

Borrado cuántico

En mecánica cuántica cada historia tiene dos caras,
pero sólo se puede ver una de ellas a la vez.
Los experimentos muestran que, al “borrar” una, aparece la otra

Stephen P. Walborn, Marcelo O. Terra Cunha, Sebastião Pádua y Carlos H. Monken

En 1801, Thomas Young, erudito caballero inglés, realizó uno de los experimentos más célebres de la historia de la física. He aquí cómo lo describió, dos años más tarde, en una conferencia ante la Regia Sociedad de Londres:

Hice un pequeño agujero en una contraventana y lo cubrí con un grueso trozo de papel que perforé con una aguja fina... Interpuse en el rayo de luz una tira de cartón de aproximadamente la decimotercera parte de una pulgada, y observé su sombra tanto en la pared como en otros cartones colocados a diferentes distancias.

Young no vio sobre la pared opuesta, como podría suponerse, una sombra delgada, sino toda una hilera de rayas o franjas equiespaciadas, claras y oscuras, con la banda central siempre brillante. Cuando bloqueaba la luz a un lado de la tira de cartón, las franjas desaparecían. Llegó a la conclusión de que hacía falta la luz procedente de ambos lados para obtener el patrón. Pero, ¿cómo podían combinarse dos rayos de luz para crear una franja oscura? ¿Por qué se encendía siempre el centro de la sombra y nunca quedaba oscuro? Si la luz se componía de partículas que viajaban siempre por rayos rectos, idea compartida por muchos, incluido Isaac Newton, no era fácil encontrarle una explicación.

Con su “tira de cartón”, Young puso en marcha una revolución de la física cuyos ecos todavía se sien-

ten hoy. En la actualidad, el suyo es un experimento básico en los laboratorios de los estudiantes de primer curso de física, aunque ahora se suele llevar a cabo perforando dos rendijas en un fragmento de opaco microfilm. (De ahí el nombre: “Experimento de la doble rendija de Young”). Puede llevarse a cabo fácilmente una demostración del fenómeno que observó, la *interferencia*, con olas en un depósito de agua. Por analogía, el experimento de Young parecía venir a demostrar que la luz se compone de ondas, como había defendido Christiaan Huygens. Pero la historia no acabó ahí.

A principios del siglo XX, se descubrió que la luz sí se comporta, en algunos aspectos, como si estuviera compuesta de partículas. En concreto, existe una “cantidad mínima”, un “cuanto”, de luz, el fotón. En 1909, Geoffrey Taylor repitió un experimento similar al de Young; demostró que los fotones individuales sufren otro fenómeno de interferencia, la *difracción*. Al atenuar la luz hasta que los fotones llegasen a la pantalla de uno en uno, eliminó cualquier posibilidad de que interfiriesen entre sí. Pero, tras apuntar los resultados de varios experimentos, Taylor se encontró con el mismo patrón de franjas de difracción. Daba la impresión de que un fotón podía “interferir consigo mismo”.

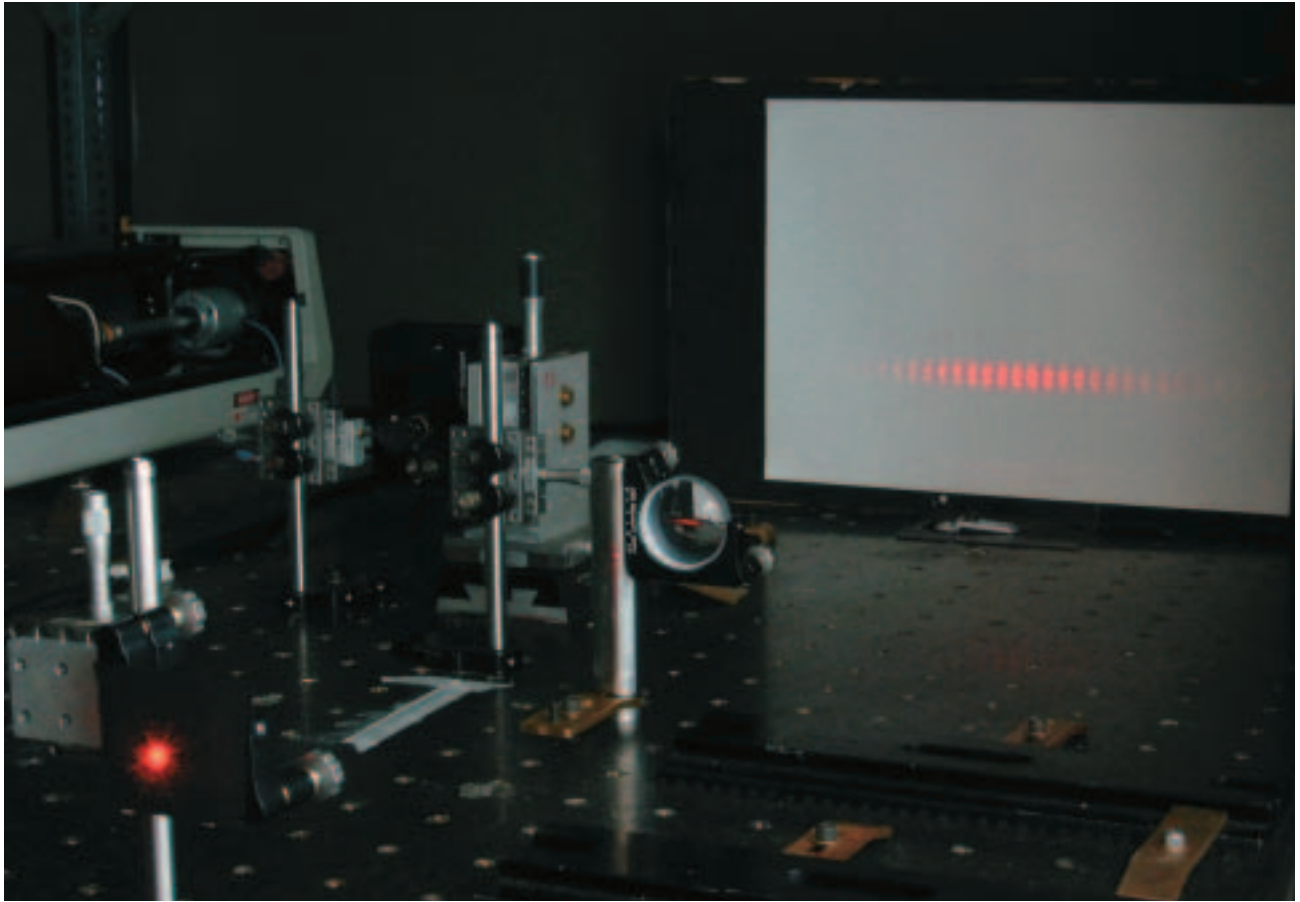
Y no sólo los fotones. Otros objetos que parecían indiscutiblemente “corpúsculares”, como los electrones, los neutrones e incluso las

moléculas del carbono 60, las buckybolitas, mostrarían el mismo comportamiento ondulatorio. La autointerferencia de las partículas constituye el mayor misterio de la física cuántica; Richard Feynman, premio Nobel, lo llamó “el *único* misterio” de la teoría cuántica.

En tiempos recientes se ha comenzado a arrojar algo de luz sobre este misterio mediante la realización experimental de borradores cuánticos. Permiten optar por la aparición o desaparición de las franjas de interferencia. Mediante una versión más elaborada del experimento de Young, nuestro grupo ha construido un borrador cuántico y lo ha utilizado para poner en práctica, en principio, la noción de “elección retardada”: la posibilidad de que quien lleva a cabo el experimento puede tomar la decisión correspondiente *después de que se haya detectado la partícula*. Un experimento de elección retardada evoca una suerte de alteración del pasado. Pero los borradores cuánticos no cambian la historia. Sí aclaran, en cambio, cómo surgen los fenómenos de interferencia en la física cuántica.

Tirar una moneda cuántica

Comprendemos bien por qué aparecen franjas de interferencia en el experimento clásico de la doble rendija. Según la teoría ondulatoria de la luz, cuando se encuen-



1. EN UNA VERSION MODERNA del experimento de la doble rendija de Thomas Young, un láser de helio-neón ilumina un fragmento de microfilm en el que hay perforadas dos rendijas con una separación de 0,1 milímetros. El rayo láser atraviesa una lente divergente (*en el centro*) que lo difumina, de manera que pueden verse con mayor claridad en la pantalla que hay detrás

las franjas de interferencia producidas por las dos rendijas. En su experimento de 1801, Young empleó un equipo mucho más modesto: luz solar, un agujerito para hacer coherente la luz, un trozo de cartón para dividir el rayo y ninguna lente divergente. Aun así, distinguió al menos cinco bandas brillantes en la pared opuesta.

tran dos rayos de luz coherente con la misma longitud de onda, se combinan. Las situaciones más extremas son la interferencia constructiva, donde las ondas se refuerzan mutuamente, o la interferencia destructiva, en la que se anulan totalmente la una a la otra.

En el experimento de Young no tienen por qué medir lo mismo los caminos entre un punto de observación determinado y cada rendija. Cuando sí son iguales (es decir, cuando el punto de observación se encuentra en un punto equidistante de ambas aperturas), las ondas llegan en fase e interfieren de manera constructiva. Esto explica por qué Young siempre veía una banda de luz en el centro de la “sombra” de su tira de cartón. A ambos lados de esta banda central se encuentran las regiones donde una onda ha tenido que viajar una longitud de onda más que la otra. Ahí, las ondas interfieren de manera destructiva y aparece una banda oscura. Después viene una región en

la que una onda viaja una longitud de onda más que la otra. Aquí vuelven a producirse una interferencia constructiva y una banda de luz.

Para entender por qué la interferencia cuántica constituye un fenómeno inesperado, podría ayudarnos la imagen de tirar una moneda al aire. Si la moneda no está trucada, la probabilidad de que salga cara es de un 50 %, y la de que salga cruz, otro 50 %. La probabilidad de que salga cara o cruz es la suma de ambas probabilidades:

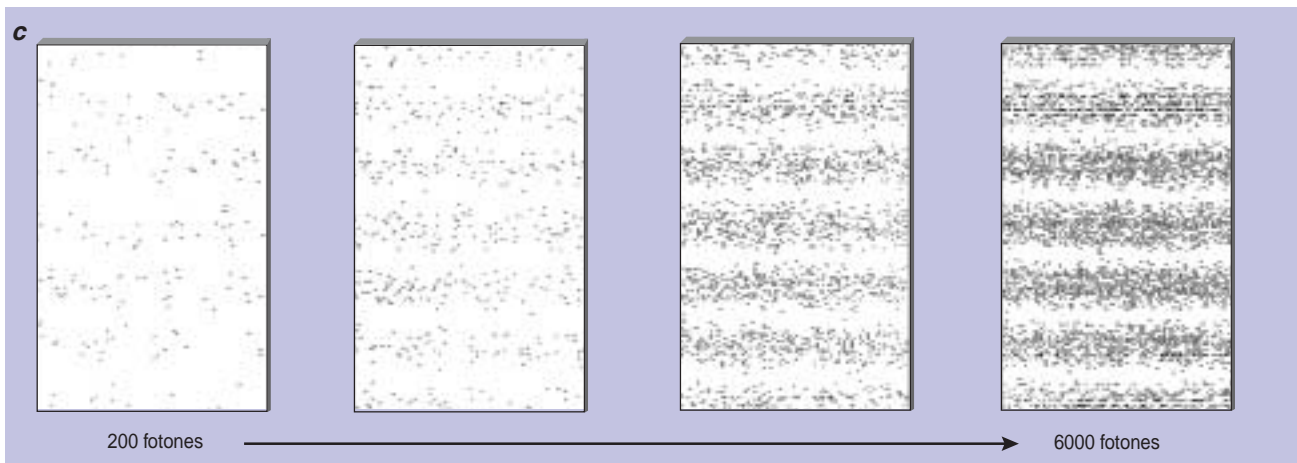
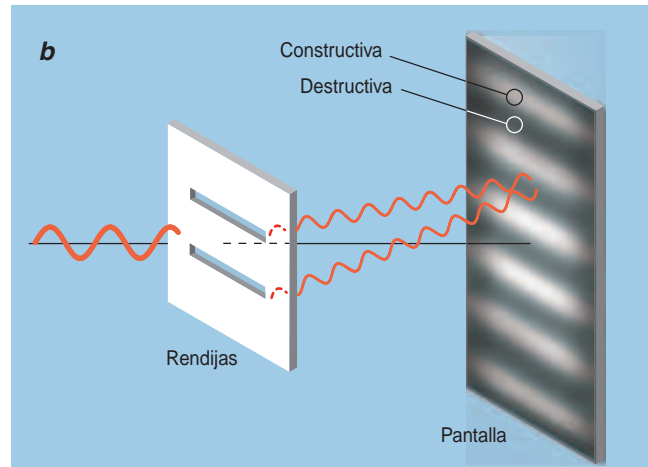
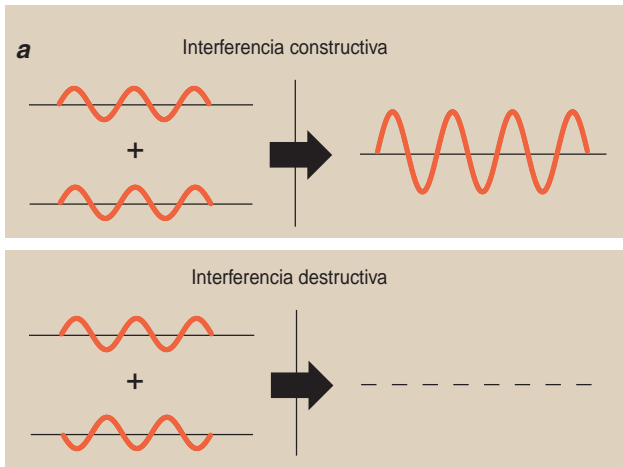
$$\text{Prob (cara o cruz)} = \text{Prob (cara)} + \text{Prob (cruz)} = 100 \%$$

Consideremos ahora un “lanzamiento de moneda” basado en el experimento de Young. Enviemos un rayo de luz hacia la doble rendija e instalemos un fotodetector en el lado opuesto, a cierta distancia. Para que resulte más teatral la paradoja, situémoslo en una franja de interferencia oscura. Atenuemos la luz, de modo que los fotones pasen por

las rendijas de uno en uno. Cubramos primero la rendija 2; nos encontraremos, por ejemplo, con que un 5 % de los fotones atravesará la rendija 1 y activarán el detector. Así pues, $\text{Prob (rendija 1)} = 5 \%$. Cubramos a continuación la rendija; ahora un 5 % de los fotones atraviesan la rendija 2, activando el detector: $\text{Prob (rendija 2)} = 5 \%$. Cuando destapásemos ambas rendijas, creando dos rutas posibles, esperaríamos encontrarnos con un 10 % de los fotones. ¡Pero no! Debido a que situamos el detector en una franja oscura, podríamos pasarnos horas llevando a cabo el experimento sin ver un solo fotón. Es decir,

$$\text{Prob (1 o 2)} = 0\% \neq \text{Prob (1)} + \text{Prob (2)}$$

La explicación que la física cuántica ha encontrado para este comportamiento es el principio de la *superposición*, según el cual los acontecimientos ondulatorios se combinan de acuerdo con una *amplitud*



2. SE EXPLICA LA INTERFERENCIA DE YOUNG con la teoría ondulatoria de la luz. (a) Dos ondas de luz que se hallen en fase se reforzarán constructivamente entre sí: se creará un rayo de luz más brillante. Cuando no lo estén, se atenuarán destructivamente. (b) Una vez las ondas de luz han pasado por las dos rendijas, interfieren constructivamente dondequiera que una viaje un número entero (0, 1, 2,...) de longitudes de onda más lejos que la otra. Interferirán destructivamente cuando una onda viaje una fracción (1/2, 3/2, 5/2,...) de longitudes de onda más lejos. Según la geometría, se produce así una se-

rie de rayas equiespaciadas claras y oscuras, o franjas de interferencia. (c) En las versiones modernas del experimento de Young resulta posible enviar los fotones de uno en uno a través de la rendija. Como muestra esta simulación por ordenador, el patrón de interferencia aparece a medida que aumenta el número de fotones. Aunque esos fotones no se interfieren mutuamente siguen produciendo franjas de interferencia. La única explicación parece ser que un fotón puede pasar de manera simultánea a través de ambas franjas e interferir consigo mismo.

de probabilidad; no se acomodan a una probabilidad. Matemáticamente hablando, una amplitud de probabilidad no es un número real positivo; se trata, por el contrario de un número complejo (es decir, un número como $0,1 + 0,2i$, donde i representa la raíz cuadrada de -1). Así pues, dos amplitudes de probabilidades no nulas (por ejemplo, $0,1 + 0,2i$ y $-0,1 - 0,2i$) pueden sumar cero, lo que nunca sucede con las probabilidades clásicas.

Desde el punto de vista meta-científico, el significado de las amplitudes de probabilidades sigue siendo un gran misterio. De todos

modos, resulta evidente que una “moneda cuántica” no se comporta igual que una clásica. Gracias al principio de superposición, un fotón, nuestra “moneda cuántica”, puede ofrecer una combinación de cara y cruz.

La materia ondula la materia

Si todo esto le parece bastante increíble, no será el único. Incluso los creadores de la física cuántica tuvieron dificultades con sus

conceptos, y algunos nunca aceptaron las teorías a las que se vieron forzados a llegar. Max Planck, quien propuso en 1900 que la luz se comportaba como si estuviera compuesta de cuantos, lo consideraba un artificio matemático que concordaba por casualidad con los datos experimentales. A diferencia de Planck, Albert Einstein aceptaba la teoría de los cuantos de luz, pero albergó dudas acerca de la evolución posterior de la teoría cuántica. No podía admitir que lo que observamos y, en consecuencia, llamamos “realidad” fuera aleatorio. (La mecánica cuántica trata de po-

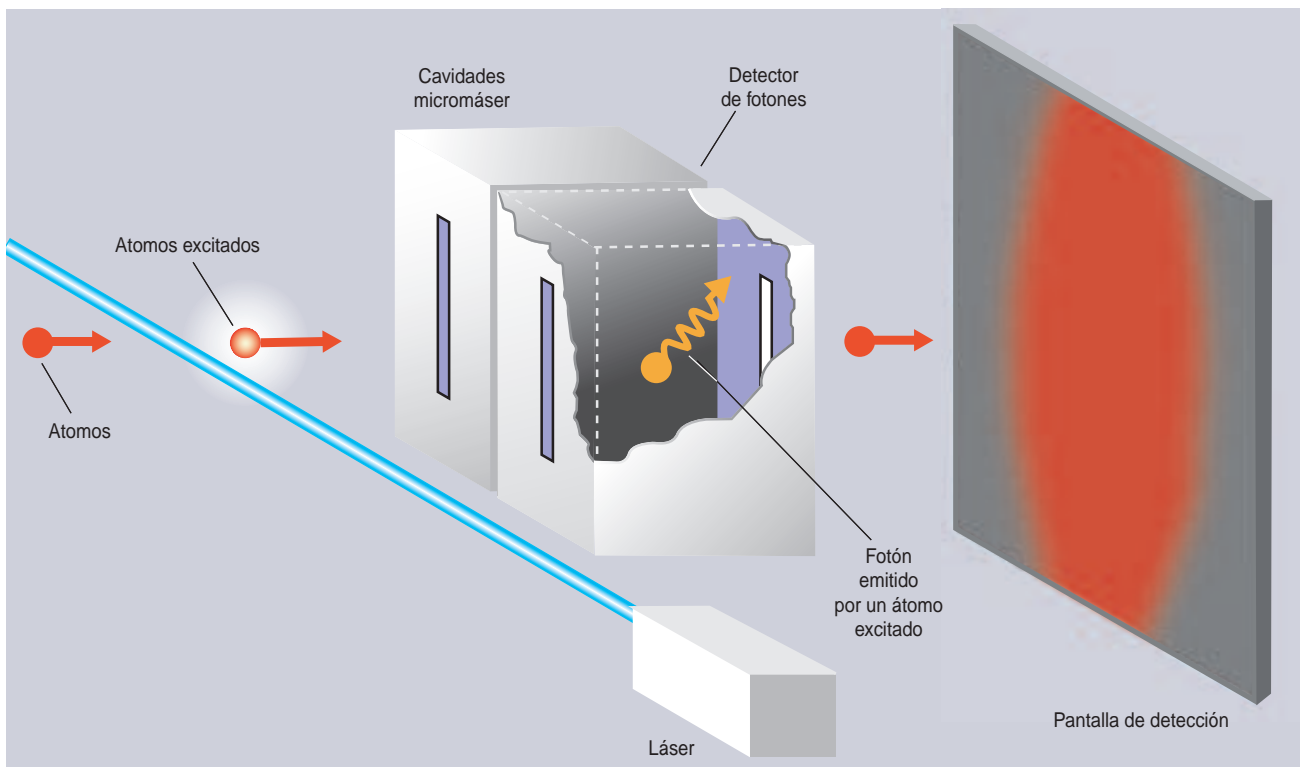
sibilidades y, por lo tanto, no dice nada acerca de *dónde* se encuentra el fotón; sólo dice *dónde es probable o improbable* que aparezca.) A Einstein tampoco le gustaba la inferencia de que esta realidad sólo existe en un estado único e inequívoco cuando la estamos observando. Así expresó su descontento ante Abraham Pais: “¿Acaso piensas que la Luna sólo existe cuando la miras?” Curiosamente, fue la insatisfacción de Einstein la que motivó y sigue motivando gran parte de la investigación moderna en física cuántica.

A finales de la década de 1920, Niels Bohr formuló la “interpretación de Copenhague” de la mecánica cuántica. Constituye el sistema teórico usual para eludir las paradojas de la física cuántica. En particular, el principio de la complementariedad afirma que, para un par de variables u “observables” (la posición o el momento lineal), el co-

nocimiento preciso de una de ellas impide determinar con exactitud la otra. La posición es un observable “corpuscular”: una partícula tiene una posición concreta en el espacio, pero una onda no. No resulta tan obvio que el momento lineal sea un observable ondulatorio. En 1927, Louis de Broglie propuso que, cuando una partícula, un electrón, adquiere momento lineal, adquiere también una longitud de onda característica. Según Bohr, todos los objetos cuánticos son *al mismo tiempo* onda y partícula; el comportamiento que observamos viene determinado por el tipo de medición que decidamos hacer. Si medimos una propiedad corpuscular, el objeto exhibirá un comportamiento corpuscular. Si después decidimos medir una propiedad ondulatoria, el objeto actuará como una onda. Pero no podemos hacer ambas cosas a la vez.

Einstein creía haber descubierto puntos débiles en la interpretación

de Copenhague. Expresó una de esas críticas por medio de un “experimento mental”: suspender una doble rendija de unos muelles muy sensibles de modo que pueda moverse hacia delante y hacia atrás. Cuando esas rendijas montadas sobre muelles dispersasen un fotón, la máquina sufriría un ligero retroceso. Anotando el retroceso junto con la posición en la que el fotón es detectado, el experimento descubriría la rendija por la que “pasó” el fotón (una medida de posición). Einstein sostenía que la medición del retroceso efectuada tras el paso del fotón no alteraría su trayectoria; todavía podrían seguir siendo observadas las franjas de interferencia. La longitud de onda (una propiedad ondulatoria) se deduciría de la separación de las franjas. ¡Así cabría conocer tanto el momento lineal como la trayectoria; por tanto, el principio de complementariedad sería un fraude!



3. EL EXPERIMENTO MENTAL del “borrador cuántico” de Scully, Englert y Walther elimina la interferencia (un producto ondulatorio) al guardar la información acerca de por qué rendija ha pasado un átomo excitado (una propiedad corpuscular). Con un láser se excita un átomo a un estado de alta energía. Luego, ese átomo atraviesa el aparato de doble rendija. Tras cada rendija hay una cavidad de microondas de una longitud suficiente para que el átomo salga de su estado de excitación antes de aban-

donarla. Se libera de esa manera un fotón que permite al experimentador detectar por qué rendija ha pasado el átomo. Según el principio de complementariedad de Bohr, no puede entonces comportarse como una onda. Por lo tanto, múltiples repeticiones del experimento producirán una mancha extensa en la pantalla de detección, en vez de franjas de interferencia. Pero al quitar la pared que separa a las cavidades se borraría la información del camino seguido y se restablecerá la interferencia.

Bohr demostró que el argumento de Einstein tenía un fallo. Invocó otro principio de la mecánica cuántica: el principio de incertidumbre de Heisenberg. Pese a que su nombre sugiere vaguedad, este principio proporciona información cuantitativa sobre la mejor precisión con que se pueden medir variables complementarias. Inevitablemente, el retroceso del aparato de la doble rendija altera el sistema y crea una incertidumbre en la posición del fotón en la pantalla de detección. Esta incertidumbre basta para difuminar las franjas de interferencia, de modo que ya no se podrá medir el momento lineal.

Durante muchos años se pensó que el cumplimiento de la complementariedad se debía al principio de Heisenberg. Se supone ahora que la complementariedad es más fundamental, que sería posible “marcar” la posición de una partícula sin alterar su momento lineal. Ello nos lleva a un nuevo tipo de experimentos: los borradores cuánticos.

¿Qué camino?

Hace unos 20 años, Marlan O. Scully y Kai Drühl, causaron una conmoción con la idea del borrado cuántico. De acuerdo con su argumentación, si se puede obtener la información que indica la trayectoria de un objeto sin perturbar de manera significativa dicha trayectoria, la interferencia debería desaparecer (en virtud de la complementariedad); ahora bien, si después se procediese a “borrar” dicha información, la interferencia debería reaparecer. Podría incluso decirse que “la interferencia es igual a la ignorancia” (de la trayectoria de la partícula).

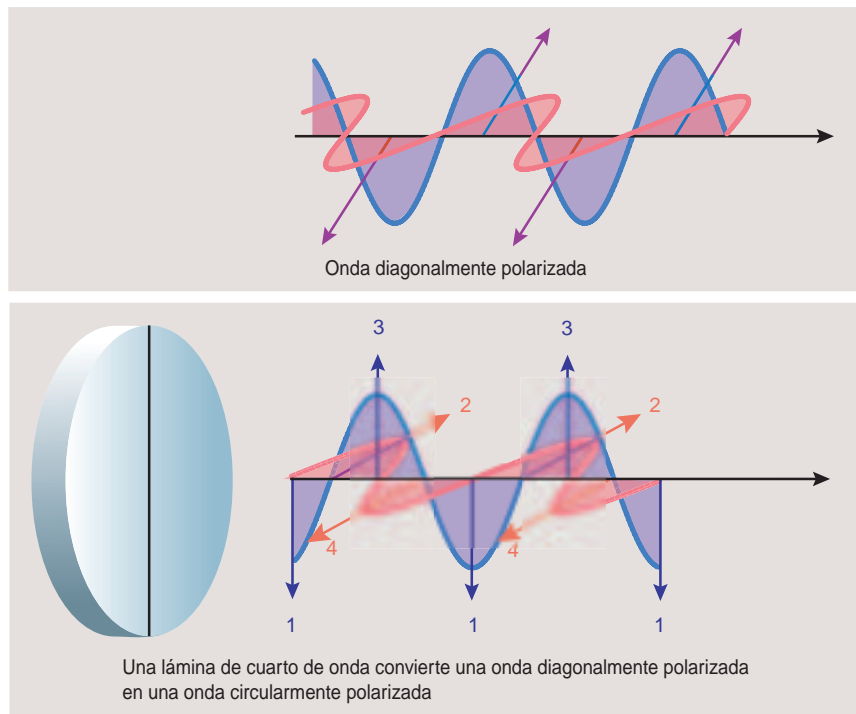
Posteriormente, Scully se unió a Berthold-Georg Englert y Herbert Walther en su propósito de llevar a cabo la idea. En su modelo, el objeto que interfiere es un átomo con electrones excitados a un nivel de energía muy alto. Tras cada una de las rendijas hay una cavidad de microondas diseñada para capturar un fotón emitido por el átomo cuando cae a un nivel de excitación inferior. Con sólo mirar en qué cavidad se encuentra el fotón, el expe-

rimentador sabrá por cuál de las rendijas pasó el átomo. La complementariedad supone que las franjas de interferencia tendrían que desaparecer. Pero si el experimentador quitase la pared que separa las cavidades, la información extra de por qué camino han pasado se borraría y las franjas reaparecerían inmediatamente.

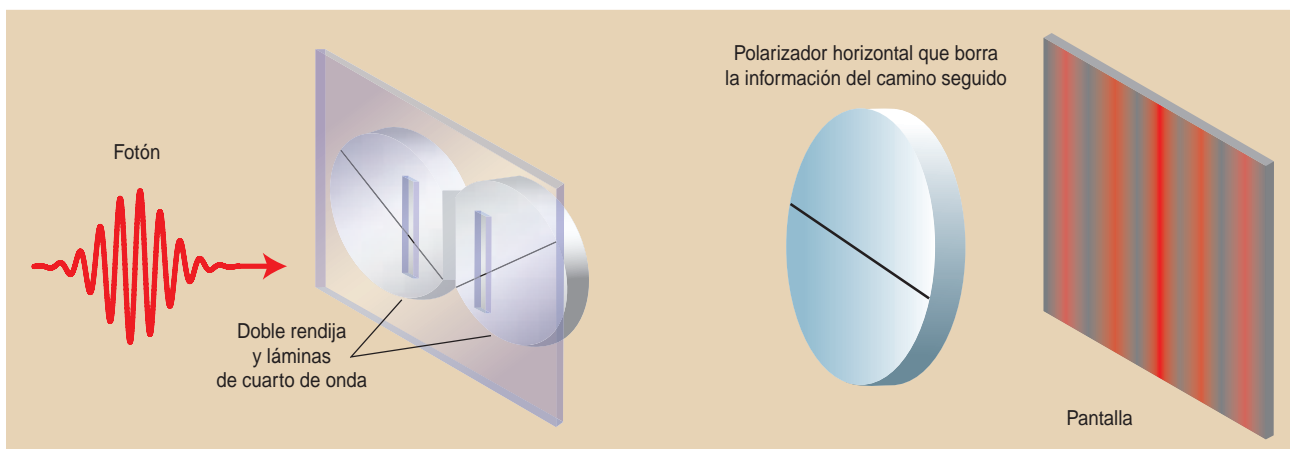
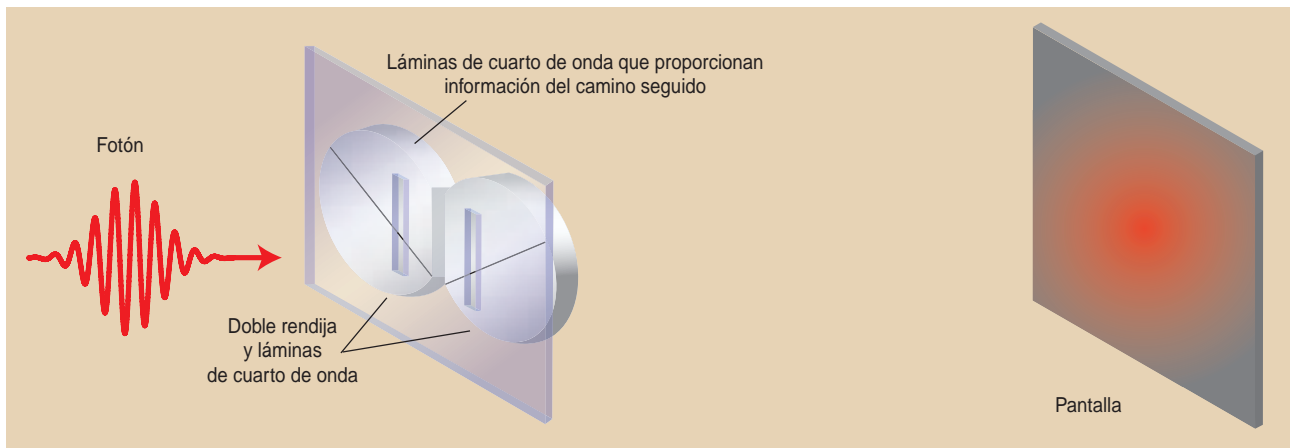
No se ha conseguido efectuar el experimento Scully-Englert-Walther, pero hemos realizado uno análogo con fotones, que facilitan mucho la tarea.

Nuestro experimento utiliza la polarización como marcador. La polarización de una onda electromagnética, pensemos en una lumínica, viene determinada por las oscilaciones de los campos eléc-

tricos y magnéticos de los que se compone (véase la figura 4). Estos campos oscilan siempre en un plano perpendicular al sentido de su propagación, pero pueden apuntar en distintas direcciones dentro de este plano: vertical, horizontal o en un cierto ángulo (45° o -45° , por ejemplo) con respecto a la horizontal. Pueden incluso rotar a medida que se propagan hacia delante, a la manera de un tornillo dextrógiro o levógiro. Se dice de estas ondas que están polarizadas circularmente a derechas o a izquierdas. Por medio de unos componentes ópticos, las *láminas de onda*, resulta posible cambiar la dirección de la polarización o transformar un rayo linealmente polarizado en uno circularmente polarizado. Otro com-



4. NUESTRA VERSION DEL BORRADO CUANTICO utiliza la polarización como marcador de la rendija por la que pasa un fotón. Una onda de luz con polarización lineal (*parte superior*) consiste en campos alternativamente eléctricos o magnéticos. Aquí sólo aparece el campo eléctrico. Dado que sus componentes verticales y horizontales son iguales, se dice que está polarizado de manera diagonal (*parte superior, flechas púrpura*). Una lámina de cuarto de onda, como las que usan los autores en sus experimentos, retrasa una de las componentes (*figura inferior*). Esto hace que el campo eléctrico neto rote a medida que se propaga por el espacio (*parte inferior, flechas 1, 2, 3, 4*). Como esta rotación va, para quien esté observando la onda que llega, en sentido antihorario, se denomina al resultado onda polarizada circularmente a izquierdas. De haber retrasado la otra componente, se hubiera creado una onda polarizada circularmente a derechas. Con su eje colocado verticalmente, la lámina de cuarto de onda convierte la luz diagonalmente polarizada en luz circularmente polarizada; con su eje a 45° , convierte la luz verticalmente polarizada en luz circularmente polarizada.



5. EN LA VERSION DEL BORRADO CUÁNTICO de los autores se colocan tras las rendijas láminas de cuarto de onda, que convierten las polarizaciones de los fotones, respectivamente, en circular a izquierdas y circular a derechas. Esto proporciona al experimentador información de los caminos seguidos; las franjas de interferencia desaparecen (*parte superior*). Sin embargo, un

polarizador horizontal (*parte inferior*) convierte cualquiera de las polarizaciones circulares en polarizaciones horizontales; resulta entonces imposible distinguir entre los fotones que atravesaron las rendijas superior e inferior. La información del camino seguido se ha borrado y las franjas de interferencia reaparecen, como los autores han demostrado en el laboratorio.

ponente óptico común es el *polarizador*, que sólo permite el paso de luz con una polarización determinada. Cuando un rayo circularmente polarizado atraviesa un polarizador horizontal, es despojado de la parte vertical de la onda; queda sólo un rayo horizontalmente polarizado con la mitad de la intensidad del original.

Repitamos ahora, en la imaginación, el experimento de Young con muchos fotones horizontalmente polarizados. Coloquemos tras las rendijas dos láminas de cuarto de onda: una que convierta los fotones horizontalmente polarizados en fotones circularmente polarizados a derechas, y otra que los polarice circularmente a izquierdas. Nos encontraremos con una gran sorpresa: las franjas de interferencia desaparece-

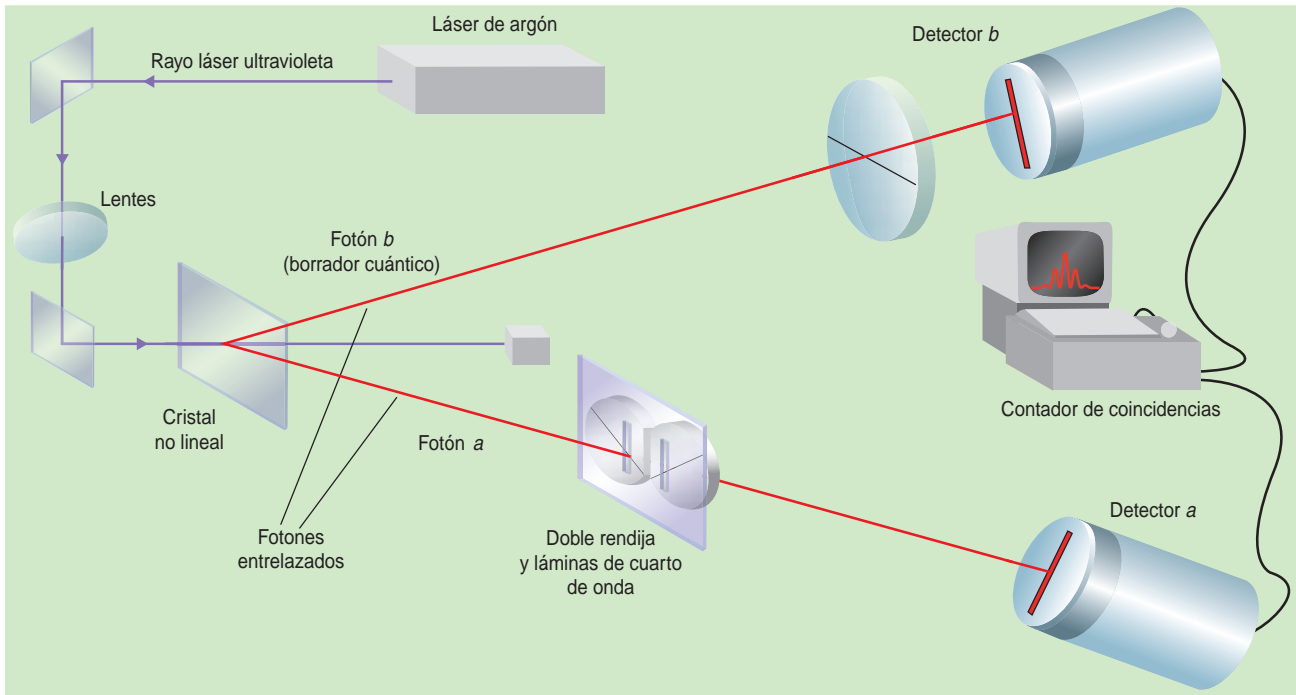
rán, sustituidas por una sola franja de luz, más intensa en el centro. Si dibujamos la distribución de los fotones en un gráfico, obtendremos una curva en forma de campana.

¿Qué ha pasado con la interferencia? Los fotones parecerán haber dejado de comportarse como monedas cuánticas; se habrán convertido en monedas clásicas. Las láminas de onda habrán correlacionado cada rendija con una polarización determinada. Mediante un polarizador circular podríamos medir la polarización y descubrir por qué rendija pasó cada fotón. Obsérvese que, para destruir el patrón de la interferencia, no hemos de medir la polarización. Basta con que *esté disponible* la información del camino seguido; hacer caso omiso no restablecerá la interferencia.

Una historia entrelazada

Para llevar a cabo el borrado cuántico se necesita algo más que un modo de indicar el camino que tomó el fotón; también hay que mostrar cómo se “borra” esa información. Para ello insertamos un polarizador lineal horizontal entre las láminas de cuarto de onda y el detector. Al repetir entonces el experimento dejamos de observar ya la curva con forma de campana; al detectar los fotones, se nos presenta un patrón de interferencia. Es como si nos pusiésemos unas gafas de sol y, de repente, viéramos lo que nos rodea a rayas.

¿Por qué restablece la interferencia un polarizador horizontal? Porque



borra la información del camino seguido. Recordemos que nuestro polarizador horizontal filtra un fotón circularmente polarizado a derechas o a izquierdas y lo transforma en un fotón horizontalmente polarizado. No hay manera de distinguir en adelante si era lo uno o lo otro: una vez que un fotón pasa por el polarizador, no se puede determinar si procedía de la rendija 1 o de la 2. Eliminada la información corpuscular, los fotones quedan libres para volver a actuar como ondas.

Del mismo modo, si instalamos un polarizador lineal vertical entre las láminas de cuarzo de onda y el detector, volveremos a borrar la información del camino seguido. Sin embargo, en este caso observamos un patrón de franjas, por lo común denominado de antifranjas, que no se halla exactamente en fase con el patrón que vimos con el polarizador horizontal. Las antifranjas presentan un mínimo central (*banda oscura*).

Disponemos, pues, de dos modos de dividir los resultados experimentales en subconjuntos. Mediante un polarizador circular separaríamos los fotones en dos grupos: los que pasaron por la rendija 1 (*circular a derechas*) y los que pasaron por la rendija 2 (*circular a izquierdas*). Con un polarizador lineal los separaríamos en dos grupos distintos: los

6. EN EL EXPERIMENTO DE "ELECCION RETARDADA" se utiliza un segundo fotón como borrador cuántico. Se preparan los fotones *a* y *b* en un estado entrelazado para que cualquier medición de la polarización de *b* se entrelace con la información del camino seguido por el fotón *a*. La detección de coincidencias permite al experimentador determinar qué par de fotones están entrelazados uno con otro. Si los dos detectores se activan en el lapso de un nanosegundo, es casi seguro que los dos fotones constituyen un par entrelazado.

que producen un patrón de franjas (*horizontales*) y los que producen un patrón de antifranjas (*vertical*). Esta es la esencia del borrado cuántico.

¿Dice algo el principio de incertidumbre acerca de este experimento? No. La polarización y la posición no son variables complementarias; lo mismo que ocurre en la propuesta de Scully-Englert-Walther, el principio de incertidumbre de Heisenberg no es, pues, aplicable aquí. ¿Por qué, entonces, se cumple el principio de complementariedad?

La respuesta es: el *entrelazado cuántico*. Cuando un fotón pasa por el aparato de la doble rendija, entra en una superposición de estados de posición: rendija 1 + rendija 2. Las láminas de cuarzo de onda llevan a cabo una operación adicional de lógica condicional. Si el fotón pasa por la rendija 1, emergerá polarizado circularmente a derechas y, si lo hace por la rendija 2, emergerá polarizado circularmente a izquierdas. Así pues, la polarización se habrá *entrelazado* con el camino. El estado del fotón puede descri-

birse como una nueva y más complicada superposición:

(rendija 1 Y polarizado a derechas) +
(rendija 2 Y polarizado a izquierdas)

Dado que ahora los dos observables están entrelazados, la manipulación de la información relativa a cualquiera de ellos cambiará de manera automática la información sobre la otra. Equivale por completo a describir el estado del fotón como:

(franjas Y horizontalmente polarizado) +
(antifranjas Y verticalmente polarizado)

Para volver a la analogía del lanzamiento de una moneda, los observables de posición y polarización vendrían a ser ahora como dos monedas "telepáticas". La moneda 1 cae de cara la mitad de las veces, igual que la moneda 2; por tanto, si se observa cada una de ellas de manera aislada, parecerá absolutamente normal. Su rareza cuántica sólo se manifestará cuando se descubra que cada vez que la moneda

1 cae de cara, la moneda 2 hace lo mismo.

Las monedas telepáticas le parecían bastante extrañas a Einstein. En un famoso artículo de 1935, escrito con Boris Podolsky y Nathan Rosen, sostenía que violaban el principio de complementariedad. Sin embargo, el entrelazado cuántico es un fenómeno muy real. Los físicos ensayan formas posibles de aplicar el entrelazado a ordenadores cuánticos y criptosistemas imposibles de descifrar.

¿Cambiando la historia?

Nuestra última variante sobre el experimento de Young incorpora el entrelazado cuántico de manera mucho más manifiesta, para producir una situación de apariencia paradójica: la “decisión retardada”, ideada por John A. Wheeler. Inquieta aún más que las monedas telepáti-

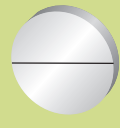







cas, ya que parece abrir la posibilidad de modificar el pasado. Lo parece, pero no lo altera en absoluto.

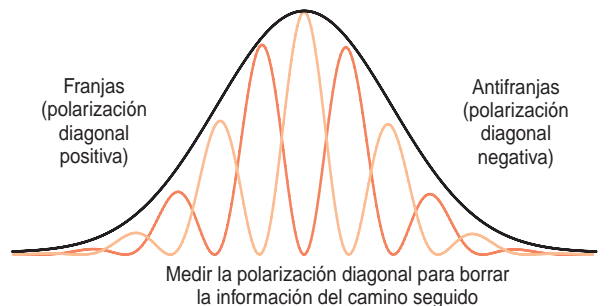
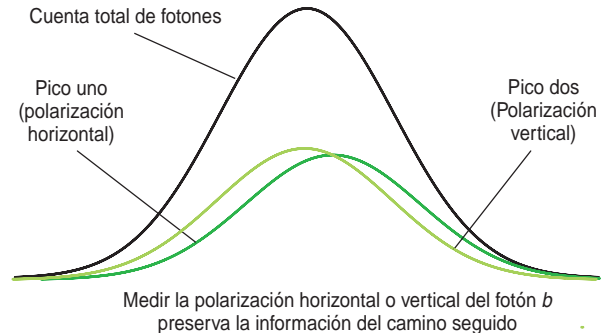
En el experimento de la decisión retardada creamos un par de fotones entrelazados, a y b . Cuando la posición de a tenga una polarización horizontal, b tendrá forzosamente una polarización vertical, y viceversa. (Llevamos esto a cabo mediante un proceso óptico no lineal, la “conversión paramétrica espontánea a la baja”: se apunta un láser ultravioleta de argón hacia un cristal fino, que emite, así iluminado, dos fotones “gemelos”.) Maniobramos el fotón a de modo que pase por la doble rendija y las láminas de cuarto de onda, y después por un detector, mientras que b se dirige directamente a un detector de polarización distinto. Esta vez, la polarización del fotón b será nuestro controlador del borrador cuántico.

Dado que a y b se hallan entrelazados, cualquier medición sobre

b nos dirá algo sobre a . Podemos elegir si efectuamos una medición sobre b que nos proporcione información del camino seguido por a , o si efectuamos una medición que preserve la interferencia. Si medimos la polarización horizontal o vertical de b , preservaremos la información del camino seguido. (Es así porque la expresión “ a circular a derechas y b horizontal” implica que el fotón a pasó por la rendija 1, mientras que “ a circular a izquierdas y b horizontal” indica que pasó por la rendija 2). Para borrar la información del camino seguido por a , podemos medir, en cambio, la polarización diagonal de b . Una medición de la dirección diagonal positiva (45°) dará franjas de interferencia en la pantalla de detección de a ; una medición de la dirección diagonal negativa (-45°) producirá antifranjas.

En nuestro laboratorio hemos demostrado que el borrado cuántico

| | Fotón b | Fotón a |
|--|---|--|
| Proporciona información del camino seguido |  Polarizador horizontal |  Polarización circular a derechas rendija 1 |
| |  Polarizador vertical |  Polarización circular a izquierdas rendija 2 |
| Borra información del camino seguido |  Polarizador diagonal positivo |  Franjas de interferencia |
| |  Polarizador diagonal negativo |  Antifranjas de interferencia |



7. LA PARADOJA DE LA “ELECCION RETARDADA” equivale a un cambio en la contabilidad, no a un cambio de la historia. El comportamiento de un par de fotones entrelazados (a y b) puede ser anotado por dos observadores, cada uno por su lado. El observador A repite muchas veces el experimento y dibuja un gráfico que muestra dónde se detectan los fotones. Cualquiera que sea el método de medición que escoja el observador B , el gráfico del observador A será una curva en forma de campana. (Esto se corresponde con la mancha que hemos visto en la figura 5). Si el observador B elige medir la polarización horizontal/vertical, cada uno de sus fotones b conservará información

del camino seguido por sus gemelos entrelazados. Así, los fotones a medidos por A se separarán en dos grupos, uno de los cuales habrá pasado por la rendija 1 y otro que lo habrá hecho por la rendija 2. El recuento de los fotones de cada grupo producirá curvas en forma de campana, ligeramente desplazadas una de otra (*arriba derecha, líneas verdes*). Si el observador B decide medir la polarización diagonal, se borrará la información del camino seguido. En ese caso, los fotones entrelazados medidos por A se podrán separar en otros dos grupos, uno que forma franjas de interferencia y otro que forma antifranjas (*parte inferior*).

Los autores

STEPHEN P. WALBORN, MARCELO O. TERRA CUNHA, SEBASTIAO PADUA y CARLOS H. MONKEN investigan la óptica cuántica en la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), en Belo Horizonte, Brasil. Stephen P. Walborn está a punto de terminar su tesis doctoral en óptica cuántica. Marcelo O. Terra Cunha es estudiante de doctorado de física y profesor ayudante de matemáticas. Sebastião Pádua y Carlos H. Monken son profesores adjuntos en la UFMG e investigadores principales del grupo experimental de óptica cuántica. © *American Scientist Magazine*.

se produce sin que importe el orden en que se detecten a y b . Puesto que nuestro detector para el fotón b no está demasiado alejado (1,5 metros), el retraso en la detección es minúsculo: alrededor de 5 nanosegundos. En principio no hay ninguna razón por la que no podamos enviar b a una gran distancia, aunque sea a Marte. Esto daría al observador marciano varios minutos para decidir si nosotros, en la Tierra, observaremos franjas o no. Pero, ¿y si ya hemos recopilado nuestros datos y observado lo contrario?

Es imposible que esto ocurra. La medición retardada en Marte no cambia lo ocurrido en la Tierra; sólo cambia nuestra contabilidad. Para explicarlo recurramos al consabido diálogo entre Alicia y Bob. Supongamos que Alicia prepara en la Tierra un experimento de doble rendija con láminas de cuarto de onda. Su amigo Bob, que vive en Marte, le envía una caja de fotones. Alicia hace pasar cada fotón por el aparato de doble rendija, efectúa una medición de su posición y anota la medición: "Fotón 567 detectado en la posición $x = 4,3$ ". Ignora que, en Marte, Bob, se ha quedado con un gemelo entrelazado de cada uno de los fotones y mide su polarización como le apetece, bien en las direcciones horizontal y vertical, bien en las direcciones diagonales de 45° o -45° ; los resultados los anota en su cuaderno de laboratorio: "Al fotón 567(B) se le ha detectado una polarización horizontal". Unas semanas más tarde, Bob visita a Alicia.

Alicia: Mira, he hecho ese experimento de la doble rendija y la lámina de cuarto de onda sobre el que escribieron esos físicos. Tal como decían, obtuve una aburrida curva en forma de campana sin la menor interferencia.

Bob (un bromista): ¿Estás segura? Revisa tus resultados y dibuja únicamente las posiciones de estos fotones. (*Entrega a Alicia una lista de los fotones en los que obtuvo una polarización de 45°*).

Alicia: ¡Franjas de interferencia! ¿Cómo has conseguido que los fotones interfirieran después de haber anotado yo los resultados en mi cuaderno?

Bob: ¿Eso te parece genial? Echale un vistazo a esto. (*Le entrega a Alicia una lista de los fotones en los que obtuvo una polarización vertical*).

Alicia: ¡No tienen franjas! Vuelve a darse la curva en forma de campana. (*Bob le entrega una lista de los fotones con una polarización de -45° y ella dibuja sus posiciones*). Reaparece la interferencia, pero esta vez con antifranjas. Esto es asombroso, Bob. Puedes controlar el pasado. ¿Puedes retroceder y cambiar las notas que saqué en mis exámenes, Bob?

Bob: Lo siento, Alicia, pero no hay nada mágico en ello. En realidad, los fotones que te envié estaban entrelazados con unos que me quedé. Realicé mediciones de polarización y de ahí salieron estas misteriosas listas de fotones. Pero

mis mediciones no han modificado la historia. Se limitaron a exponerme cómo dividir tus resultados experimentales. Puedo dividirlos en franjas y antifranjas o en dos curvas en forma de campana. Pero no puedo cambiar el lugar donde acaba cada fotón.

Alicia: Qué pena. Me hacía *muchísima* falta ese sobresaliente en física. (*Se anima*). ¡Pero oye! ¡Tal vez podríamos convertir esto en un sistema para enviar mensajes!

Bob: Créeme, Alicia, ya hay alguien trabajando en ello.

Conclusión

El borrado cuántico parece confirmar que el principio de complementariedad es una parte fundamental de la teoría cuántica. Aunque los experimentos de este tipo han contribuido a ilustrar la naturaleza dual de los objetos cuánticos, los físicos todavía no son capaces de explicar *por qué* existe la dualidad onda-partícula. En esto seguiríamos estando de acuerdo con Richard Feynman, que en 1960 escribió: "Explicándooos cómo funciona, no podemos hacer que desaparezca el misterio. Vamos a explicaros cómo funciona, nada más".

Aun así, estamos progresando. Ahora comprendemos que el responsable de la complementariedad en el experimento de la doble rendija es el entrelazado cuántico, parte necesaria del acto mismo de la medición, y no la "incertidumbre cuántica" asociada a la medición. Parecerá una sutileza, pero gracias a ella muchos físicos se sentirán más tranquilos.

Bibliografía complementaria

- THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS. R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands. Addison-Wesley; Reading, Massachusetts, 1965.
- QUANTUM THEORY AND MEASUREMENT. Dirigido por J. A. Wheeler y W. H. Zurek. Princeton University Press, New Jersey; 1983.
- QUANTUM OPTICAL TESTS OF COMPLEMENTARITY. M. O. Scully, B.-G. Englert y H. Walther en *Nature*, vol. 351, págs. 111-116; 1991.
- QUANTUM THEORY: CONCEPTS AND METHODS. A. Peres. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 1995.
- QUANTUM OPTICS. M. O. Scully y M. S. Zubairy. Cambridge University Press; Nueva York, 1997.
- DOUBLE-SLIT QUANTUM ERASER. S. P. Walborn, M. O. Terra Cunha, S. Pádua y C. H. Monken en *Physical Review A*, vol. 65, pág. 033818; 2002.