se basa en los descubrimientos de Faraday.

Voy a describir algunos experimentos que demuestran fenómenos que constituyen el núcleo de la física cuántica. Experimentos de esta índole, con múltiples variaciones y perfeccionamientos, han constituido el pan nuestro de cada día en óptica cuántica durante muchos años. Si bien sus resultados son incontrovertibles, algunos de ellos siguen resultando difíciles de creer. Los experimentos básicos son notablemente sencillos y no requieren instrumentos especializados ni grandes conocimientos de matemáticas o física. En esencia, consisten, simplemente, en proyectar sombras. Sin embargo, las configuraciones de luz y sombra que una linterna común puede producir son muy extrañas, y, si se reflexiona sobre ellas, tienen extraordinarias ramificaciones. Su explicación requiere no sólo nuevas leyes físicas, sino un nuevo *nivel* de descripción y explicación que va más allá de lo que previamente se consideraba como ámbito de la ciencia. En primer lugar, muestran la existencia de universos paralelos. ¿Cómo? ¿Qué patrón concebible de sombras podría tener semejantes implicaciones?

Imaginemos que encendemos una linterna en una habitación oscura. La luz emana desde el filamento de la bombilla de la linterna y llena parte de un cono. Para no complicar el experimento con luz reflejada, consideraremos las paredes de la habitación totalmente absorbentes, de color negro mate. También, y ya que sólo estamos reali-

zando este experimento con la mente, podríamos imaginarnos una habitación de dimensiones astronómicas, de modo que no hubiese tiempo suficiente para que la luz alcanzase las paredes y volviese antes de haber acabado el experimento. La figura 2.1 ilustra la situación, pero resulta, en cierto modo, engañosa, ya que si estuviésemos observando la linterna desde uno de sus lados, no podríamos verla, y tampoco la luz que emite. La invisibilidad es una de las propiedades más evidentes de la luz: sólo la vemos cuando entra en nuestros ojos (cuando decimos que vemos algo, se trata, en realidad, del último objeto situado en nuestra línea de visión que ha sido afectado por la luz que ha entrado en ellos). No podemos ver la luz que pasa a nuestro alrededor. Si existiese algún objeto reflectante en el camino del rayo luminoso, o incluso un poco de polvo o unas gotas de agua que esparciesen la luz, podríamos ver dónde está, pero en el caso que nos ocupa no hay nada en el camino del rayo, y, puesto que lo observamos de lado, su luz no nos alcanza. Una representación ajustada de la realidad de lo que veríamos sería una imagen completamente negra. Si existiese una segunda fuente de luz, podríamos ver la linterna, pero seguiríamos sin ver su luz. Los rayos de luz, incluso de la más intensa que somos capaces de producir (por medio de láseres), se atraviesan unos a otros como si no existiesen en realidad.

La figura 2.1 muestra que la luz es más brillante cerca de la linterna y se vuelve más y más tenue a medida que el rayo se ensancha e ilumina una zona cada vez mayor. Un observador situado dentro del haz de luz que retrocediera lentamente desde la linterna, vería el reflector cada vez más pequeño y más tenue, hasta quedar reducido a

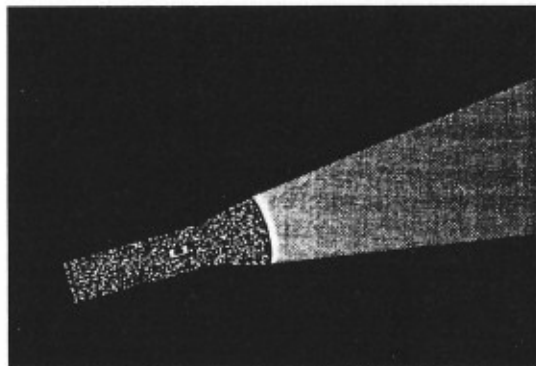


FIGURA 2.1. Haz de luz de una linterna eléctrica.

un puntito. ¿Seguro? ¿Es posible que la luz se esparza cada vez más y sea cada vez más tenue de un modo ilimitado? La respuesta es que no. A unos diez mil kilómetros de la linterna, su luz resultaría demasiado tenue para ser detectada por el ojo humano y el observador no percibiría nada. Mejor dicho, un observador humano no percibiría nada; pero ¿le ocurriría lo mismo a un animal dotado de una visión más sensible? Los ojos de las ranas son bastante más sensibles que los humanos, lo suficiente para introducir una diferencia significativa en nuestro experimento. Si el observador fuese una rana que se alejase de la linterna, nunca la perdería completamente de vista. Pero llegaría un momento en que la rana vería que la linterna empezaba a parpadear. Este parpadeo se produciría a intervalos regulares, que se harían más y más largos a medida que la rana se alejase, pero la brillantez de los destellos no disminuiría. A cien millones de kilómetros de la linterna, la rana percibiría un promedio de un destello al día, pero este destello sería tan potente como el observado a cualquier otra distancia.

Las ranas no nos pueden contar lo que ven, de modo que en los experimentos reales utilizamos fotomultiplicadores (detectores de luz aún más sensibles que los ojos de las ranas) y debilitamos la luz haciéndola pasar a través de filtros oscuros, puesto que no podemos observarla a cien mil kilómetros de distancia, pero el principio sigue siendo el mismo, al igual que el resultado: ni aparente oscuridad ni disminución uniforme, sino parpadeo, con destellos igualmente brillantes cualquiera que sea el filtro empleado. Este destello indica que existe un límite para la diseminación de la luz. Tomando prestada la terminología de los orfebres, podríamos decir que la luz no es infinitamente «maleable». Como el oro, una pequeña cantidad de luz puede diseminarse de modo uniforme sobre una gran área, pero a medida que se disemina llega un momento en que se vuelve grumosa. Incluso si fuese posible impedir que los átomos de oro tendieran a unirse, habría un punto más allá del cual no podrían ser subdivididos sin dejar de ser oro. Por lo tanto, el único modo de hacer aún más fina una hoja de oro del grueso de un átomo sería separar más y más sus átomos, dejando un creciente espacio entre ellos. Se llegaría así a un punto en el que ya no se podría hablar de una hoja continua. Si cada átomo estuviese separado de sus vecinos varios centímetros, por ejemplo, podríamos pasar la mano a través de la «hoja» sin tocar el oro. Del mismo modo, existe una última partícula o «átomo» de luz: el *fotón*. Cada destello de luz percibido por la rana es un fotón que

incide en su retina. Lo que sucede realmente cuando un rayo de luz se atenúa no es que los fotones se debiliten, sino que se distancian y aumenta el espacio vacío entre ellos (figura 2.2). Cuando un rayo es muy débil, puede resultar engañoso denominarlo «rayo», puesto que ya no es continuo. En los períodos en que la rana no ve nada, no es que la luz que llega a sus ojos sea demasiado débil para estimular su retina, sino que no reciben ningún estímulo luminoso.

Esta propiedad de presentarse sólo en «paquetes» de dimensiones discretas se denomina *cuantificación*. Un «paquete» individual —como un fotón— se llama *cuanto*. La teoría cuántica recibe su nombre de esta propiedad, que atribuye a toda magnitud física mensurable y no sólo a aquellas cosas, como la cantidad de luz o la masa de oro, que son cuantificadas porque las entidades concernidas, aunque aparentemente continuas, están en realidad formadas por partículas. Incluso para magnitudes como la distancia (por ejemplo, entre dos átomos), la idea de un intervalo continuo de valores posibles es una idealización. En física no hay cantidades mensurables continuas. Hay infinidad de fenómenos sorprendentes en física cuántica, y comparada con ellos, como veremos, la cuantificación es uno de los menos espectaculares. No obstante, en cierto sentido sigue siendo la clave para los demás, puesto que, si todo es cuantificado, ¿cómo cambia una magnitud de un valor a otro? ¿Cómo va un objeto de un *lugar* a otro, si no existe un intervalo de lugares intermedios por los que pasa mientras está de camino? Lo explicaré en el capítulo 9, así que dejaremos de lado esta cuestión por el momento y volveremos a las inmediaciones de la linterna, donde el rayo nos parece continuo porque cada se-

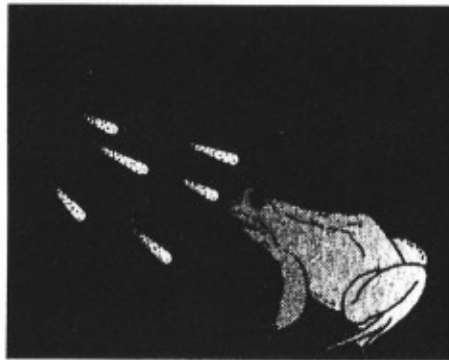


FIGURA 2.2. Las ranas pueden ver los fotones individuales.

gundo emite unos 10^{14} (cien billones) de fotones hacia el ojo del observador.

¿Está la frontera entre luz y sombra netamente definida, o existe una zona gris? Normalmente, hay una zona gris bastante amplia, y una de sus causas se muestra en la figura 2.3. Existe una zona oscura (la *sombra*) allí donde no puede llegar la luz que emite el filamento. Hay también una zona iluminada, adonde llega la luz desde cualquier parte del filamento. Y, como éste no es un punto geométrico, sino que tiene un tamaño determinado, existe una zona intermedia entre la luz y la sombra, adonde sólo llega la luz de algunas partes del filamento (la *penumbra*). Un observador situado dentro de la zona de penumbra vería únicamente parte del filamento y notaría que la iluminación era allí menos intensa que en la zona que recibe toda la intensidad de la luz.

Sin embargo, el tamaño del filamento no es la única razón por la que las linternas reales proyectan zonas de penumbra. La luz se ve afectada por muchísimas circunstancias: el reflector situado tras la bombilla, el cristal que hay frente a ella, grietas e imperfecciones, etcétera. De modo que podemos esperar de una linterna real una configuración realmente complicada de luz y sombra a causa de su propia complejidad. Pero las propiedades incidentales de las linternas no constituyen el objeto de estos experimentos. Tras la cuestión de la

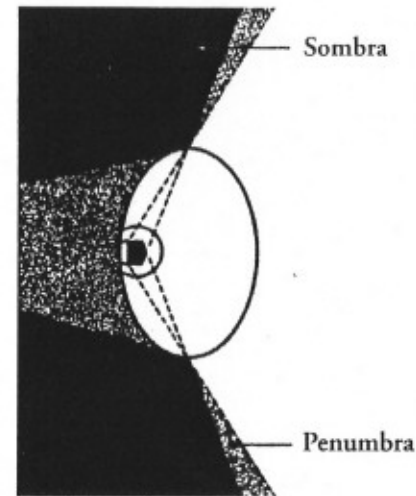


FIGURA 2.3. La sombra y la penumbra de una sombra.

luz de la linterna hay otra, más fundamental sobre la luz en general: ¿existe, en principio, algún límite para la nitidez de la sombra (en otras palabras, para la mayor o menor anchura de la penumbra)? Si, por ejemplo, la linterna estuviese construida con un material perfectamente negro (por tanto, no reflectante) y utilizásemos filamentos cada vez más pequeños, ¿podríamos reducir la zona de penumbra de un modo ilimitado?

La figura 2.3 induce a pensar que sí. Si el filamento careciese de dimensión, no habría penumbra. Pero al dibujarla he dado por sentado que la luz viaja únicamente en línea recta. La experiencia cotidiana nos indica que así es, ya que no podemos ver al otro de los ángulos, pero complejos experimentos demuestran que no siempre es cierto. En determinadas circunstancias, la luz se curva.

Esto resulta difícil de demostrar sólo con una linterna, ya que no es fácil conseguir filamentos minúsculos y superficies muy negras. Estas dificultades de orden práctico obstaculizan la plena comprensión de los límites que la física fundamental impone a la nitidez de las sombras. Afortunadamente, la curvatura de la luz puede ser también demostrada de otro modo. Supongamos que la luz de nuestra linterna pasa por dos pequeños orificios practicados en sendas pantallas opacas consecutivas —como ilustra la figura 2.4— y que la luz emergente es proyectada sobre una tercera pantalla. La cuestión es: si este experimento se repite con orificios cada vez más pequeños y aumentando progresivamente la distancia entre las dos primeras pantallas, ¿podremos acercar cada vez más, de modo ilimitado, la sombra (la zona de

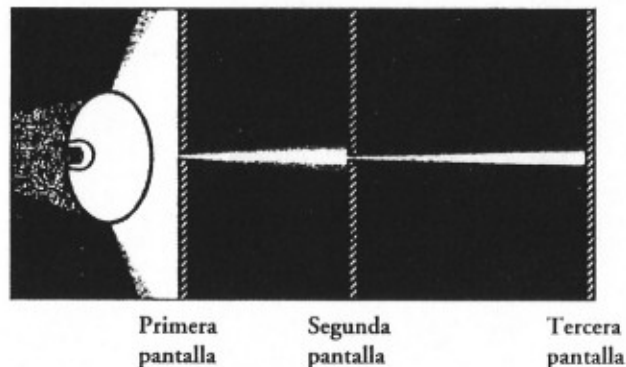


FIGURA 2.4. Estrechamiento del haz de luz al pasar por dos orificios sucesivos.

oscuridad total) a la línea recta que pasa por el centro de los dos orificios? ¿Puede la región iluminada entre la segunda y la tercera pantallas quedar confinada en un cono arbitrariamente estrecho? En la terminología de los orificios, estamos preguntándonos «cuán *dúctil* es la luz», cuán fino podemos llegar a hacer uno de sus rayos. El oro puede ser reducido a hebras de una diezmilésima de milímetro de espesor.

¡Resulta que la luz no es tan dúctil como el oro! Mucho antes de que los orificios se reduzcan a un diámetro de una diezmilésima de milímetro —de hecho, con orificios «anchísimos», de aproximadamente un milímetro de diámetro—, la luz empieza a rebelarse de modo notable. En lugar de pasar por ellos en línea recta, se resiste al confinamiento y se esparce después de cada orificio; y, al esparcirse, se «deshilacha». Cuanto más pequeño es el orificio, más se esparce la luz y se desvía del camino recto. Aparecen intrincadas conformaciones de luz y sombra. Sobre la tercera pantalla ya no vemos únicamente una zona iluminada y otra oscura, separadas por una penumbra, sino círculos concéntricos de anchura y brillo variables. Y también hay color, puesto que la luz blanca consiste en una mezcla de fotones de distintos colores. Cada color se esparce y «deshilacha» siguiendo conformaciones ligeramente distintas. La figura 2.5 muestra una conformación típica de los colores producidos sobre la tercera pantalla por una luz blanca, tras pasar por los orificios de las dos primeras. Recordemos que lo único que estamos viendo es la proyección de una sombra. La figura 2.5 no es más que la sombra que proyectaría la segunda pantalla de la figura 2.4. Si la luz viajase únicamente en línea recta, no veríamos más que un minúsculo punto blanco (mucho más pequeño que el manchón brillante central de la figura 2.5), rodeado por una penumbra muy estrecha. El resto sería pura sombra, oscuridad total.

Por sorprendente que pueda resultar el que los rayos de luz se curven tras atravesar pequeños orificios, no se trata de algo, en mi opinión, fundamentalmente desconcertante. En todo caso, lo que nos importa para nuestro propósito es que lo hacen, lo cual implica que las sombras no tienen por qué parecer necesariamente siluetas de los objetos que las proyectan. Y, lo que es más, este fenómeno no es, simplemente, un emborronamiento debido a la penumbra. En efecto, un obstáculo con una intrincada serie de orificios puede proyectar una sombra de una conformación enteramente distinta.

La figura 2.6 muestra, aproximadamente en tamaño real, parte de la conformación de sombras proyectada a tres metros por dos ra-

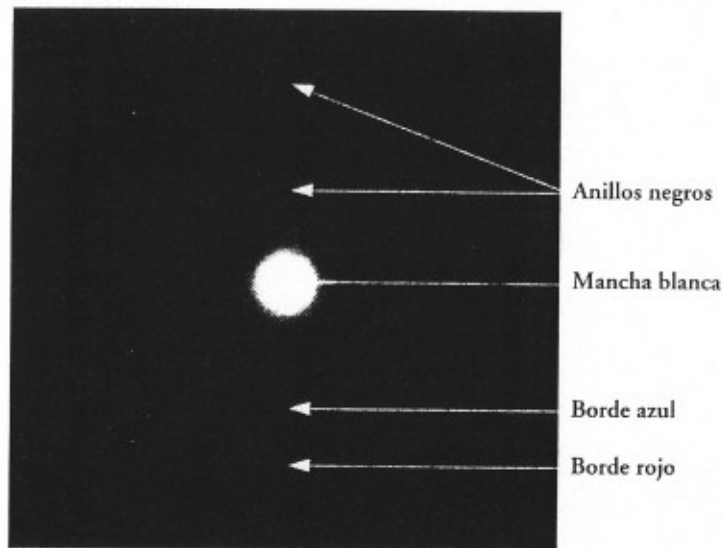


FIGURA 2.5. Conformación de luz y sombra que muestra la luz blanca tras pasar por un pequeño orificio circular.

nuras rectilíneas paralelas practicadas en una barrera opaca. Las ranuras están distanciadas dos décimas de milímetro e iluminadas por un haz de lados paralelos de luz roja pura procedente de un láser situado al otro lado de la barrera. ¿Por qué luz de un láser y no de una linterna? Sólo porque la forma precisa de una sombra depende también del color de la luz que la proyecta; la luz blanca, como la producida por una linterna, contiene una mezcla de todos los colores visibles, de modo que puede proyectar sombras con bordes multicolores. Por consiguiente, en los experimentos sobre la forma precisa de las sombras resulta aconsejable la utilización de luz de un solo color. Podríamos colocar un filtro de color (un cristal coloreado, por ejemplo) delante de la linterna de modo que sólo pudiese pasar la luz de dicho

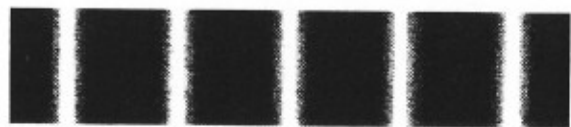


FIGURA 2.6. Sombra proyectada por una barrera que contiene dos ranuras rectas paralelas.

color. Sería una mejora, pero los filtros no son lo suficientemente selectivos. La luz de un láser constituye un método mejor, ya que puede ser regulada de manera muy exacta a fin de que emita sólo luz del color que deseamos, prácticamente sin la presencia de ningún otro.

Si la luz viajara en línea recta, el patrón de la figura 2.6 consistiría, simplemente, en un par de brillantes bandas separadas dos décimas de milímetro (espacio demasiado reducido para poder ser apreciado a simple vista a esta escala), con bordes netos y el resto de la pantalla en sombra. Pero, en realidad, la luz se curva de tal modo que produce varias bandas brillantes y oscuras y ningún borde neto. Si separamos las ranuras manteniéndolas dentro del haz del láser, la conformación de las bandas se desplazará en la misma proporción. En este aspecto, se comporta exactamente igual que una sombra corriente de gran escala. Ahora bien, ¿qué ocurre si intercalamos otras dos ranuras equidistantes, de modo que tengamos cuatro ranuras rectilíneas paralelas, a intervalos de una décima de milímetro? Cabría esperar que la conformación se pareciera casi exactamente a la de la figura 2.6. Después de todo, el primer par de ranuras proyecta por sí mismo las sombras de dicha figura y, como he dicho, el segundo par, por sí mismo, proyectaría la misma conformación, sólo que desplazada una décima de milímetro hacia un lado, casi sobre el mismo sitio. Sabemos también que los haces de luz se cruzan sin afectarse. De modo que los dos pares de ranuras juntos deberían, en principio, producir esencialmente la misma conformación, aunque con un brillo doble y algo más borrosa.

En realidad, sin embargo, no ocurre nada de eso. La forma real de la sombra de una barrera con cuatro ranuras rectilíneas paralelas, a intervalos de una décima de milímetro, se muestra en la figura 2.7 a). A efectos de comparación, he repetido bajo ella, en la imagen b), la correspondiente a las dos ranuras rectilíneas paralelas a dos décimas de milímetro de separación. Es evidente que la sombra de las cuatro ranuras no es la combinación ligeramente desplazada proyectada por dos juegos de ranuras paralelas, sino que presenta una conformación nueva y más intrincada. En ella existen lugares, como el señalado con una X, oscuros en la conformación de cuatro ranuras, pero iluminados en la de dos. Estos lugares estaban iluminados cuando había sólo dos ranuras en la barrera, pero *pasaron a ser oscuros* cuando practicamos un segundo par de ranuras para el paso de la luz. La apertura de estas nuevas ranuras ha *interferido* la luz que llegaba previamente a X.

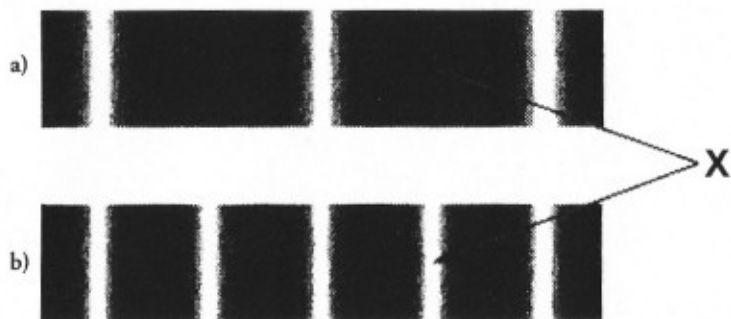


FIGURA 2.7. Sombras proyectadas por las barreras según las ranuras rectas y paralelas que contengan: a) cuatro ranuras; b) dos ranuras.

Así pues, añadir dos fuentes de luz provoca el oscurecimiento del punto X, mientras que eliminarlas lo ilumina de nuevo. ¿Cuál es la causa? Una posible explicación es que dos fotones se dirijan hacia X y reboten el uno en el otro como bolas de billar. Solo, cada fotón llegaría a X, pero al juntarse se interfieren y van a parar a otra parte. Demostraré en breve que esta explicación no puede ser cierta. Sin embargo, la idea básica que la inspira es incontrovertible: *algo* debe proceder del nuevo par de ranuras que impide que la luz del primero alcance el punto X. Pero ¿qué es? Lo podemos averiguar con la ayuda de algunos experimentos más.

En primer lugar, la conformación proyectada por las cuatro ranuras de la figura 2.7 a) aparece únicamente si todas ellas están iluminadas por el láser. Si sólo dos lo están, se proyecta la correspondiente a dos ranuras. Si se iluminan tres, aparece una nueva configuración, distinta de las anteriores. De modo que lo que causa la interferencia tiene que estar en el haz de luz. La conformación de dos ranuras aparece de nuevo si obstruimos dos de las cuatro con algo opaco, pero no si colocamos algo transparente. Dicho de otro modo, lo que interfiere queda anulado por cualquier cosa capaz de obstruir el paso de la luz, incluso algo tan insustancial como la niebla. Sin embargo, puede penetrar cualquier cosa que deje pasar la luz, incluso algo tan impenetrable (a la materia) como el diamante. Aunque introduzcamos en el aparato complicados sistemas de espejos y lentes, mientras la luz pueda viajar desde las ranuras a cualquier punto de la pantalla, lo que observaremos en éste será una parte de la conformación que corresponde a las cuatro ranuras. Si luz proveniente de dos ranuras incide

en algún punto de la pantalla, lo que veremos allí será parte de la conformación correspondiente a dos ranuras, y así sucesivamente.

Por consiguiente, lo que causa la interferencia se comporta como la luz. Se encuentra en todas partes en el haz de luz y en ningún lugar fuera de él. Es reflejado, transmitido o bloqueado por todo aquello capaz de reflejar, transmitir o bloquear la luz. Se estarán preguntando por qué insisto tanto en este punto. Es, sin duda, obvio que se trata de *luz*; es decir, lo que interfiere los fotones que salen de cada ranura son los que salen de las demás. Pero quizás se inclinarán a dudar de lo evidente tras el próximo experimento, el que culmina la serie.

¿Qué cabe esperar si realizamos estos experimentos *con un solo fotón cada vez*? Supongamos, por ejemplo, que colocamos la linterna tan lejos que sólo un fotón al día alcanza la pantalla. ¿Qué percibiría la rana si observara la luz desde la pantalla? Si es cierto que lo que interfiere los fotones son otros fotones, ¿no debería esta interferencia reducirse al disminuir el número de fotones? ¿No debería cesar completamente cuando circula un solo fotón por el aparato? Cabría esperar penumbras, ya que el fotón podría cambiar de trayectoria si chocara tangencialmente en el borde de una ranura. Pero, sin duda, lo que no podríamos observar nunca en la pantalla sería un lugar como X, que recibe fotones cuando están abiertas dos ranuras, pero se *queda a oscuras* al abrir dos más.

Sin embargo, esto es exactamente lo que observamos. Por más escasos que sean los fotones, la conformación de sombras sigue siendo la misma. Incluso cuando se realizan experimentos sucesivos con un solo fotón, éste no llega jamás a X con las cuatro ranuras abiertas, mientras que se reanuda el parpadeo sobre X si cerramos dos de ellas.

¿Podría ocurrir que el fotón se dividiese en fragmentos que, tras pasar por las ranuras, cambiasen de dirección y se reagrupasen? Podemos también descartar esta posibilidad. Si, una vez más, hacemos circular un fotón por el aparato, pero esta vez utilizando cuatro detectores, uno para cada ranura, en todos los casos sólo uno de ellos registra algo. Puesto que en dicho experimento nunca observamos que dos detectores se activen a la vez, podemos afirmar que lo que detectan no se fracciona.

De modo que, si los fotones no se dividen en fragmentos y no son desviados por otros fotones, ¿qué los desvía? Cuando un solo fotón circula por el aparato, ¿qué puede salir de las otras ranuras capaz de interferirlo?

Resumámoslo. Hemos encontrado que cuando un fotón circula por el aparato:

- pasa por una de las ranuras, luego algo lo interfiere y lo desvía de un modo que depende de cuáles de las demás ranuras estén abiertas;
- lo que interfiere al fotón ha pasado por algunas de las otras ranuras;
- lo que interfiere al fotón se comporta exactamente como un fotón...
- ... sólo que no puede ser visto.

A partir de ahora denominaré «fotones» a lo que causa las interferencias. Es lo que son. Así pues, ahora parece haber dos clases de fotones, a los que llamaré, temporalmente, fotones *tangibles* y fotones *fantasmas*. Los fotones tangibles son los que podemos ver o detectar con instrumentos, mientras que los fantasmas son intangibles (invisibles) y sólo es posible detectarlos indirectamente por sus efectos de interferencia sobre aquéllos. (Veremos más adelante que no existe diferencia intrínseca entre unos y otros: cada fotón es tangible en un universo y fantasma en todos los demás universos paralelos. Pero más vale que avance paso a paso en mi exposición.) Lo único que hemos inferido hasta aquí es que cada fotón tangible va acompañado por un séquito de fotones fantasmas, y que mientras un fotón tangible pasa por una de las cuatro ranuras un número variable de fotones fantasmas lo hace por las otras tres. Puesto que aparecen distintas conformaciones de interferencias si abrimos ranuras en otros lugares de la barrera —siempre que estén dentro del haz de luz—, cada vez que un fotón tangible llega a la parte iluminada de la barrera, debe ir acompañado por un número variable de fotones fantasmas. Por lo tanto, hay más fotones fantasmas que tangibles. ¿Cuántos? La experimentación no nos puede concretar su número máximo, pero sí un mínimo aproximado. En el laboratorio, la superficie máxima que podemos iluminar convenientemente es de un metro cuadrado, mientras que la dimensión mínima manejable para el diámetro de un orificio es de una milésima de milímetro, así que tenemos aproximadamente 10^{12} (un billón) de posibles posiciones para un orificio de una milésima de milímetro de diámetro en una barrera de un metro cuadrado de superficie. Por lo tanto, un mínimo de un billón de fotones fantasmas acompaña a cada fotón tangible.

Hemos deducido, pues, la existencia de un mundo prodigiosamente numeroso, complicado y oculto, de fotones fantasmas. Viajan a la velocidad de la luz, rebotan en los espejos, son refractados por las lentes y son detenidos por las barreras opacas y los filtros del color adecuado. Sin embargo, no activan los detectores más sensibles. En el universo, lo único que permite observar la existencia de los fotones fantasmas son las alteraciones que causan en la trayectoria de los fotones tangibles mediante el fenómeno de la interferencia. Los fotones fantasmas pasarían completamente inadvertidos de no ser por este fenómeno y por las sorprendentes conformaciones de sombras que provoca.

La interferencia no es una propiedad exclusiva de los fotones. La teoría cuántica predice, y lo confirma la experimentación, que se da en toda clase de partículas. Deben existir, pues, infinidad de neutrones fantasmas que acompañan a cada neutrón tangible, miríadas de electrones fantasmas por cada electrón tangible, y así sucesivamente. Las partículas fantasmas sólo son detectables indirectamente, por su interferencia con el movimiento de sus homólogos tangibles.

Se deduce, pues, que la realidad es mucho mayor de lo que parece, y que en su mayor parte es invisible. Los objetos y sucesos que nuestros sentidos y nuestros instrumentos pueden observar de manera directa no son más que la punta del iceberg.

Ahora bien, las partículas tangibles tiene una propiedad que nos autoriza a denominarlas, colectivamente, *universo*. No es otra que su propiedad definitoria de ser tangibles, es decir, de interactuar unas con otras y, por lo tanto, ser directamente detectables por instrumentos y órganos sensoriales formados por otras partículas tangibles. A causa de los fenómenos de interferencia, no están *completamente* aisladas del resto de la realidad (es decir, de las partículas fantasmas). Si lo estuviesen, nunca habríamos descubierto que la realidad va mucho más allá de las partículas tangibles. Las partículas tangibles forman el universo que observamos a nuestro alrededor en nuestra vida cotidiana, así como el universo descrito por la física clásica o precuántica.

Por razones similares, podríamos pensar en denominar a las partículas fantasmas, colectivamente, *universo paralelo*, puesto que también son afectadas por las partículas tangibles únicamente a través de los fenómenos de interferencia. Pero podemos hacer algo mejor. Y es que resulta que las partículas fantasmas están separadas entre sí del mismo modo que el universo de las partículas tangibles lo está de ellas. Dicho de otro modo, no forman un único y homogéneo uni-

verso paralelo, infinitamente mayor que el tangible, sino, más bien, un enorme número de universos paralelos, cada uno de los cuales se asemeja en su composición al tangible y obedece a las mismas leyes de la física, pero que se diferencian porque sus partículas están en distintas posiciones en cada universo.

Una observación sobre la terminología. La palabra «universo» se ha usado tradicionalmente para significar «toda la realidad física». En este sentido, sólo puede existir un universo. Podríamos mantener esta definición y decir que la entidad que estamos acostumbrados a definir como «el universo» —es decir, toda la materia y la energía directamente perceptibles que nos rodean, así como el espacio— no es más que una mínima parte del verdadero universo. Deberíamos entonces inventar un nuevo nombre para esta pequeña porción tangible. Pero la mayoría de los físicos prefieren seguir utilizando la palabra «universo» para denominar a la entidad de siempre, aun cuando ésta resulte ser ahora sólo una pequeña porción de la realidad física. Un nuevo término, *multiverso*, ha sido acuñado para denominar la totalidad de la realidad física.

Los experimentos de interferencia con una sola partícula, como los que he descrito, nos demuestran que el multiverso existe y que contiene múltiples partículas fantasmas que son la contrapartida de las partículas del universo tangible. Para ir aún más allá, y llegar a la conclusión de que el multiverso está dividido en una especie de universos paralelos, debemos considerar los fenómenos de interferencia que afectan a más de una partícula tangible. El modo más simple de hacerlo consiste en preguntarnos, a modo de «experimento mental», qué debe de ocurrir a nivel microscópico cuando los fotones fantasmas chocan con un objeto opaco. Son detenidos, desde luego. Lo sabemos porque la interferencia cesa cuando bloqueamos el paso de los fotones fantasmas colocando un obstáculo opaco. Pero ¿por qué? ¿Qué los detiene? Podemos descartar la respuesta que parece más evidente: que son absorbidos —como lo serían los fotones tangibles— por los átomos tangibles de la barrera. En primer lugar, porque sabemos que los fotones fantasmas no interactúan con átomos tangibles. Y, en segundo lugar, porque podemos verificar, mediante la medición de los átomos en la barrera (o, más exactamente, reemplazándola por un detector), que éstos ni absorben energía ni cambian de estado en lo más mínimo a menos que reciban el impacto de fotones tangibles. Los fotones fantasmas carecen, pues, de efecto sobre ellos.

En otras palabras, los fotones fantasmas y los tangibles se ven

afectados por igual cuando alcanzan una determinada barrera, pero ésta no se ve afectada del mismo modo por las dos clases de fotones. De hecho, de acuerdo con nuestros conocimientos actuales, la barrera no se ve afectada en lo más mínimo por los fotones fantasmas. Ésta es, ciertamente, la propiedad definitoria de los fotones fantasmas, ya que si algún material fuese afectado por ellos de un modo susceptible de ser observado, dicho material podría ser utilizado como detector de fotones fantasmas y todo el fenómeno de sombras e interferencia sería distinto de como lo he descrito.

Existe, por lo tanto, alguna clase de barrera fantasma en el mismo lugar que la barrera tangible. No hace falta un gran esfuerzo de imaginación para concluir que dicha barrera no puede estar constituida más que por *átomos fantasmas*, que sabemos que deben existir como contrapartida de los átomos tangibles en la barrera. Hay presentes muchos de ellos por cada átomo tangible. En realidad, la densidad total de átomos fantasmas en la niebla más ligera es tal, que bastaría para detener a un carro de combate, y no digamos a un fotón, *si, u-diesen* afectarlos. Del hecho de que, como hemos visto, las barreras parcialmente transparentes tengan el mismo grado de transparencia para los fotones fantasmas que para los tangibles se sigue que no todos los átomos fantasmas que se interponen en el camino de un determinado fotón fantasma se ven implicados a la hora de bloquearle el paso. Cada fotón fantasma se encuentra con una clase de barrera muy parecida a aquella con la que se enfrenta su contrapartida tangible, la cual consiste únicamente en una pequeña proporción de todos los átomos fantasmas presentes.

Por la misma razón, cada átomo fantasma de la barrera sólo puede interactuar con una pequeña proporción de los átomos fantasmas que se encuentran cerca de él, con los que forma una barrera muy parecida a la tangible, y así sucesivamente. Toda la materia, y todos los procesos físicos, tienen esta estructura. Si la barrera tangible es la retina de la rana, allí debe haber múltiples retinas fantasmas, cada una de ellas capaz de detener únicamente una de las contrapartidas de cada fotón. Cada retina fantasma interactúa tan sólo con los correspondientes fotones fantasmas y la correspondiente rana fantasma, y así sucesivamente. En otras palabras, las partículas están agrupadas en universos paralelos. Son «paralelos» en el sentido de que dentro de cada universo las partículas interactúan entre sí como en el universo tangible, mientras que cada universo sólo afecta a los demás ligeramente, mediante los fenómenos de interferencia.

Hemos llegado así a la conclusión de la cadena de razonamientos que empieza con sombras de extrañas conformaciones y acaba con universos paralelos. Cada paso nos adentra en la comprobación de que el comportamiento de los objetos que observamos sólo puede ser explicado por la existencia de objetos presentes no observables, dotados de determinadas propiedades. El núcleo del argumento es que los fenómenos de interferencia de partículas aisladas descartan inequívocamente la posibilidad de que el universo tangible que nos rodea sea todo cuanto existe. No hay discusión posible sobre el hecho de que dichos fenómenos de interferencia ocurren, y, sin embargo, la existencia del multiverso es aún un punto de vista minoritario entre los físicos. ¿Por qué?

La respuesta, lamento decirlo, no habla mucho en favor de la mayoría. Hablaré más extensamente acerca de este tema en el capítulo 13, pero, de momento, permítaseme señalar que los argumentos que he expuesto en el presente capítulo son convincentes sólo para quienes buscan explicaciones. Aquellos que se contentan con meras predicciones y carecen de un fuerte deseo de comprender cómo llegan a producirse los resultados predichos para los experimentos pueden, si lo desean, negar, simplemente, la existencia de todo lo que no sean las entidades que hemos denominado «tangibles». Hay quienes, como los instrumentalistas y los positivistas, adoptan esta actitud por fidelidad a unos principios filosóficos. He expuesto ya lo que pienso de esos principios y por qué. Otros, simplemente, no quieren pensar en ello. Después de todo, es una conclusión tan *amplia*, que puede resultar turbadora al principio. Creo, sin embargo, que cometen un error. Espero tener éxito y convencer a los lectores que me acompañen de que la comprensión del multiverso es condición previa para comprender la realidad del mejor modo posible. No lo digo imbuido de un espíritu de sombría determinación de buscar la verdad por más desagradable que sea (si bien creo que ésta sería la actitud que adoptaría si no tuviera más remedio), sino, muy al contrario, porque la concepción del mundo resultante está mucho más integrada y es mucho más sensata, en infinidad de aspectos, que cualquiera de las precedentes y, ciertamente, que el cínico pragmatismo que demasiado a menudo sirve hoy como sustituto de una concepción del mundo para ciertos científicos.

«¿Por qué no podemos decir, simplemente», preguntan algunos físicos pragmáticos, «que los fotones se comportan *como si* interactuasen con entidades invisibles? ¿Por qué no dejamos las cosas así? ¿Por

qué debemos tomar partido acerca de si esas entidades existen realmente?» Una variante más exótica de lo que es, en esencia, la misma idea es la siguiente: «Un fotón tangible es real; un fotón fantasma no es más que una forma en que el fotón real hubiese podido actuar, pero no lo hizo. Por consiguiente, la teoría cuántica trata de la *interacción de lo real con lo posible*.» Esto último, al menos, suena razonablemente profundo. Pero, por desgracia, quienes adoptan cualquiera de esas dos posturas —incluyendo algunos científicos que deberían estar mejor informados—, derivan invariablemente hacia la palabrería vana a partir de esas tomas de posición. Mantengamos, pues, la calma. El factor clave no es otro que el hecho de que un fotón real, tangible, *se comporta de diversas maneras* en función de qué caminos estén abiertos en el aparato para que pueda circular por ellos algo que lo interfiera. Algo circula por esos caminos, y resistirse a considerarlo «real» es un mero juego de palabras. «Lo posible» no puede interactuar con lo real: las entidades inexistentes no pueden desviar a las reales de su camino. Si un fotón es desviado, debe serlo por algo, algo que yo denomino «fotón fantasma». Atribuirle un nombre no lo convierte en real, pero de ningún modo puede ser cierto que un hecho real, tal como la llegada y detección de un fotón real, sea causado por un suceso imaginario, por algo que dicho fotón «hubiese podido hacer», pero no hizo. Sólo lo que sucede realmente puede hacer que otras cosas sucedan realmente. Si el complejo movimiento de los fotones fantasmas en un experimento de interferencia fuese una mera posibilidad que no se ha hecho realidad, los fenómenos de interferencia que observamos no habrían llegado a producirse realmente.

La razón de que los fenómenos de interferencia sean tan débiles y difíciles de detectar la hallamos en las leyes cuántico-mecánicas que los rigen. Dos implicaciones de esas leyes, en particular, resultan relevantes. En primer lugar, cada partícula subatómica tiene contrapartidas en otros universos y es interferida únicamente por éstas. No se ve, pues, afectada por ninguna otra partícula de dichos universos. Por consiguiente, la interferencia sólo puede ser observada en situaciones concretas en que los caminos de una partícula y sus contrapartidas fantasmas se separan para converger después (como cuando un fotón y un fotón fantasma se dirigen hacia el mismo punto de la pantalla). Incluso la coincidencia temporal debe ser la adecuada: si en uno de los caminos se produce un retraso, la interferencia será de menor intensidad o no llegará a ocurrir. En segundo lugar, la detección de interferencias entre dos universos cualesquiera requiere que interactúen

todas las partículas cuyas posiciones y demás atributos no sean idénticos en dichos universos. En la práctica, ello significa que sólo la interferencia entre universos muy parecidos es lo suficientemente fuerte para ser detectada. En los experimentos que he descrito, por ejemplo, los universos que se interfieren sólo difieren en la posición de un fotón. Si un fotón afecta en sus viajes a otras partículas, y, en particular, si es observado, tanto esas partículas como el observador serán diferentes en otros universos distintos. De ahí que las subsiguientes interferencias relacionadas con dicho fotón sean imposibles de detectar en la práctica, puesto que la necesaria interacción entre todas las partículas afectadas resulta demasiado compleja para que sea factible observarla. Debo señalar aquí que la frase habitual para describir este hecho, es decir, que «la observación destruye la interferencia», resulta extremadamente engañosa en tres sentidos. En primer lugar, porque sugiere alguna especie de efecto psicocinético del «observador» sobre fenómenos físicos elementales, efecto que, en realidad, no existe. En segundo lugar, porque la interferencia no es «destruida»: simplemente, resulta muy difícil de observar, puesto que hacerlo requiere controlar el comportamiento preciso de muchas más partículas. Y, en tercer lugar, porque no es únicamente la «observación», sino cualquier efecto del fotón sobre su entorno, lo que dependerá de qué camino haya tomado éste.

Para facilitar las cosas a aquellos lectores que conozcan otros trabajos sobre física cuántica, debo referirme brevemente al argumento que he presentado en este capítulo y al modo en que el tema se plantea de modo habitual. Quizás porque el debate se inició entre físicos teóricos, su punto de partida tradicional ha sido la propia teoría cuántica. Se expone ésta del modo más cuidadoso posible, para tratar después de entender lo que nos dice sobre la realidad. Éste es el único planteamiento posible, si se desea comprender los más sutiles detalles de los fenómenos cuánticos. Pero resulta un planteamiento innecesariamente complicado en relación con la cuestión de si la realidad consiste en uno o varios universos. Por ello no lo he seguido en el presente capítulo. Ni siquiera he expuesto ninguno de los postulados de la teoría cuántica. He descrito, simplemente, algunos fenómenos físicos y sacado algunas conclusiones inevitables. Pero si queremos empezar por la teoría, nos encontraremos con dos cosas sobre las que hay acuerdo unánime. La primera es que la teoría cuántica no tiene rival en cuanto a capacidad para predecir los resultados de los experimentos, incluso si utilizamos sus ecuaciones ciegamente sin preocu-

arnos demasiado por lo que significan. La segunda es que la teoría cuántica nos dice algo nuevo e insólito sobre la naturaleza de la realidad. La disputa no estriba sólo en qué es, exactamente, lo que nos dice. El físico Hugh Everett fue el primero en comprender con claridad (en 1957, unos treinta años después de que se convirtiese en la base de la física subatómica) que la teoría cuántica describe un multiverso. Desde entonces, la discusión sobre si la teoría admite alguna otra interpretación (o reinterpretación, reformulación, modificación, etcétera) que describa un único universo, sin dejar por ello de predecir correctamente los resultados experimentales, no ha cesado de agudizarse. Dicho de otro modo: ¿nos obliga la aceptación de las predicciones que son fruto de la teoría cuántica a admitir la existencia de universos paralelos?

Me parece que tanto esta cuestión como el tono dominante en el debate subsiguiente están mal enfocados. Ciertamente, es lo correcto, y lo que cabe esperar de físicos teóricos como yo es dedicar grandes esfuerzos a tratar de comprender la estructura formal de la teoría cuántica, pero no a expensas de perder de vista nuestro objetivo primordial, que no es otro que la comprensión de la realidad. Incluso si las predicciones de la teoría cuántica pudiesen, de algún modo, ser hechas refiriéndose a un solo universo, los fotones seguirían proyectando sombras del modo que he descrito. Aun desconociéndolo todo sobre la teoría cuántica, resultaría evidente que esas sombras no pueden ser el resultado de ninguna única historia del fotón en su trayectoria desde la linterna hasta el ojo del observador. Resultan incompatibles con cualquier explicación únicamente en términos de los fotones que podemos ver. O únicamente en términos de la barrera que podemos ver. O únicamente en términos del universo que podemos ver. Por consiguiente, incluso si la mejor teoría de que dispusieran los físicos no hiciese mención de universos paralelos, ello sólo significaría que necesitábamos una teoría mejor, una teoría que se refiriese a esos universos que no vemos para explicar lo que vemos.

Así pues, ¿nos obliga la aceptación de las predicciones fruto de la teoría cuántica a admitir la existencia de universos paralelos? No necesariamente. Siempre podremos reinterpretar cualquier teoría en clave instrumentalista, de modo que no nos obligue a aceptar nada sobre la realidad. Pero eso no resolvería el problema. Como he dicho, no necesitamos profundas teorías que nos confirmen la existencia de universos paralelos: los fenómenos de interferencia entre partículas

aisladas ya lo hacen. Las necesitamos para explicar y predecir dichos fenómenos: para que nos digan cómo son los demás universos, qué leyes obedecen, de qué modo se afectan unos a otros y cómo encaja todo ello con las bases teóricas de otras materias. Y esto es, precisamente, lo que hace la teoría cuántica. La teoría cuántica de los universos paralelos no es el problema, sino la solución. No se trata de una interpretación problemática y opcional, surgida de arcaicas consideraciones teóricas, sino de la explicación —la única sostenible— de una notable realidad que contradice cualquier intuición.

Hasta aquí he utilizado una terminología que sugiere que uno de los múltiples universos paralelos difiere de los demás por ser «tangible». Era algo temporal, y es tiempo ya de cortar esta última amarra con la concepción clásica, monouniversal, de la realidad. Volvamos a nuestra rana. Hemos visto ya que la historia de la rana que permanece sentada observando pacientemente la lejana linterna día tras día, a la espera de la llegada del destello cotidiano, no es toda la historia. Debe haber también ranas fantasmas en universos fantasmas, que coexistan con la tangible y esperen también la llegada de fotones. Supongamos que la rana ha sido adiestrada para saltar cuando ve un destello. Al principio del experimento, la rana tangible tendrá gran cantidad de contrapartidas fantasmas, todas inicialmente iguales, pero que poco después ya no lo serán. Ninguna de ellas tiene demasiadas probabilidades de ver inmediatamente un fotón. Pero lo que en un universo concreto es un acontecimiento aislado, se convierte en un suceso común en el multiverso, entendido como un todo. En cada instante, en algún lugar del multiverso, habrá unos pocos universos en los que un fotón incidirá en las retinas de las ranas de dichos universos, y, cuando eso suceda, las ranas saltarán.

¿Qué es, exactamente, lo que hace saltar a las ranas? En su universo, obedecen las mismas leyes de la física que las ranas tangibles. Un fotón fantasma correspondiente a su universo ha incidido en su retina fantasma. Una de las moléculas fantasmas sensibles a la luz de su retina fantasma ha respondido y ha experimentado una serie de complejos cambios químicos, a los que el nervio óptico fantasma ha respondido a su vez. Éste ha transmitido un mensaje al cerebro fantasma de la rana, la cual ha experimentado, en consecuencia, la sensación de percibir un destello.

¿O debería decir la sensación *fantasma* de percibir un destello? No, sin la menor duda. Si los observadores «fantasmas» —sean éstos ranas o personas— son reales, sus sensaciones deben ser igualmente

reales. Cuando observan lo que podríamos denominar un objeto fantasma, lo ven como tangible. Lo observan con los mismos medios y según la misma definición que aplicamos cuando decimos que el universo que observamos es «tangible». La tangibilidad es relativa para un determinado observador, de modo que, objetivamente, no hay dos clases de fotón, tangible y fantasma, ni dos clases de rana, ni de universo, uno tangible y el resto fantasma. No existe nada, en la descripción que he ofrecido acerca de la formación de sombras, o de los fenómenos relacionados, que implique distinción entre objetos «tangibles» y «fantasmas», aparte de la mera afirmación de que una de las copias es «tangible». Cuando introduje los conceptos de fotones tangibles y fotones fantasmas, parecía establecer distinciones entre ellos al afirmar que «nosotros» podemos ver los primeros, pero no los segundos. Pero ¿quiénes somos «nosotros»? Mientras lo escribía, miradas de David lo escribían a su vez. También ellos hacían una distinción entre fotones tangibles y fotones fantasmas, pero los fotones que para ellos son «fantasmas» incluyen los que para mí son «tangibles», mientras que los que ellos denominan «tangibles» están entre los que son «fantasmas» para mí.

Las copias de cualquier objeto no sólo carecen de posición alguna de privilegio en la explicación de las sombras que acabo de esbozar, sino de la más mínima preeminencia en la explicación matemática completa proporcionada por la teoría cuántica. Puedo pensar, subjetivamente, que me distingo de mis copias, y soy la única «tangible», porque que puedo percibirme de modo directo, y a ellas no, aunque debo hacerme a la idea de que todas ellas sienten lo mismo acerca de sí mismas.

Muchos de esos David están ahora mismo escribiendo estas palabras. Algunos expresan mejor estos pensamientos. Otros han ido por una taza de té.

TERMINOLOGÍA

Fotón. Partícula de luz.

Fotones tangibles y fotones fantasmas. Para facilitar la exposición, y sólo en este capítulo, denomino a las partículas de este universo *tangibles*, y a las de los demás, *fantasmas*.

Multiverso. Totalidad de la realidad física. Contiene múltiples universos.

Universos paralelos. Son «paralelos» en el sentido de que dentro de cada uno de ellos las partículas interactúan unas con otras del mismo modo que en el universo tangible, pero cada universo sólo afecta a los demás débilmente, mediante los fenómenos de interferencia.

Teoría cuántica. Teoría de la física del multiverso.

Cuantificación. Propiedad de poseer una serie de posibles valores discreta (más que continua). La teoría cuántica recibe este nombre porque enuncia que todas las cantidades mensurables poseen esta propiedad. Sin embargo, el efecto cuántico más notable no es la cuantificación, sino la interferencia.

Interferencia. Efecto de una partícula de un universo sobre su contrapartida de otro. La interferencia entre fotones es la responsable de que las sombras no se limiten a ser meras siluetas de los obstáculos que las producen y presenten mucho mayor complejidad.

SUMARIO

En los experimentos de interferencia se observa que hay lugares iluminados en una conformación de sombras que se oscurecen al practicar nuevas aberturas en la barrera que produce dichas sombras. Esto ocurre incluso cuando el experimento se realiza con partículas individuales. Una cadena de razonamientos basada en este hecho descarta la posibilidad de que el universo que percibimos a nuestro alrededor constituya la totalidad de la realidad. De hecho, la totalidad de la realidad física, el multiverso, contiene gran número de universos paralelos.

La física cuántica constituye una de las cuatro vías mayores de explicación. La siguiente es la epistemología, o teoría del conocimiento.

3. RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

No sé qué es más sorprendente, si el propio comportamiento de las sombras o el hecho de que la observación de algunas conformaciones de luz y sombra nos obligue a revisar tan radicalmente nuestra concepción de la estructura de la realidad. El argumento que he esbozado en el capítulo anterior es, independientemente de su controvertible conclusión, un ejemplo típico de razonamiento científico. Vale la pena reflexionar sobre el carácter de este razonamiento, que constituye por sí mismo un fenómeno natural tan sorprendente y lleno de implicaciones, por lo menos, como la física de las sombras.

A aquellos que preferirían atribuir a la realidad una estructura más prosaica, tal vez les parezca desproporcionado —e incluso injusto— que consecuencias tan trascendentales puedan seguirse del hecho de que un diminuto punto de luz sobre una pantalla se encuentre *aquí*, en vez de estar *allí*. Pero así es, y no se trata de la primera vez en la historia de la ciencia que ocurre algo semejante, ni mucho menos. A este respecto, el descubrimiento de otros universos recuerda mucho el de los planetas hecho por los primeros astrónomos. Antes de que mandásemos sondas a la Luna y a algunos planetas, *toda* nuestra información sobre estos últimos procedía de manchas de luz (y de otras radiaciones) cuya presencia era observada en lugares donde no se esperaba encontrarla. Consideremos cómo se descubrió el hecho fundamental y definitorio acerca de los planetas: el de que no son estrellas. Si miramos el cielo por la noche durante unas horas, observaremos que las estrellas parecen evolucionar alrededor de un determinado punto del espacio. Lo hacen rígidamente, manteniendo posiciones fijas entre sí. Según la explicación tradicional, el cielo nocturno estaba constituido por una enorme «esfera celestial» que giraba alrededor de una Tierra fija, y las estrellas eran, o bien agujeros en di-