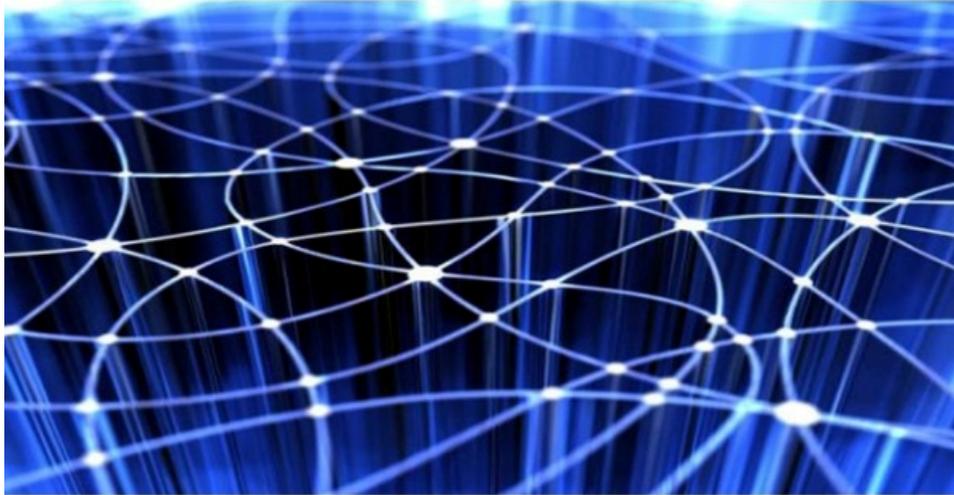


ENTRELAZAMIENTO

El mayor misterio de la física

AMIR D. ACZEL



2004

Reseña

Entre las muchas teorías que pueblan el cosmos científico, pocas poseen la importancia de la física cuántica, creada por genios del calibre de Planck, Einstein, Heisenberg o Schrödinger. Desde hace mucho nuestras vidas y conocimientos están profundamente influidos por esta construcción de la física, cuyos contenidos desafían nuestros hábitos de comprensión más enraizados. Así ocurre, por ejemplo, con el hecho de que las partículas son también ondas, y las ondas partículas, o con que sea imposible determinar con absoluta precisión y al mismo tiempo posiciones y velocidades de una partícula.

Mucho se ha escrito sobre estas contraintuitivas características de la mecánica cuántica, pero hay más, como el fenómeno conocido como «entrelazamiento», según el cual los objetos (como partículas subatómicas) que describe la física cuántica, pueden llegar a estar tan enlazados, tan relacionados entre sí, que un cambio en uno de ellos se reflejaría instantáneamente en el otro, incluso aunque ambos estuvieran en extremos opuestos del universo. Einstein, quien identificó este extraño fenómeno, pensó que semejante posibilidad mostraba que la mecánica cuántica no era una teoría correcta, pero se equivocó, como han demostrado durante los últimos años una serie de distinguidos físicos. Este libro narra, en términos claros y accesibles, esta fascinante historia, una historia que abre posibilidades (como la construcción de códigos indescifrables) que hasta hace poco era imposible imaginar.

Índice

[Prefacio](#)

[Nota al lector](#)

1. [Una misteriosa fuerza de armonía](#)
2. [Antes del principio](#)
3. [El experimento de Thomas Young](#)
4. [La constante de Planck](#)
5. [La Escuela de Copenhague](#)
6. [Las ondas piloto de De Broglie](#)
7. [Schrödinger y su ecuación](#)
8. [El microscopio de Heisenberg](#)
9. [El gato de Wheeler](#)
10. [El matemático húngaro](#)
11. [Entra Einstein](#)
12. [Bohm y Aharonov](#)
13. [El teorema de John Bell](#)
14. [El sueño de Clauser, Home y Shimony](#)
15. [Alain Aspect](#)
16. [Cañones láser](#)
17. [Entrelazamiento triple](#)
18. [El experimento de los diez kilómetros](#)
19. [Teleportación: «Proyéctame, Scotty»](#)
20. [La magia cuántica, ¿qué significa?](#)

[Agradecimientos](#)

[Bibliografía](#)

Fotografías

Prefacio

Para Ilana

Mi propia sospecha es que el universo no sólo es más raro de lo que suponemos, sino más raro de lo que podemos suponer.

J. B. S. HALDANE

En el otoño de 1972, yo era un estudiante de la licenciatura de matemáticas y física en la Universidad de California, en Berkeley. Allí tuve la fortuna de escuchar una conferencia especial de Werner Heisenberg, uno de los fundadores de la teoría cuántica. Aunque tengo ciertas reservas acerca del papel histórico desempeñado por Heisenberg —mientras otros científicos abandonaban Alemania como protesta ante la política nazi, él permaneció allí y fue un instrumento de los intentos de Hitler de desarrollar la bomba atómica—, su charla tuvo un efecto considerable y positivo en mi vida, pues me proporcionó un profundo aprecio por la teoría cuántica y su papel en nuestros esfuerzos por entender la naturaleza.

La mecánica cuántica es la más extraña de las disciplinas científicas. Desde la perspectiva de nuestra vida cotidiana, nada tiene sentido en la teoría cuántica, teoría acerca de las leyes de la naturaleza que rigen el dominio de lo muy pequeño (así como de

algunos sistemas grandes, como los superconductores). La misma palabra, *quantum*, denota un paquete de energía muy pequeño. En la mecánica cuántica, nombre que se da a la teoría cuántica, se estudian los componentes básicos de la materia, las partículas de las que está hecho todo el universo. Estas partículas son los átomos, moléculas, neutrones, protones, electrones y quarks, así como los fotones, las unidades básicas de la luz. Todos estos objetos (si verdaderamente puede llamárseles así) son mucho más pequeños que cualquier cosa que pueda ver el ojo humano. A este nivel todas las reglas de comportamiento que nos son familiares dejan de cumplirse. La entrada en ese extraño nuevo mundo de lo muy pequeño es una experiencia tan chocante y rara como las aventuras de Alicia en el País de las Maravillas. En ese irreal mundo cuántico las partículas son ondas y las ondas partículas. Un rayo de luz, por lo tanto, es una onda electromagnética que se desplaza a través del espacio y una corriente de partículas minúsculas que se mueven hacia el observador, en el sentido de que ciertos experimentos o fenómenos cuánticos revelan la naturaleza ondulatoria de la luz mientras que otros revelan su naturaleza corpuscular, pero nunca ambas a la vez. Y, sin embargo, antes de observar un rayo de luz, éste es ambas cosas, una onda y una corriente de partículas.

En el dominio cuántico todo es borroso: existe un aspecto aleatorio común a todas las entidades con las que tratamos, sean éstas luz o electrones o átomos o quarks. Un *principio de incertidumbre* reina en la mecánica cuántica, donde la mayoría de las cosas no pueden verse, sentirse o conocerse con precisión, sino sólo a través de una

neblina de probabilidad y azar. Las predicciones científicas sobre resultados (medidas) son de naturaleza estadística y se dan en términos de probabilidades; podemos predecir sólo la localización más probable de una partícula, no su posición exacta. Y en ningún caso podemos determinar la posición y el momento de una partícula con gran precisión simultáneamente. Además, la niebla que impregna el mundo cuántico no puede desaparecer jamás. No existen «variables ocultas», que, de conocerse, aumentarían nuestra precisión más allá del límite natural que gobierna el mundo cuántico. Simplemente, la incertidumbre, la borrosidad, la probabilidad, la dispersión no pueden desaparecer; estos misteriosos, ambiguos y velados elementos son parte íntegra de ese mundo de maravillas.

Aún más inexplicable es la misteriosa *superposición* de estados de sistemas cuánticos. Un electrón (partícula elemental cargada negativamente) o un fotón (cuanto de luz) pueden hallarse en una superposición de dos o más estados. Ya no hablamos de «aquí o allí»; en el mundo cuántico se habla de «aquí *y* allí». En cierto sentido, un fotón, una parte de un flujo de luz que ilumina una pantalla con dos agujeros, puede pasar a través de los dos agujeros a la vez, y no, como cabría esperar, a través de uno u otro. Un electrón en órbita alrededor del núcleo (atómico) se halla potencialmente en muchos sitios a la vez.

Pero el fenómeno más asombroso en el extraño mundo del cuanto es el efecto llamado *entrelazamiento* («entanglement»). Dos partículas que pueden estar muy alejadas entre sí, incluso millones o billones

de kilómetros, están misteriosamente ligadas la una con la otra. Cualquier cosa que ocurra a una de ellas causa *inmediatamente* un cambio en la otra.¹

Lo que aprendí en la conferencia de Heisenberg hace treinta años fue que debemos abandonar todas las concepciones previas acerca del mundo derivadas de nuestra experiencia y nuestros sentidos y dejar que las matemáticas nos dirijan. El electrón mora en un espacio distinto del que vivimos nosotros. Reside en lo que los matemáticos llaman un «espacio de Hilbert», como también lo hacen las otras partículas microscópicas y los fotones. Este espacio de Hilbert, construido por los matemáticos independientemente de la física, parece describir bien las misteriosas reglas del mundo cuántico, las cuales no tienen sentido si se las contempla con ojos acostumbrados a nuestras experiencias cotidianas. De modo que el físico que trabaja con sistemas cuánticos confía en las matemáticas para predecir los resultados de experimentos o fenómenos, ya que no tiene ninguna intuición natural sobre lo que sucede dentro de un átomo o de un rayo de luz o de una corriente de partículas. La teoría cuántica limita nuestro mismísimo concepto de lo que constituye la ciencia, pues nunca podremos verdaderamente «comprender» el extraño comportamiento de lo muy pequeño. Y esto «grava» nuestra idea de lo que constituye la realidad. ¿Qué significa «realidad» en el contexto de la existencia de entes entrelazados que actúan al unísono incluso estando muy separados?

¹ Debe, sin embargo, advertirse que la causación es un concepto complicado y sutil en mecánica cuántica.

La bella teoría matemática del espacio de Hilbert, el álgebra abstracta y la teoría de la probabilidad —nuestras herramientas matemáticas para tratar los fenómenos cuánticos— nos permiten *predecir* los resultados de experimentos con una precisión asombrosa, pero no nos proporcionan una *comprensión* de los procesos subyacentes. Entender lo que sucede realmente dentro de la caja misteriosa puede estar más allá de las posibilidades de los seres humanos. Según una interpretación de la mecánica cuántica, sólo podemos usar la caja para predecir resultados. Y estas predicciones son de naturaleza estadística.

Existe una fuerte tentación de decir: «Bueno, si la teoría no puede ayudarnos a entender lo que verdaderamente ocurre, entonces simplemente es que es *incompleta*. Falta algo; debe haber algunas otras variables que, añadidas a nuestras ecuaciones, complementen nuestro conocimiento y nos proporcionen esa comprensión que buscamos». Y, de hecho, el mayor científico del siglo XX, Albert Einstein, lanzó este mismo desafío a la naciente teoría cuántica. Einstein, cuyas teorías relativistas revolucionaron nuestra visión del espacio y del tiempo, argüía que la mecánica cuántica era excelente en cuanto teoría estadística, pero no constituía una descripción completa de la realidad física. Su muy conocida frase «Dios no juega a los dados con el universo» reflejaba su creencia de que existía un nivel no-probabilístico más profundo que la teoría cuántica que aún tenía que descubrirse. Junto con sus colaboradores Podolsky y Rosen, lanzó un desafío a la física cuántica en 1935, asegurando que la teoría era incompleta. Los tres científicos basaron sus

argumentos en la existencia del fenómeno del entrelazamiento, el cual, a su vez, había sido deducido a partir de consideraciones matemáticas acerca de los sistemas cuánticos.

En su charla de Berkeley en 1972, Heisenberg expuso el desarrollo de su tratamiento de la teoría cuántica conocido como «mecánica matricial». Esto y el principio de incertidumbre fueron sus dos contribuciones más importantes a la teoría cuántica. Heisenberg contó que, cuando intentaba desarrollar su tratamiento matricial en 1925, ni siquiera sabía cómo multiplicar matrices (una operación elemental en matemáticas). No obstante, aprendió solo cómo hacerlo y sacó adelante su teoría. Así pues, las matemáticas proporcionaron a los científicos las reglas de comportamiento del mundo cuántico. Las matemáticas condujeron también a Schrödinger a su tratamiento alternativo, y más simple, de la mecánica cuántica: la ecuación de ondas.

A lo largo de los años he seguido estrechamente el desarrollo de la teoría cuántica. Mis libros han tratado de misterios en matemáticas y física. *El último teorema de Fermat* contaba la historia de la asombrosa prueba de un problema propuesto hace mucho tiempo; *God's equation* (La ecuación de Dios) era la historia de la constante cosmológica de Einstein y la expansión del universo; *The mystery of the Aleph* (El misterio del Aleph) era una descripción de los intentos de la humanidad por entender el infinito. Pero siempre he deseado abordar los secretos del cuanto. Un artículo reciente en *The New York Times* me proporcionó el ímpetu que necesitaba. El artículo trataba del desafío que Albert Einstein y sus dos colegas lanzaron a

la teoría cuántica, asegurando que una teoría que permitía el irreal fenómeno del «entrelazamiento» tenía que ser incompleta.

*Hace siete décadas, Einstein y sus aliados científicos imaginaron maneras de demostrar que la mecánica cuántica, las extrañas reglas que describen el mundo de lo muy pequeño, era demasiado fantasmal para ser cierta. Entre otras cosas, Einstein probó que, según la mecánica cuántica, la medición de una partícula podía cambiar instantáneamente las propiedades de otra partícula, sin importar lo lejos que estuvieran entre sí. Einstein creía que esta acción a distancia, llamada entrelazamiento, era demasiado absurda para darse en la naturaleza, y usó sus experimentos mentales como un arma para mostrar las extrañas implicaciones que tendría este proceso si pudiera suceder. Pero los experimentos descritos en tres artículos posteriores de la revista *Physical Review Letters* dan cuenta de lo desencaminado que iba Einstein. Los experimentos muestran no sólo que el entrelazamiento realmente existe, algo que se sabe desde hace algún tiempo, sino que podría ser usado para crear códigos indescifrables.²*

Como he llegado a saber a partir de mi estudio sobre la vida y obra de Albert Einstein, incluso cuando él pensaba que estaba equivocado (sobre la constante cosmológica), tenía razón. Y en lo concerniente al mundo cuántico —Einstein fue uno de los que desarrollaron la teoría—, yo sabía muy bien que, lejos de estar

² *The New York Times*, 2 de mayo de 2000, p. F1.

equivocado, el artículo de Einstein de 1935, aludido veladamente en el artículo del *Times*, fue de hecho la semilla de uno de los descubrimientos más importantes de la física del siglo XX: el descubrimiento real del entrelazamiento a través de experimentos físicos. Este libro cuenta la historia de la búsqueda humana del entrelazamiento, el más extraño de todos los extraños aspectos de la teoría cuántica.

Los entes entrelazados (partículas o fotones) están unidos entre sí porque fueron producidos por algún proceso que los ligó de una manera especial. Por ejemplo, dos fotones emitidos por el mismo átomo cuando uno de sus electrones baja dos niveles de energía están entrelazados. (Los niveles de energía están asociados a las órbitas de un electrón en el átomo). Aunque ninguno de ellos se emite en una dirección definida, el par siempre saldrá en direcciones opuestas entre sí. Y tales fotones o partículas, producidos de un modo que los liga entre sí, permanecen siempre entrelazados. Cuando cambia uno de ellos, su gemelo —*dondequiera que se halle*— cambiará *instantáneamente*.

En 1935, Einstein y sus colaboradores Rosen y Podolsky consideraron un sistema de dos partículas permitido por las reglas de la mecánica cuántica. Se probó que el estado de este sistema era entrelazado, y Einstein, Podolsky y Rosen usaron este entrelazamiento teórico de partículas separadas para suponer que, si la mecánica cuántica permitiera la existencia de tales efectos extraños, algo en la teoría debería ser falso o, como ellos decían, «incompleto».

En 1957, los físicos David Bohm y Yakir Aharonov analizaron los resultados de un experimento llevado a cabo por C. S. Wu e I. Shakhnov casi una década antes, y su análisis proporcionó el primer indicio de que el entrelazamiento de sistemas separados puede suceder ciertamente en la naturaleza. Después, en 1972, dos físicos norteamericanos, John Clauser y Stuart Freedman, presentaron pruebas de que el entrelazamiento existe realmente. Y unos años más tarde, el físico francés Alain Aspect y sus colegas proporcionaron una convincente y completa evidencia de la existencia del fenómeno. Ambos grupos siguieron el trabajo teórico fundamental de John S. Bell, un físico irlandés que trabajaba en Ginebra, y probaron que el experimento ideal de Einstein, Podolsky y Rosen no era algo absurdo usado para invalidar la completitud de la mecánica cuántica, sino, al contrario, la descripción de un fenómeno real. La existencia de tal fenómeno proporciona evidencia a favor de la mecánica cuántica y en contra de una visión limitada de la realidad.

Nota al lector

La propia teoría cuántica, y en particular el concepto de entrelazamiento, es muy difícil de comprender, incluso para físicos o matemáticos experimentados. Así pues, he estructurado el libro de manera que las ideas y conceptos discutidos se explican y reexplican constantemente de diversas formas. Este enfoque tiene sentido cuando se considera que algunos de los científicos actuales más brillantes han trabajado sobre el entrelazamiento durante toda su vida; la verdad es que, incluso tras décadas de investigación, resulta difícil encontrar a alguien que admita entender perfectamente la mecánica cuántica. Esos físicos saben cómo aplicar la mecánica cuántica en una diversidad de situaciones. Pueden realizar cálculos y hacer predicciones con un alto grado de precisión, lo que es raro en otras áreas. Pero con frecuencia esos brillantes científicos confesarán que no *entienden* verdaderamente lo que acontece en el mundo cuántico. Es precisamente ésa la razón por la que, capítulo tras capítulo de este libro, repito los conceptos de la teoría cuántica y del entrelazamiento, en cada ocasión desde un ángulo ligeramente diferente, o exponiendo cómo ha sido explicado por un científico distinto.

Me he esforzado en incorporar el mayor número posible de figuras originales, proporcionadas por los mismos científicos, que describen experimentos y diseños reales. Espero que esos gráficos y figuras ayuden al lector a entender el misterioso y maravilloso mundo del cuanto y el marco en el que se produce y estudia el entrelazamiento.

Adicionalmente, en los lugares apropiados, he introducido algunos símbolos y ecuaciones. No lo he hecho para desconcertar al lector, sino para que los lectores con una preparación avanzada en ciencia puedan aprovechar más la presentación. Por ejemplo, en el capítulo sobre la ecuación de Schrödinger incluyo la forma más simple (y más restringida) de esa famosa ecuación pensando en quienes podrían desear ver su aspecto. Es perfectamente lícito que el lector, si así lo prefiere, se salte las ecuaciones y siga leyendo, y quien así lo haga no sufrirá de ninguna falta de información o de continuidad. Éste es un libro acerca de la *ciencia*, de cómo se hace, de la filosofía subyacente, de sus fundamentos matemáticos, de los experimentos que verifican y ponen al descubierto los secretos profundos de la naturaleza, y de las vidas de los científicos que persiguieron el más extraño de ellos. Dichos científicos constituyen un grupo de las mentes más brillantes del siglo XX y en conjunto sus vidas abarcan la totalidad del siglo. Esas personas, en busca sin descanso de conocimiento sobre un profundo misterio de la naturaleza, llevaron y llevan hoy vidas que están, también ellas, entrelazadas.

Este libro cuenta los avatares de esa búsqueda, uno de los mayores episodios de detectives científicos de la historia. Y aunque la ciencia del entrelazamiento ha propiciado el nacimiento de nuevas y sorprendentes tecnologías, este libro no está centrado en ellas. *Entrelazamiento* trata de la búsqueda llamada ciencia moderna.

Capítulo 1

Una fuerza misteriosa

Pero, ay, para vestir el manto de Galileo no basta con ser perseguido por una institución cruel, también se ha de tener razón.

ROBERT PARK

¿Es posible que algo que sucede aquí haga *instantáneamente* que algo suceda en un sitio lejano? Si medimos algo en un laboratorio, ¿es posible que en el mismo instante tenga lugar un suceso análogo a diez kilómetros de distancia, en el otro extremo de la Tierra, o en el extremo opuesto del universo? Sorprendentemente, y en contra de toda intuición que podamos tener acerca de cómo funciona el universo, la respuesta es sí. Este libro narra la historia del *entrelazamiento*, un fenómeno en el que dos entes están inexorablemente enlazados independientemente de lo alejados que estén entre sí. Es la historia de los investigadores que se han pasado la vida buscando pruebas de que tan extraño efecto, anunciado por la teoría cuántica y objeto de una amplia atención científica por Einstein, forma, en efecto, parte de la naturaleza.

Al mismo tiempo que esos científicos estudiaban dicho efecto y presentaban pruebas concluyentes de que el entrelazamiento es una realidad, descubrían también otros —igualmente sorprendentes—

aspectos del fenómeno. Imaginémonos a Alicia y Benito,³ dos personas felizmente casadas. Mientras Alicia se encuentra lejos, en un viaje de negocios, Benito conoce a Carolina, que está casada con Damián. También Damián está fuera entonces, en la otra punta del mundo, alejado de los otros tres. Benito y Carolina acaban «entrelazándose»; olvidan a sus respectivos cónyuges y deciden formar una pareja estable. Misteriosamente, Alicia y Damián, que nunca se han visto, también llegan a estar entrelazados. De repente, se comportan como un matrimonio sin tan siquiera conocerse. Si sustituimos a las personas de esta historia por las partículas designadas A, B, C y D, el extraño fenómeno anterior sucede realmente. Si las partículas A y B están entrelazadas, y asimismo lo están C y D, entonces podemos entrelazar las partículas separadas A y D pasando B y C a través de un aparato que a su vez las entrelace.

Mediante el entrelazamiento, puede también «teleportarse»⁴ el estado de una partícula hasta un destino lejano, como sucede con el capitán Kirk en la serie televisiva *Star Trek* cuando pide ser proyectado de vuelta al *Enterprise*. Para ser preciso, nadie ha sido todavía capaz de teleportar a una persona. Pero el estado de un sistema cuántico ha sido teleportado en el laboratorio. Es más, este

³ [Nota del traductor] En la literatura científica, usualmente en inglés, a estos ficticios —y famosos— personajes se les llama Alice y Bob. He preferido darles nombres castellanos manteniendo sus iniciales, y lo mismo he hecho con los otros personajes que aparecen a continuación.

⁴ [Nota del traductor] Se ha traducido *teleportation* como «teleportación», palabra que no existe en español, pero aceptable desde el punto de vista fonético y que, a nuestro juicio, refleja bien el sentido del término inglés.

increíble fenómeno puede en la actualidad usarse en criptografía y (podría usarse) en la futura computación cuántica.

En tales aplicaciones futuristas de la tecnología, el entrelazamiento se extiende frecuentemente a más de dos partículas. Es posible crear tríos de partículas, por ejemplo, de modo que las tres estén un 100 por 100 correlacionadas entre sí; cualquier cosa que suceda a una de ellas produce un cambio instantáneo semejante en las otras dos. Los tres entes se hallan entonces inexorablemente ligados dondequiera que se encuentren.

Un día, en 1968, el físico Abner Shimony estaba sentado en su despacho en la Universidad de Boston. Como impulsada por una fuerza misteriosa, su atención se dirigió a un artículo aparecido dos años antes en una revista de física poco conocida. Su autor era John Bell, un físico irlandés que trabajaba en el Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN), en Ginebra. Shimony era una de las pocas personas que tenía la capacidad y el deseo de entender verdaderamente las ideas de Bell. Sabía que el teorema de Bell, como se explicaba y demostraba en el artículo, permitía la posibilidad de comprobar si dos partículas, situadas lejos una de otra, podrían actuar concertadamente. Justo por entonces un colega de la Universidad de Boston, Charles Willis, le había preguntado a Shimony si estaría dispuesto a dirigir la tesis doctoral a un nuevo estudiante, Michael Horne, sobre un tema de mecánica estadística. Shimony aceptó ver al estudiante, pero no tenía demasiadas ganas de dirigir un trabajo de tesis en su primer año de enseñanza en la Universidad de Boston. En cualquier caso, dijo, no podía sugerirle

ningún buen problema en mecánica estadística. Pero, pensando que Horne podría encontrar algún problema interesante en los fundamentos de la mecánica cuántica, le pasó el artículo de Bell. Como dijo Shimony, «Horne era suficientemente brillante para ver rápidamente que el problema de Bell era interesante». Michael Horne se llevó el artículo de Bell para estudiarlo en casa y empezó a trabajar en el diseño de un experimento que usaría el teorema de Bell.

Sin que lo supieran los dos físicos de Boston, en la Universidad de Columbia de Nueva York, John F. Clauser leyó ese mismo artículo de Bell. También él se vio misteriosamente atraído por el problema sugerido por Bell y se dio cuenta de la oportunidad de un experimento real. Clauser había leído el artículo de Einstein, Podolsky y Rosen, y creía que la sugerencia de éstos era muy plausible. El teorema de Bell mostraba una discrepancia entre la mecánica cuántica y la interpretación en función de «variables ocultas locales» ofrecida por Einstein y sus colaboradores como alternativa a la «incompleta» teoría cuántica, y Clauser estaba excitado ante la posibilidad de un experimento que explotara esa discrepancia. Clauser era escéptico, pero no podía resistir la tentación de verificar las predicciones de Bell. Él era un estudiante graduado, y todas las personas con las que hablaba le decían que dejara eso en paz, obtuviera su grado de doctor y no hurgara en la ciencia ficción. Pero Clauser tenía mejores ideas. La clave de la mecánica cuántica se hallaba escondida en el artículo de Bell, y él estaba dispuesto a encontrarla.

Al otro lado del Atlántico, algunos años después, Alain Aspect trabajaba con frenesí en su laboratorio en el sótano del Centro de Investigaciones Ópticas de la Universidad de París en Orsay. Se afanaba en poner a punto un ingenioso experimento que probaría que dos fotones, en lados opuestos de su laboratorio, podrían, instantáneamente, afectar el uno al otro. Aspect llegó a estas ideas a partir del mismo abstruso artículo de John Bell.

En Ginebra, Nicolas Gisin conoció a John Bell, leyó sus artículos y meditó asimismo sobre sus ideas. Él también participaba en la competición por encontrar una respuesta a la misma cuestión crucial: una cuestión que tenía profundas implicaciones sobre la auténtica naturaleza de la realidad. Pero estamos adelantando acontecimientos. La historia de las ideas de Bell, que se retrotrae a una sugerencia hecha 35 años antes por Albert Einstein, tiene su origen en la búsqueda por parte del género humano del conocimiento del mundo físico. Y para entender de verdad estas profundas ideas debemos regresar al pasado.

Capítulo 2

Antes del principio

Ahí fuera estaba este inmenso mundo, que existe independientemente de nosotros, seres humanos, y que permanece ante nosotros como un grande y eterno acertijo, parcialmente accesible al menos a nuestra inspección.

ALBERT EINSTEIN

La matemática de la mecánica cuántica no presenta dificultad, pero es muy difícil establecer la conexión entre la matemática y una imagen intuitiva del mundo físico.

CLAUDE N. COHEN-TANNOUJJI

En el Génesis leemos: «Dijo Dios: hágase la luz». Dios creó entonces el cielo y la tierra y todo lo que hay entre ellos. La búsqueda por parte de la humanidad de la comprensión de la luz y de la materia se retrotrae a los orígenes de la civilización; éstos son los elementos más básicos de la experiencia humana. Y, como Einstein nos

mostró, esos dos elementos son sólo uno: ambos, luz y materia, son formas de la energía. Todo el mundo se ha esforzado siempre por comprender lo que significan estas formas de la energía: cuál es la naturaleza de la materia y qué es la luz.

Los antiguos egipcios y babilonios, y sus sucesores los fenicios y los griegos, trataron de comprender los misterios de la materia, la luz, la visión y el color. Los griegos observaron el mundo con la primera perspectiva intelectual moderna. Con su curiosidad por los números y la geometría, y con su profundo deseo de comprender el funcionamiento interno de la naturaleza, dieron al mundo las primeras ideas sobre la física y la lógica.

Para Aristóteles (300 a. C.), el Sol era un círculo perfecto, sin manchas ni imperfecciones. Eratóstenes (276-194 a. C.) estimó la longitud de la circunferencia de nuestro planeta midiendo el ángulo formado por la luz del Sol entre Siena (actualmente Asuán), en el Egipto superior, y Alejandría, más al norte. Llegó a un resultado asombrosamente cercano a la circunferencia real de la tierra, unos cuarenta mil kilómetros.

Los filósofos griegos Aristóteles y Pitágoras escribieron sobre la luz y sus propiedades percibidas, fascinados por este fenómeno. Pero fueron los fenicios los primeros en fabricar lentes de cristal, que les permitían aumentar el tamaño de los objetos y focalizar los rayos luminosos. Los arqueólogos han encontrado cristales de aumento de hace tres mil años en la región del Mediterráneo oriental donde entonces estaba Fenicia. Curiosamente, el principio que permite el

funcionamiento de una lente es el frenado de la luz cuando viaja a través del cristal.

Los romanos aprendieron de los fenicios a trabajar el vidrio, y desarrollaron una de las industrias más importantes del mundo antiguo. El vidrio romano era de alta calidad y se empleaba incluso para hacer prismas. Séneca (5 a. C.-45 d. C.) fue el primero en describir un prisma y la descomposición de la luz blanca en sus colores componentes. Este fenómeno también está basado en la velocidad de la luz. No tenemos ninguna evidencia de que en la antigüedad se realizaran experimentos para determinar la velocidad de la luz. Parece ser que los pueblos antiguos creían que la luz se movía instantáneamente de un lugar a otro. Como la luz es tan rápida, no podían detectar los retardos infinitesimales cuando ésta viaja desde su origen a su destino. El primer intento de estudiar la velocidad de la luz no se produjo hasta mil seiscientos años después (de Séneca).

Galileo fue la primera persona, que se sepa, que intentó estimar la velocidad de la luz. Una vez más, la experimentación con la luz tenía una relación muy estrecha con la fabricación de vidrio. Después de la caída del Imperio Romano en el siglo V, muchos romanos, artesanos y patricios, huyeron a las lagunas del Véneto y fundaron la república de Venecia. Llevaron consigo el arte de la fabricación del vidrio, y así empezaron esos trabajos en la isla de Murano. Los telescopios de Galileo eran de una calidad tan alta —mucho mejor, de hecho, que los primeros telescopios fabricados en Holanda— porque usó lentes hechas de cristal de Murano. Fue con la ayuda de

esos telescopios como descubrió las lunas de Júpiter y los anillos de Saturno y determinó que la Vía Láctea es un gran conjunto de estrellas.

En 1607 Galileo dirigió un experimento en dos colinas de Italia, en el que se destapaba una linterna en una colina; cuando un asistente situado en la cima de otra colina veía la luz, encendía su propia linterna. La persona de la primera colina trataba de estimar el tiempo entre el encendido de la primera linterna y la visión del retorno de la luz desde la segunda. El pintoresco experimento de Galileo fracasó, sin embargo, debido a la minúscula fracción de tiempo entre el envío de la señal de la primera linterna y el regreso de la luz desde la otra colina. Hay que advertir de todos modos que la mayor parte de este intervalo temporal se debía más al tiempo de respuesta humana en la acción de destapar la segunda linterna que al tiempo real empleado por la luz para recorrer esa distancia.

Casi setenta años después, en 1676, el astrónomo danés Olaf Römer fue el primer científico que calculó la velocidad de la luz. Esto lo realizó usando observaciones de las lunas de Júpiter, descubiertas por Galileo. Römer ideó un intrincado y extremadamente inteligente esquema mediante el cual tomaba nota de los tiempos de los eclipses de las lunas de Júpiter. Él sabía que la Tierra giraba alrededor del Sol, y que por consiguiente la Tierra estaría en diferentes posiciones en el espacio respecto de Júpiter y sus lunas. Römer observó que los tiempos de desaparición de las lunas de Júpiter detrás del planeta no estaban uniformemente espaciados. A medida que la Tierra y Júpiter giran alrededor del Sol,

su distancia mutua varía. En consecuencia, la luz que nos trae información de un eclipse de una luna joviana emplea diferentes intervalos temporales en llegar a la Tierra. A partir de esas diferencias y usando su conocimiento de las órbitas de la Tierra y de Júpiter, Römer fue capaz de calcular la velocidad de la luz. Su estimación, unos doscientos veinticinco mil kilómetros por segundo, no era ciertamente el valor real de trescientos mil kilómetros por segundo. No obstante, considerando la fecha del descubrimiento y el hecho de que la precisión en la medida del tiempo no era muy grande en el siglo XVII, este logro —la primera medida de la velocidad de la luz y la primera prueba de que ésta no viaja a velocidad infinita— constituye un valioso hito en la historia de la ciencia.

Descartes escribió sobre óptica en 1638 en su libro *Dióptrica*, estableciendo las leyes de la propagación de la luz: las leyes de la reflexión y de la refracción. Su trabajo contiene la semilla de la idea más controvertida en el campo de la física: el éter. Descartes avanzó la hipótesis de que la luz se propaga a través de un medio, al que llamó éter. La ciencia no se despojaría del éter durante otros trescientos años, hasta que la teoría de la relatividad de Einstein le asestara un golpe mortal.

Christian Huygens (1629-1695) y Robert Hooke (1635-1703) propusieron la teoría de que la luz es una onda. Huygens, cuyos estudios a los dieciséis años habían sido tutelados por Descartes durante la estancia de éste en Holanda, llegó a ser uno de los mayores pensadores de la época. Desarrolló el primer reloj de

péndulo e hizo otros trabajos en mecánica. Su logro más notable, si embargo, fue una teoría acerca de la naturaleza de la luz. Huygens interpretó que el descubrimiento de Römer de la velocidad finita de la luz implicaba que la luz debe ser una onda que se propaga a través de algún medio, y construyó toda su teoría sobre esta hipótesis. Huygens visualizó ese medio como el éter, compuesto de un número inmenso de minúsculas partículas. Cuando estas partículas eran excitadas hasta vibrar, producían ondas luminosas. En 1692, Isaac Newton (1642-1727) acabó su libro *Óptica* sobre la naturaleza y propagación de la luz. El libro se perdió tras un incendio en su casa, así que Newton lo reescribió para su publicación en 1704. Este libro lanzaba un mordaz ataque a la teoría de Huygens, y argüía que la luz no era una onda, sino que, por el contrario, se componía de partículas minúsculas que viajaban a velocidades dependientes del color de la luz. Según Newton, hay siete colores en el arco iris: rojo, amarillo, anaranjado, verde, azul, añil y violeta. Cada color tiene su propia velocidad de propagación. Newton dedujo sus siete colores por analogía con los siete intervalos principales de la octava musical. En ediciones posteriores de este libro Newton prosiguió con los ataques a las teorías de Huygens, intensificándose los debates sobre si la luz es una partícula o una onda. Sorprendentemente, Newton, que codescubrió el cálculo y fue uno de los más grandes matemáticos de todos los tiempos, jamás dedicó atención alguna a los hallazgos de Römer sobre la velocidad de la luz y nunca prestó a la teoría ondulatoria la atención que merecía.

Pero Newton, construyendo sobre los cimientos establecidos por Descartes, Galileo, Kepler y Copérnico, dio al mundo la mecánica clásica y, a través de ella, el concepto de causalidad. La segunda ley de Newton afirma que la fuerza es igual a la masa por la aceleración: $F = ma$. La aceleración es la derivada segunda de la posición (es la tasa, o ritmo, de cambio de la velocidad, y a su vez la velocidad es la tasa de cambio de la posición). La ley de Newton es, por tanto, una ecuación con una derivada (segunda). Se la llama una ecuación diferencial (de segundo orden). Las ecuaciones diferenciales son muy importantes en física porque modelan el cambio. Las leyes del movimiento de Newton son una declaración sobre la *causalidad*. Tratan de causa y efecto. Si sabemos la posición y la velocidad de un cuerpo, y conocemos la intensidad y dirección de la fuerza que actúa sobre él, seremos capaces de determinar dónde estará dicho cuerpo en cualquier instante posterior.

La bella teoría de la mecánica newtoniana puede predecir el movimiento de caída de los cuerpos, así como las órbitas de los planetas. Podemos usar estas relaciones causa-efecto para predecir adónde irá un objeto. La teoría de Newton es un enorme edificio que explica cómo cuerpos grandes —cosas que conocemos de la experiencia cotidiana— pueden moverse de un sitio a otro, mientras que sus velocidades o sus masas no sean demasiado grandes. Para velocidades cercanas a la de la luz, o para masas de una magnitud del orden de las estrellas, la teoría correcta es la relatividad general de Einstein y la mecánica newtoniana pierde su validez. Debe

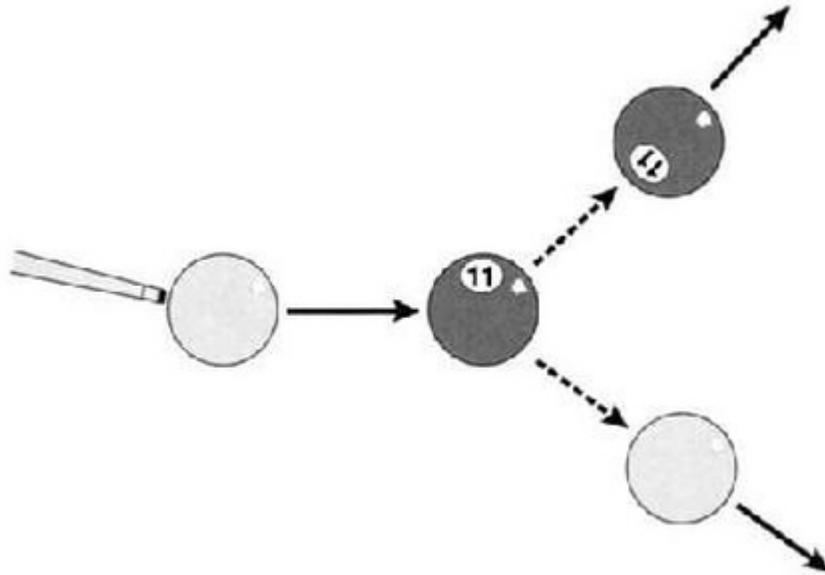
señalarse, no obstante, que las teorías de la relatividad especial y general de Einstein son válidas, e incluso mejores que la de Newton, incluso en situaciones donde la mecánica newtoniana constituye una buena aproximación.

Del mismo modo, para objetos muy pequeños —electrones, átomos, fotones— la teoría de Newton deja asimismo de ser aplicable. Con ello también perdemos el concepto de causalidad. El universo cuántico no posee la estructura causa-efecto que conocemos en la vida cotidiana. A propósito, para esas partículas pequeñas que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz, la teoría correcta es la mecánica cuántica *relativista*.

Uno de los principios más importantes de la física clásica, muy relevante para nuestra historia, es el principio de conservación del momento. Los principios de conservación de las cantidades físicas los conocen los físicos desde hace más de tres siglos. En su libro *Principia*, de 1687, Newton presentó sus leyes de conservación de la masa y del momento. En 1840, el físico alemán Julius Robert Mayer (1812-1878) dedujo que la energía también se conservaba. Mayer trabajaba como cirujano de un barco en ruta de Alemania a Java. Mientras curaba a los miembros de la tripulación del barco de diversas dolencias en el trópico, el Dr. Mayer observó que la sangre que manaba de sus heridas era más roja que la que había visto en Alemania. Mayer tenía noticia de la teoría de Lavoisier acerca de que el calor del cuerpo proviene de la oxidación de azúcar en los tejidos corporales usando oxígeno de la sangre. Razonó entonces que en el cálido trópico el cuerpo humano necesitaba producir menos calor

que en la zona más fría del norte de Europa y que, por lo tanto, quedaba más oxígeno en la sangre de la gente de los trópicos, lo cual hacía la sangre más roja. Usando argumentos acerca de cómo el cuerpo interactúa con el entorno —dando y recibiendo calor—, Mayer postuló que la energía se conserva. Esta idea fue deducida experimentalmente por Joule, Kelvin y Carnot. Antes, Leibniz había descubierto que la energía cinética puede convertirse en energía potencial, y viceversa.

La energía en cualquiera de sus formas (incluyendo la masa) se conserva, esto es, no puede crearse de la nada. Lo mismo es cierto para el momento, el momento angular y la carga eléctrica. La conservación del momento es muy importante para nuestra historia. Supóngase que una bola de billar en movimiento golpea otra en reposo. La bola móvil tiene un *momento* particular asociado, el producto de su masa por su velocidad, $p = mv$. Este producto, el momento de la bola de billar, debe conservarse en el sistema. Cuando una bola golpea la otra, su velocidad disminuye, pero la bola golpeada también se mueve. El producto de la velocidad por la masa para el sistema de esos dos objetos ha de ser el mismo que el correspondiente al sistema antes de la colisión (la bola en reposo tenía momento nulo, así que es el momento de la móvil lo que se divide entre dos). Esto puede verse en la figura siguiente, donde, tras la colisión, las dos bolas viajan en distintas direcciones.



En todo proceso físico, el momento total de entrada es igual al momento total de salida. Este principio, al aplicarse en el mundo de lo muy pequeño, tendrá consecuencias que trascienden esta simple e intuitiva idea de conservación. En mecánica cuántica, dos partículas que interactúan en el mismo punto —en sentido parecido al de las dos bolas de billar del ejemplo— permanecerán enlazadas entre sí, pero aún más que las bolas de billar: lo que le suceda a una de ellas, no importa lo lejos que pueda estar de su gemela, afectará inmediatamente a esta última.

Capítulo 3

El experimento de Thomas Young

Escogemos el examen de un fenómeno (el experimento de la doble rendija) que es imposible, absolutamente imposible, explicar de ninguna manera clásica y que está en el corazón de la mecánica cuántica. En realidad, contiene el único misterio.

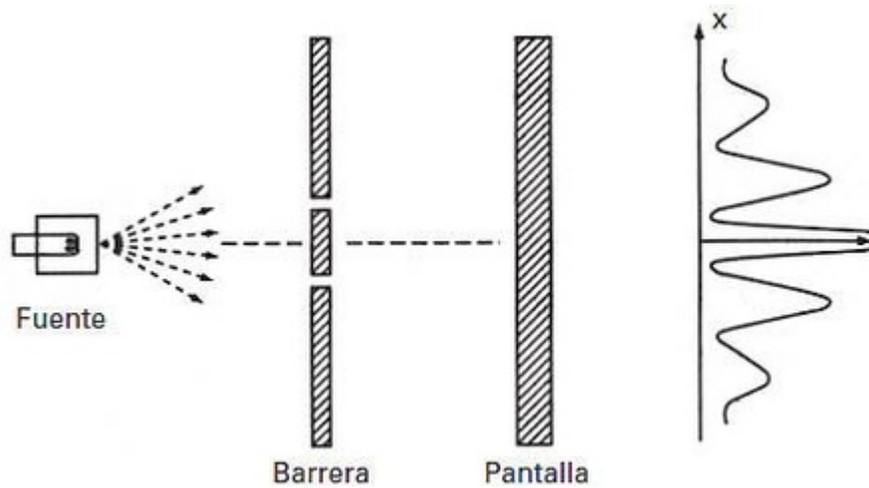
RICHARD FEYNMAN

Thomas Young (1773-1829) fue un médico y físico británico cuyo experimento cambió la manera de considerar la luz. Young fue un niño prodigio que aprendió a leer con dos años y a la edad de seis había leído dos veces la Biblia y había aprendido latín. Antes de cumplir los diecinueve años dominaba trece lenguas, entre las que se contaban el griego, francés, italiano, hebreo, caldeo, sirio, samaritano, persa, etíope, árabe y turco. Estudió el cálculo de Newton y sus trabajos sobre mecánica cuántica y óptica, así como los *Elementos de química* de Lavoisier. También leyó obras de teatro, estudió derecho y se versó en política.

En los últimos años del siglo XVIII Young estudió medicina en Londres, Edimburgo y Gotinga, donde obtuvo su título de doctor en medicina. En 1794 fue elegido miembro de la Royal Society. Tres

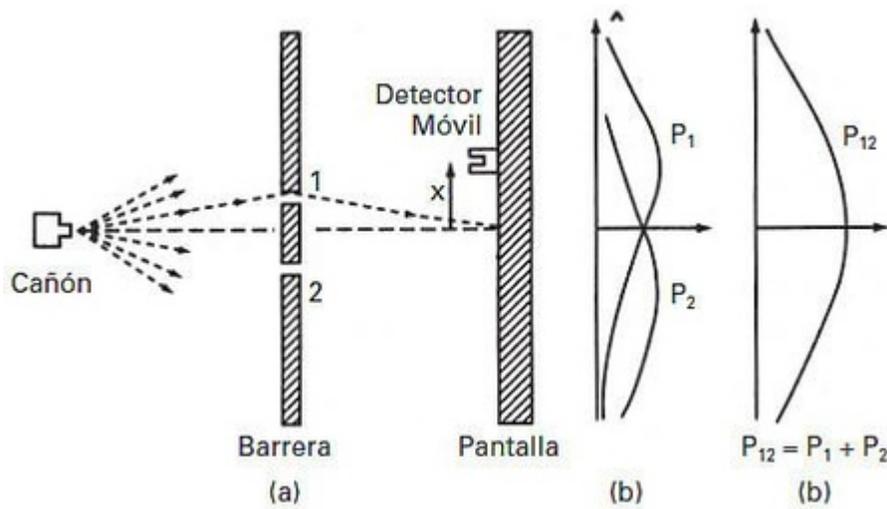
años más tarde se desplazó a la Universidad de Cambridge, donde recibió un segundo título de doctor en medicina y formó parte del Real Colegio de Médicos. Más tarde, cuando una tía rica le dejó en herencia una casa en Londres y una gran suma de dinero, Young se trasladó a la capital y puso allí un consultorio médico. No fue un médico de éxito, sino que más bien dedicó su energía al estudio y a la experimentación científica. Estudió la visión y nos legó la teoría de que el ojo contiene tres tipos de receptores para la luz de los tres colores básicos: rojo, azul y verde. Contribuyó a la filosofía natural, a la óptica fisiológica, y fue uno de los primeros en traducir los jeroglíficos egipcios. Su mayor contribución a la física fue su esfuerzo por conseguir que se aceptase la naturaleza ondulatoria de la luz. Young llevó a cabo el ahora famoso experimento de la doble rendija con luz, demostrando el efecto de interferencia de la teoría ondulatoria.

En su experimento, Young tenía una fuente luminosa y una barrera. Cortó dos rendijas en la barrera, a través de las cuales podía pasar la luz de la fuente. Colocó entonces una pantalla detrás de la barrera. Cuando proyectó la luz de la fuente sobre la barrera con las dos rendijas obtuvo un patrón de *interferencia*.



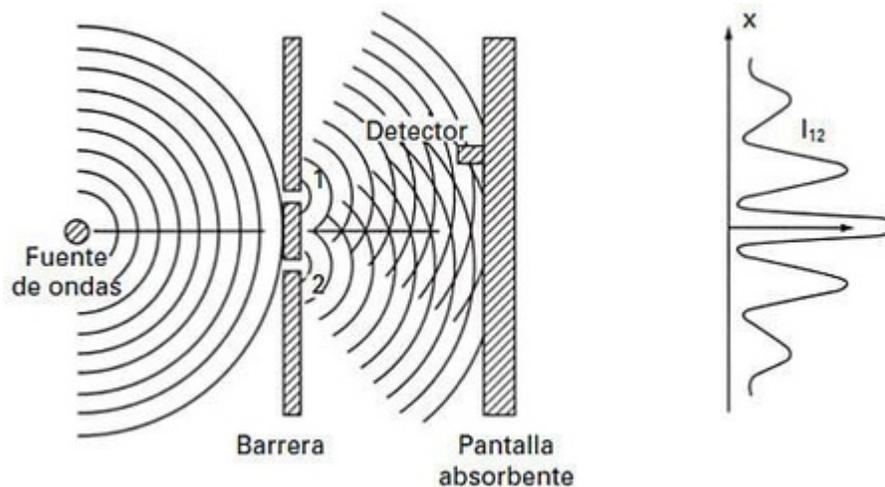
Un patrón de interferencia es la seña de identidad de las ondas. Éstas interfieren entre sí, mientras que las partículas no lo hacen. Richard Feynman consideró tan importante el resultado del experimento de la doble rendija de Young —tal como se manifiesta en el caso de electrones y otros cuantos que pueden localizarse— que dedicó gran parte del primer capítulo de su famoso libro *The Feynman lectures on physics* a este tipo de experimento.⁵ Creía que el resultado de dicho experimento constituía el misterio fundamental de la mecánica cuántica. Feynman mostró en sus *lectures* la idea de la interferencia de ondas frente a la no interferencia de las partículas usando proyectiles. Supóngase que un cañón lanza proyectiles al azar sobre una barrera con dos rendijas. El patrón es como muestra la figura inferior.

⁵ Richard P. Feynman, *The Feynman lectures*, vol. III, Addison-Wesley, Reading, MA, 1963.



Las ondas de agua, al pasar a través de una barrera con dos rendijas, forman el patrón de la figura siguiente. Aquí encontramos interferencia, como en el experimento de Young con luz, porque tenemos ondas clásicas. Las amplitudes de dos ondas pueden sumarse, y producir un pico en la pantalla, o pueden interferir destructivamente, y producir una depresión.

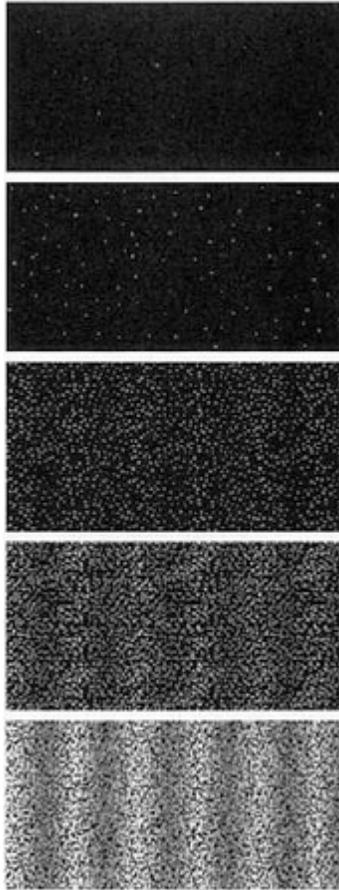
De modo que el experimento de Young demuestra que la luz es una onda. ¿Pero es la luz realmente una onda?



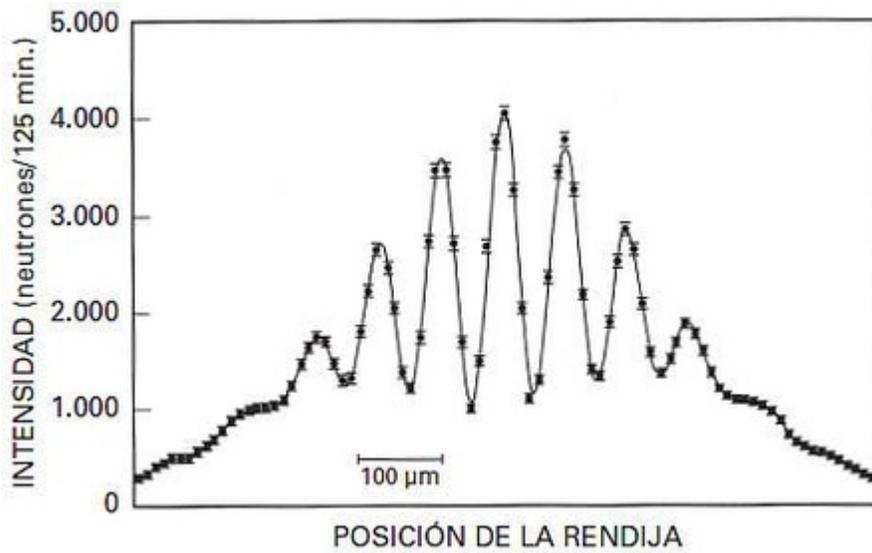
La dualidad entre luz como onda y luz como corriente de partículas permanece como una importante faceta de la física del siglo XXI. La mecánica cuántica, desarrollada en los años veinte y treinta del siglo pasado, refuerza de hecho el punto de vista de que la luz es a la vez partícula y onda. El físico francés Louis de Broglie arguyó en 1924 que incluso objetos físicos como los electrones y otras partículas poseen propiedades ondulatorias. Los experimentos demostraron que tenía razón. Einstein, al explicar el efecto fotoeléctrico en 1905, avanzó la teoría de que la luz estaba formada por partículas, justamente como había supuesto Newton. La partícula de luz de Einstein se denomina ahora «fotón», nombre derivado de la palabra griega para designar la luz. Según la teoría cuántica, la luz puede ser a la vez partícula y onda, y esta dualidad —y aparente paradoja— es uno de los pilares de la física moderna. Misteriosamente, la luz exhibe *a la vez* fenómenos característicos de las ondas, como interferencia y difracción, y fenómenos típicos de las partículas, localizadas en su interacción con la materia. Dos rayos de luz interfieren de modo muy parecido al de las ondas sonoras emitidas por dos altavoces estéreo, por ejemplo. Por otra parte, la luz interactúa con la materia como sólo pueden hacerlo las partículas, como sucede en el efecto fotoeléctrico. El experimento de Young mostró que la luz es una onda. Pero también sabemos que la luz es, de alguna manera, una partícula: un fotón. En el siglo XX se repitió el experimento de Young con luz muy débil, producida fotón a fotón. De este modo, era muy improbable que se encontraran

varios fotones al mismo tiempo dentro del dispositivo experimental. Sorprendentemente, apareció el *mismo patrón de interferencia* cuando pasó el tiempo suficiente para que los fotones, que llegaban uno a uno, se acumularan en la pantalla. ¿Con qué interfería el fotón si estaba *solo* en el aparato? La respuesta parecía ser: consigo mismo. En cierto sentido, el fotón pasaba a través de *ambas* rendijas, no de una de ellas, y, cuando aparecía en el otro lado, interfería consigo mismo.

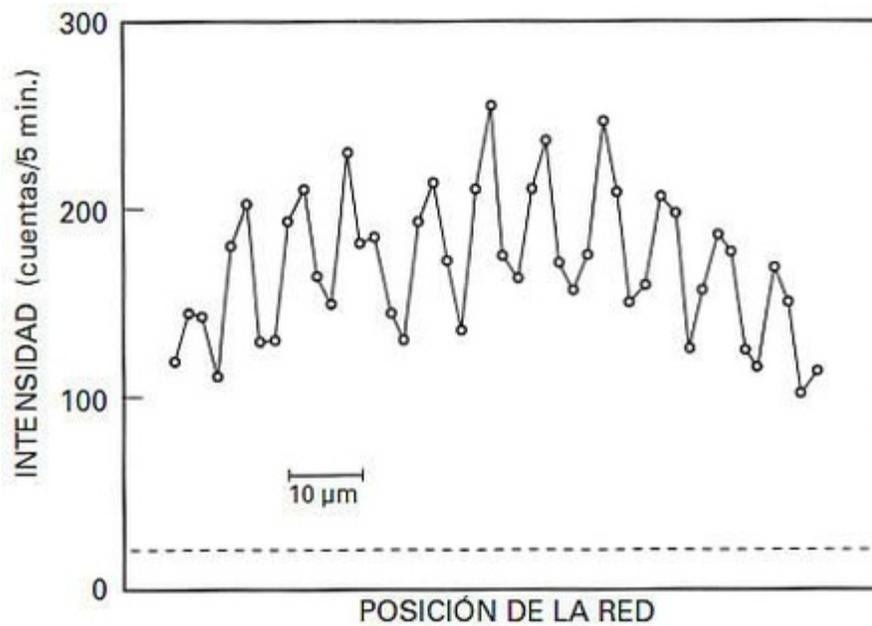
El experimento de Young ha sido llevado a cabo con muchos entes que consideramos como partículas: electrones, desde los años cincuenta; neutrones, desde los setenta; y átomos, desde los ochenta. En todos los casos se da el mismo patrón de interferencia. Estos hallazgos demostraron la validez del principio de De Broglie, según el cual las partículas muestran también fenómenos ondulatorios. Por ejemplo, en 1989, A. Tonomura y sus colaboradores realizaron un experimento de doble rendija con electrones. Los resultados se revelan en la figura siguiente, y muestran claramente un patrón de interferencia.



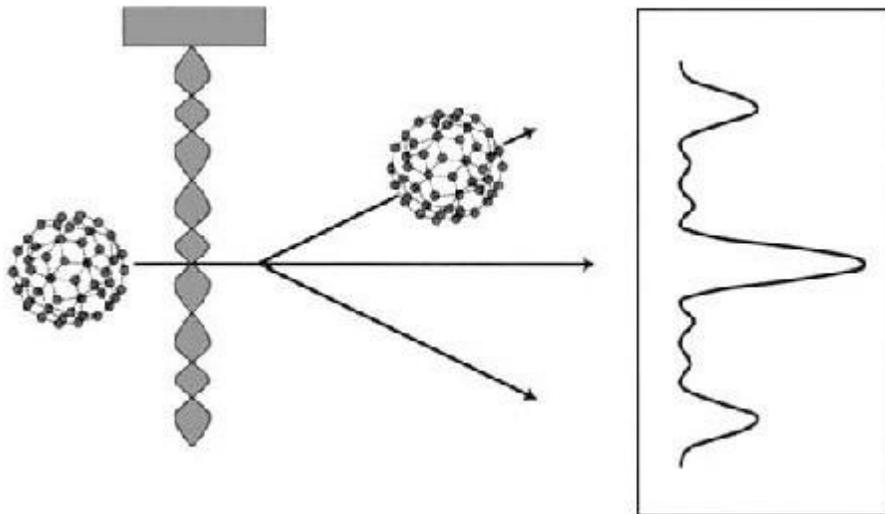
Anton Zeilinger y sus colaboradores demostraron la existencia del mismo patrón para neutrones, que viajaban a sólo 2 km por segundo, en 1991. Los resultados se muestran en la siguiente figura.



El mismo patrón se mostró con átomos. Esto demuestra que la dualidad entre partículas y ondas se manifiesta incluso en entes mayores.



Anton Zeilinger y sus colegas de la Universidad de Viena, donde habían trabajado Schrödinger y Mach, dieron un paso adelante. Extendieron nuestro conocimiento de los sistemas cuánticos a entidades que ya no se asociarían necesariamente con el mundo de lo muy pequeño. (Aunque debe señalarse que los físicos conocen sistemas macroscópicos, como los superconductores, que se comportan mecánico-cuánticamente). Un fullereno es una molécula de sesenta o setenta átomos de carbono colocados en una estructura que recuerda una cúpula geodésica. Buckminster Fuller hizo famosas tales cúpulas, y dicha molécula lleva su nombre. Una molécula de sesenta átomos es un ente relativamente grande comparada con un átomo. Y no obstante, apareció el mismo misterioso patrón de interferencia cuando Zeilinger y sus colegas realizaron el experimento. El dispositivo es el siguiente:



En todos los casos vemos que las partículas se comportan como ondas. Estos experimentos también se han llevado a cabo partícula

a partícula, y el patrón de interferencia ha seguido. ¿Con qué interferían estas partículas? La respuesta es que, en cierto sentido, cada partícula no pasaba a través de una rendija, sino más bien a través de *ambas*, y entonces la partícula «interfería consigo misma». Estamos aquí ante una manifestación del *principio cuántico de superposición de estados*.

El principio de superposición establece que puede componerse un nuevo estado del sistema a partir de dos o más estados del mismo, de manera tal que el nuevo estado comparte alguna de las propiedades de cada uno de los estados combinados. Si A y B otorgan dos propiedades diferentes a una partícula, tales como estar en dos sitios distintos, la superposición de estados, que se expresa como $A + B$, tiene algo en común con el estado A y con el estado B. En concreto, la partícula tendrá probabilidades no nulas de estar en cada uno de los dos estados, pero no en algún otro lugar, si se observa la posición de la misma.

En el caso del experimento de la doble rendija, el dispositivo experimental suministra a la partícula una clase concreta de superposición: se halla en el estado A cuando pasa a través de la rendija A y en el estado B cuando lo hace a través de la rendija B. La superposición de estados es una combinación de «la partícula pasa por la rendija A» con «la partícula pasa por la rendija B». Esta superposición de estados se expresa como $A + B$. Los dos caminos

están combinados y hay, por lo tanto, dos probabilidades no nulas, si se observa la partícula. Dado que la partícula ha de observarse cuando atraviesa el dispositivo experimental, tendrá un 50 por 100 de probabilidad de ser observada pasando por la rendija A y un 50 por 100 por la rendija B. Pero si no se observa la partícula cuando está atravesando el dispositivo experimental, sino sólo al final, cuando llega a la pantalla, la superposición se mantiene hasta ese instante final. En cierto sentido, entonces, la partícula ha pasado por ambas rendijas, y en el momento en que llega al final del dispositivo experimental interfiere consigo misma. La superposición de estados es el mayor misterio de la mecánica cuántica. El principio de superposición encierra en sí mismo la idea de entrelazamiento.

¿Qué es el entrelazamiento?

El entrelazamiento es una aplicación del principio de superposición a un sistema compuesto consistente en dos (o más) subsistemas. Aquí, un subsistema es una sola partícula. Veamos qué significa que dos partículas estén entrelazadas. Supongamos que una partícula puede hallarse en uno de los dos estados, A o B, y que tales estados representan propiedades incompatibles, como, por ejemplo, estar en dos lugares distintos. El estado AB se denomina estado producto. Cuando el sistema completo se halla en el sistema AB, sabemos que la partícula 1 se halla en el estado A y la 2 en el B. Análogamente, el estado CD del sistema completo significa que la partícula 1 se halla en el estado C y la 2 en el D.

Consideremos ahora el estado $AB + CD$. Obtenemos tal estado aplicando el principio de superposición al sistema completo (de las dos partículas). El principio de superposición permite que el sistema se halle en una combinación tal de estados, y el estado $AB + CD$ del sistema completo se denomina *estado entrelazado*. Mientras que el estado producto AB (y análogamente CD) otorga propiedades definidas a las partículas 1 y 2 (significando, por ejemplo, que la 1 está en la posición A y la 2 en la B), el estado entrelazado, al ser una superposición, no lo hace. Esto sólo significa que hay posibilidades concernientes a las partículas 1 y 2 que están correlacionadas, en el sentido de que si se toman medidas y si la partícula 1 se halla en el estado A, entonces la 2 debe hallarse en B; y análogamente, si la 1 se halla en el estado C, entonces la 2 se hallará en el D.

De alguna manera, se está diciendo que cuando las partículas 1 y 2 están entrelazadas no hay modo de caracterizar una de ellas sin referirse también a la otra. Esto es así aunque podamos referirnos a cada una de ellas por separado cuando ambas se encuentran en el estado producto AB o CD (pero no cuando están en la superposición $AB + CD$). Es la superposición de dos estados producto lo que da lugar al entrelazamiento.

Capítulo 4

La constante de Planck

Planck había avanzado una nueva idea, antes inimaginable: la de la estructura atomística de la energía.

ALBERT EINSTEIN

La teoría cuántica, con sus extrañas consecuencias, nació en 1900, treinta y cinco años antes de que Einstein y sus colegas sacaran a la luz la cuestión del entrelazamiento. Se atribuye el nacimiento de la teoría cuántica al trabajo de un único individuo, Max Planck.

Max Planck nació en Kiel (Alemania) en 1858. Procedía de una larga estirpe de pastores protestantes, juristas y eruditos. Su abuelo y su bisabuelo fueron profesores de teología en la Universidad de Gotinga. Su padre, Wilhelm J. J. Planck, fue profesor de derecho en Kiel, e inspiró en su hijo un profundo sentido del conocimiento y del aprendizaje. Max fue su sexto hijo. La madre de Planck provenía de una antigua tradición de pastores protestantes. Era una familia acomodada y pasaba las vacaciones todos los años en las playas del mar Báltico y viajando por Italia y Austria. La familia tenía puntos de vista liberales y, contrariamente a muchos alemanes de su época, se oponía a la política de Bismarck. Max Planck se consideraba incluso más liberal que su familia.

Max fue un buen estudiante, sin llegar a excelente; nunca fue uno de los mejores de su clase, aunque sus calificaciones eran generalmente satisfactorias. Mostraba talento para los idiomas, la música y las matemáticas, pero nunca le importó mucho la física ni sobresalió en ella. Era un estudiante concienzudo y trabajaba duro, pero no parecía genial. Era un pensador lento y metódico que nunca daba respuestas rápidas. Cuando empezaba a trabajar en algo, le resultaba difícil abandonar el asunto y cambiar a otra cosa. En los estudios de bachillerato, tuvo más de alumno aplicado que de inteligencia natural. Decía con frecuencia que, por desgracia, no poseía el don de reaccionar rápidamente al estímulo intelectual, y se sorprendía siempre de que otros pudieran seguir varias líneas de trabajo intelectual. Era tímido, pero caía bien a sus profesores y a sus compañeros de clase. Se consideraba una persona ética, leal a sus deberes, perfectamente honesto y puro de conciencia. En el *gymnasium* (instituto), un profesor le animó a investigar la relación armoniosa que él creía que existía entre las matemáticas y las leyes de la naturaleza. Esto impulsó a Max Planck a estudiar física, lo que hizo tras entrar en la Universidad de Múnich.

En 1878, Planck escogió la termodinámica como tema de su tesis doctoral, que acabó en 1879. La tesis trataba sobre dos principios de la termodinámica clásica: la conservación de la energía y el crecimiento de la entropía con el tiempo, que caracterizan todos los procesos físicos. Planck extrajo algunos resultados concretos de los principios de la termodinámica y añadió una importante premisa: un equilibrio estable se obtiene en un punto de entropía máxima.

Puso énfasis en que la termodinámica puede producir buenos resultados sin necesidad de dependencia alguna de la hipótesis atómica. Así pues, un sistema podría estudiarse basándose en sus propiedades macroscópicas sin que el científico tuviera que preocuparse de lo que les sucede o deja de suceder a componentes diminutos de dicho sistema: átomos, moléculas, electrones...

Los principios de la termodinámica son extremadamente importantes en física porque tratan de la energía de sistemas completos. Estos principios pueden emplearse para determinar la salida de una máquina interna de combustión, por ejemplo, y tienen una amplia aplicabilidad en ingeniería y otras áreas. Dado que los de energía y entropía son conceptos clave en física, podría pensarse que el trabajo de Planck recibió una buena acogida en su momento. Pero no fue así. Los profesores de Múnich y de Berlín —donde Planck había estudiado durante un año— no se impresionaron por su trabajo. No lo consideraron suficientemente importante como para merecer elogio o reconocimiento. Un profesor ignoró a Planck, de modo que éste no pudo dejarle una copia de su tesis doctoral cuando estaba preparando su defensa. Llegado el momento, Planck obtuvo el título de doctor y fue bastante afortunado al conseguir un puesto de profesor asociado en la Universidad de Kiel, donde su padre conservaba amigos que podían ayudarle. Tomó posesión de esa plaza en 1885 e inmediatamente trató de reivindicar tanto su trabajo como la termodinámica en su conjunto. Participó en una competición organizada en Gotinga a fin de definir la naturaleza de la energía. El primer premio quedó desierto y el trabajo de Planck

obtuvo un segundo premio. Enseguida advirtió que habría ganado si en su artículo no hubiera criticado a uno de los profesores de Gotinga. No obstante, su trabajo causó buena impresión a algunos profesores de física de la Universidad de Berlín y en 1889 le ofrecieron un puesto de profesor asociado en dicha universidad.

En su momento, el mundo de la física teórica llegó a apreciar el interés de los principios termodinámicos con su tratamiento de los conceptos de energía y entropía, y el trabajo de Planck se hizo más popular. Sus colegas en Berlín, de hecho, pedían prestada su tesis doctoral tan a menudo que el manuscrito empezó a desencuadernarse. En 1892 Planck fue ascendido a catedrático en Berlín y en 1894 se convirtió en miembro numerario de la Academia de Ciencias de Berlín.

A finales del siglo XIX, la física se consideraba una disciplina completa, dentro de la cual se habían dado explicaciones satisfactorias a los fenómenos y resultados experimentales. Estaba la mecánica, la teoría que había iniciado Galileo con su célebre experimento del lanzamiento de cuerpos desde lo alto de la torre de Pisa y había perfeccionado el genio de Isaac Newton a comienzos del siglo XVIII, casi dos siglos antes de la época de Planck. La mecánica y la teoría de la gravitación, que camina junto a la primera, tratan de explicar el movimiento de objetos, desde los de tamaño cotidiano hasta los de tamaño de la Luna y los planetas. Explica cómo se mueven los objetos; que la fuerza es el producto de la masa y la aceleración; que los objetos móviles tienen inercia, y que la Tierra ejerce una atracción gravitatoria sobre todos los objetos. Newton

nos enseñó que la órbita de la Luna alrededor de la Tierra es de hecho una «caída» constante de aquélla hacia ésta, causada por la fuerza gravitacional que una ejerce sobre la otra.

La física incluía también la teoría de la electricidad y del electromagnetismo desarrollada por Ampère, Faraday y Maxwell. En esta teoría se introducía la idea de campo, un campo eléctrico o magnético que no puede verse, oírse ni sentirse, pero que ejerce su influencia sobre los objetos. Maxwell desarrolló unas ecuaciones que describen con precisión el campo electromagnético, concluyendo que las ondas luminosas eran ondas de dicho campo. En 1831 Faraday construyó la primera dinamo, que producía electricidad mediante el principio de la inductancia electromagnética. Haciendo rotar un disco de cobre entre los dos polos de un electroimán, consiguió producir una corriente eléctrica. En 1887, durante los años de formación de Planck, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) llevó a cabo los experimentos en los que produjo ondas de radio. Por casualidad notó que una pieza de cinc iluminada con luz ultravioleta se cargaba eléctricamente. Sin saberlo había descubierto el efecto fotoeléctrico, que enlaza la luz con la materia. Por esas fechas, Ludwig Boltzmann (1844-1906) suponía que los gases están constituidos por moléculas y estudiaba su comportamiento usando la mecánica estadística. En 1897, tuvo lugar uno de los descubrimientos científicos más importantes: J. J. Thomson demostró la existencia del electrón.

La idea de energía era crucial en todas estas partes de la física clásica. En mecánica, un medio de la masa por la velocidad al

cuadrado se definió como una medida de la energía cinética (del griego *kinesis*, movimiento); había otra clase de energía, la *energía potencial*. Una roca en lo alto de un acantilado posee energía potencial, que podría convertirse instantáneamente en cinética si se empuja un poco la roca y ésta se precipita por el acantilado. El calor es energía, como se aprende en el bachillerato. La entropía es una magnitud relacionada con el azar, y como éste siempre aumenta, de ahí surge la ley del crecimiento de la entropía.

Por tanto, era muy razonable que el mundo de la física aceptase las modestas contribuciones de Planck a las teorías de la energía y de la entropía, y esto fue lo que realmente sucedió hacia finales del siglo XIX. Planck obtuvo reconocimiento por su trabajo en termodinámica y fue nombrado catedrático de la Universidad de Berlín. Por entonces empezó a trabajar en un problema interesante, que tenía que ver con lo que se conoce como radiación del cuerpo negro. Un razonamiento lógico según las líneas de la física clásica llevaba a concluir que la radiación de un objeto caliente sería muy brillante en el extremo azul o violeta del espectro. En consecuencia, un leño ardiendo al rojo vivo en la chimenea acabaría emitiendo rayos ultravioletas, así como rayos X y rayos gamma. Pero este fenómeno, conocido como la catástrofe ultravioleta, no se da realmente en la naturaleza. Nadie sabía cómo explicar este extraño hecho, ya que la teoría predecía ciertamente esa estructura de los niveles de energía de la radiación. El 14 de diciembre de 1900 Max Planck presentó una comunicación en un encuentro de la Sociedad Alemana de Física. Las conclusiones de Planck eran tan asombrosas que incluso

a él mismo le resultaba difícil creerlas. Pero estas conclusiones proporcionaban la única explicación al hecho de que no apareciera la catástrofe ultravioleta. La tesis de Planck era que los niveles de energía están cuantizados. La energía no aumenta o disminuye continuamente, sino que es siempre múltiplo de un *cuanto* (*quantum*) básico, una cantidad que Planck denotó como h , donde h es una frecuencia característica del sistema considerado y h es una constante fundamental hoy día conocida como constante de Planck (su valor es de $6,62 \times 10^{-34}$ julios).

La ley de Rayleigh-Jeans de la física clásica implicaba que el brillo de la radiación del cuerpo negro sería ilimitado en el extremo ultravioleta del espectro, produciendo así la catástrofe ultravioleta. Pero la naturaleza no se comportaba de ese modo.

De acuerdo con la física del siglo XIX (el trabajo de Maxwell y Hertz), una carga oscilante produce radiación. La frecuencia (inversamente proporcional a la longitud de onda) de esta carga oscilante se indica por f y su energía es E . Planck propuso una fórmula para los niveles de energía de un oscilador de Maxwell-Hertz basada en su constante h .

La fórmula es:

$$E = 0, h, 2h, 3h, 4h, \dots \text{ o, en general, } nh,$$

donde n es un entero no negativo.

La fórmula de Planck funcionaba maravillosamente bien. Lograba explicar la energía y la radiación en una cavidad de cuerpo negro en

perfecto acuerdo con las curvas obtenidas en los experimentos. La razón de esto era que ahora se consideraba que la energía llegaba en paquetes discretos, algunos grandes y otros pequeños, dependiendo de la frecuencia de oscilación. Pero entonces, cuando la energía asignada a un oscilador (deducida por otros medios) era *menor* que el tamaño del paquete de energía disponible a través de la fórmula de Planck, la intensidad de la radiación caía, en vez de aumentar hasta los niveles altos de la catástrofe ultravioleta.

Planck había invocado el cuanto; desde ese momento, la física nunca sería la misma. A lo largo de las décadas posteriores, se obtuvieron numerosas confirmaciones de que el cuanto es, en efecto, un concepto real y que la naturaleza funciona realmente así, al menos en el micromundo de los átomos, moléculas, electrones, neutrones, fotones, etc.

El mismo Planck se mostró siempre algo frustrado por su propio descubrimiento. Es posible que jamás lo llegara a comprender completamente desde el punto de vista filosófico. El truco funcionaba y las ecuaciones ajustaban los datos, pero «¿Por qué el cuanto?» era una cuestión que no sólo él sino futuras generaciones de físicos y filósofos se plantearían, y continúan planteándose hoy.

Planck era un alemán patriota que creía en la ciencia alemana. Él fue decisivo para llevar a Einstein a Berlín en 1914 y promover su elección para la Academia Prusiana de Ciencias. Cuando Hitler llegó al poder, Planck intentó persuadirle de que cambiara su decisión de suprimir los puestos de académicos judíos. Pero Planck nunca abandonó su puesto como protesta, como hicieron algunos

académicos no judíos. Permaneció en Alemania, y durante toda su vida continuó creyendo en la promoción de la ciencia en su país.

Planck murió en 1947. Por entonces la teoría cuántica había madurado y experimentado un significativo desarrollo, hasta convertirse en la teoría física aceptada en el mundo de lo muy pequeño. Planck, cuyo descubrimiento de los cuantos había iniciado la revolución en la ciencia, no llegó a aceptarla completamente en su propia mente. Parecía perplejo por los descubrimientos que había hecho, y en su fuero interno siempre fue un físico clásico, en el sentido de que no participó demasiado en la revolución científica que había iniciado. Pero el mundo de la ciencia se movía hacia adelante con un tremendo ímpetu.

Capítulo 5

La escuela de Copenhague

El descubrimiento del cuanto de acción no sólo nos muestra la limitación natural de la física clásica, sino que, al arrojar nueva luz sobre el antiguo problema filosófico de la existencia objetiva de los fenómenos independientemente de nuestras observaciones, nos enfrenta con una situación desconocida hasta ahora en la ciencia natural.

NIELS BOHR

Niels Bohr nació en Copenhague en 1885, en un palacio del siglo XVI situado en la misma calle que el parlamento danés. El impresionante edificio fue propiedad de una serie de personas acaudaladas y famosas, entre ellas el rey Jorge I de Grecia dos décadas después del nacimiento de Bohr.

El palacio fue comprado por David Adler, abuelo materno de Niels, banquero y diputado del parlamento danés. La madre de Niels, Ellen Adler, provenía de una familia judía inglesa que se había establecido en Dinamarca. Por el lado paterno, Niels pertenecía a una familia que había vivido en Dinamarca durante muchas

generaciones, y que había emigrado allí a finales del siglo XVIII desde el gran ducado de Mecklenburg en la zona de Alemania de lengua danesa. El padre de Niels, Christian Bohr, era un médico y científico que fue nominado para el premio Nobel por sus investigaciones sobre respiración.

David Adler poseía también una finca en el campo a unos quince kilómetros de Copenhague, y Niels creció en un ambiente muy confortable tanto en la ciudad como en el campo. Niels fue a la escuela en Copenhague y recibió el apodo de «el gordo» porque era un muchacho grande que peleaba frecuentemente con sus amigos. Era un buen estudiante, aunque no el mejor de su clase.

Los padres de Bohr permitieron a sus hijos desarrollar completamente sus cualidades. El hermano pequeño de Niels, Harald, mostró siempre inclinación por las matemáticas y, en su momento, llegó a ser un matemático sobresaliente. Niels se reveló como un investigador curioso ya desde muy joven. Cuando todavía era estudiante, Bohr emprendió un proyecto para investigar la tensión superficial del agua observando las vibraciones de un surtidor. El proyecto estaba tan bien planeado y ejecutado que ganó una medalla de oro de la Academia Danesa de Ciencias.

En la universidad, Bohr fue particularmente influido por el profesor Christiansen, que era el físico danés más inminente entonces. Profesor y estudiante mantuvieron una relación de admiración mutua. Bohr escribió más tarde que había sido especialmente afortunado por haber estado bajo la tutela de Christiansen, «un físico muy dotado y profundamente original». A su vez, en 1916

Christiansen le escribió a Bohr: «Nunca he conocido a alguien como tú que fuera hasta el fondo de las cosas y al mismo tiempo tuviera la energía de proseguir hasta completar la tarea, y que, además, estuviera tan interesado por la vida en su totalidad».⁶

Bohr estuvo también influido por el trabajo del filósofo Harald Høffding, uno de los más importantes filósofos daneses. Lo había conocido bastante antes de entrar en la universidad, pues era amigo de su padre. Høffding y otros intelectuales daneses hacían una tertulia en la casa de Bohr, y Christian Bohr permitía a sus dos hijos, Niels y Harald, escuchar las discusiones. Más tarde Høffding se mostraría muy interesado en las implicaciones filosóficas de la teoría cuántica, desarrollada por Niels Bohr. Se ha sugerido que, a su vez, la formulación de Bohr del principio cuántico de complementariedad (que se discute más adelante) estuvo influida por la filosofía de Høffding.

Bohr continuó su trabajo doctoral en física en la universidad y en 1911 escribió su tesis sobre la teoría electrónica de los metales. En su modelo, los metales se visualizan como un gas de electrones que se mueven más o menos libremente en el potencial creado por las cargas positivas del metal. Estas cargas positivas son los núcleos de los átomos del metal, dispuestos en un retículo. La teoría no podía explicarlo todo, y sus limitaciones se debían a la aplicación de ideas clásicas —y no del naciente cuanto— al comportamiento de los electrones en un metal. Su modelo funcionaba tan bien que la lectura de su tesis despertó gran expectación y la sala se llenó por

⁶ Como se cita en el libro de Abraham Pais *Niels Bohr's times*, Clarendon Press, Oxford, 1991.

completo. El presidente del tribunal era el profesor Christiansen. Éste señaló que era desafortunado que la tesis no se hubiera traducido a algún idioma extranjero, puesto que pocos daneses podían entender la física que contenía. Más tarde, Bohr envió copias de su tesis a eminentes físicos cuyos trabajos había citado en su obra, entre ellos a Max Planck. Desgraciadamente, pocos respondieron, puesto que ninguno entendía el danés. En 1920, Bohr hizo un intento de traducir la tesis al inglés, pero nunca llegó a finalizar el proyecto.

Tras acabar su trabajo, Bohr marchó a Inglaterra con una beca posdoctoral financiada por la Fundación Carlsberg. Pasó un año bajo la dirección de J. J. Thomson en el laboratorio Cavendish de Cambridge. Este laboratorio estaba entre los más importantes centros mundiales de física experimental, y sus directores anteriores a Thomson fueron Maxwell y Rayleigh. El laboratorio Cavendish ha dado más de veinte premios Nobel a lo largo de los años.

Thomson, que había ganado el premio Nobel en 1906 por su descubrimiento del electrón, era muy ambicioso. A menudo había que ocultarle la película tomada durante los experimentos para que no la «robara» a fin de examinarla antes de que se hubiera secado, dejando huellas que emborronaban las imágenes. Había emprendido la cruzada de reescribir la física en función del electrón y de empujarla más allá del impresionante trabajo de su predecesor, Maxwell.

Bohr trabajó duramente en el laboratorio, pero solía tener dificultades al soplar vidrio para hacer algún equipo especial. Rompía tubos, y chapurreaba en una lengua que no le era familiar. Trató de mejorar su inglés leyendo a Dickens, usando su diccionario cada dos por tres. Además, no era fácil trabajar con Thomson. El proyecto que éste le asignó tenía que ver con los tubos de rayos catódicos y fue un callejón sin salida que no produjo ningún resultado. Bohr encontró un error en los cálculos de Thomson, pero éste no aceptaba las críticas. No estaba interesado en ser corregido, y Bohr —con su pobre inglés— no se hizo comprender.

En Cambridge, Bohr conoció a lord James Rutherford (1871-1937), reconocido por su trabajo pionero sobre radiación, el descubrimiento del núcleo y un modelo del átomo. Bohr estaba interesado en trasladarse a Manchester para trabajar con Rutherford, cuyas teorías no habían recibido aún una amplia aceptación. Rutherford dijo que lo recibiría con gusto, pero le sugirió que primero obtuviera el permiso de Thomson para salir. Thomson, que no creía en la teoría de Rutherford del núcleo, estaba más que contento de dejarlo partir.

En Manchester, Bohr empezó los estudios que le darían fama. Comenzó a analizar las propiedades de los átomos a la luz de la teoría de Rutherford, y éste lo puso a trabajar en el problema experimental de analizar la absorción de partículas alfa en aluminio. Bohr trabajaba en el laboratorio muchas horas al día, y Rutherford le visitaba a menudo, como al resto de los estudiantes mostrando mucho interés en su trabajo. Poco tiempo después, sin embargo,

Bohr se dirigió a Rutherford para decirle que prefería trabajar en física teórica. Éste se mostró de acuerdo, por lo que Bohr solía quedarse en casa trabajando con lápiz y papel y yendo en raras ocasiones al laboratorio. Era feliz por no tener que ver a nadie, dijo más tarde, puesto que «nadie de allí sabía mucho».

Bohr trabajaba con electrones y partículas alfa en su investigación, y elaboró un modelo para describir los fenómenos que observaban él y los físicos experimentales. La teoría clásica no funcionaba, de modo que Bohr dio un gran paso: aplicó las restricciones cuánticas a sus partículas. Usó la constante de Planck de dos maneras en su famosa teoría del átomo de hidrógeno. Primero notó que el momento angular del electrón orbitante en su modelo del átomo de hidrógeno tenía las mismas dimensiones que la constante de Planck. Esto le llevó a postular que el momento angular del electrón orbitante debe ser un múltiplo de la constante de Planck dividida por 2π , esto es:

$$mvr = h/2\pi, 2(h/2\pi), 3(h/2\pi), \dots$$

Donde la expresión de la izquierda es la definición clásica del momento angular (m es masa, v es velocidad y r es el radio de la órbita). Esta hipótesis de cuantización del momento angular condujo a Bohr directamente a cuantizar la energía del átomo.

En segundo lugar, Bohr postuló que, cuando el átomo de hidrógeno cae de un nivel de energía a otro más bajo, la energía liberada se emite como un solo fotón de Einstein. Como veremos más adelante, la cantidad más pequeña de energía en un haz de luz, según

Einstein, era $h\nu$, donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia, medida como el número de vibraciones por segundo. Con esto y su hipótesis sobre el momento angular, Bohr usó la teoría de Planck para explicar lo que sucede en el interior de un átomo. Esto supuso uno de los mayores avances de la física. Bohr acabó su artículo sobre las partículas alfa y el átomo después de salir de Manchester y volver a Copenhague. El artículo se publicó en 1913, marcando la transición de su trabajo a la teoría cuántica y a la cuestión de la estructura atómica. Nunca olvidó que llegó a formular su teoría cuántica del átomo a partir del descubrimiento del núcleo por parte de Rutherford. Más tarde calificó a Rutherford como un segundo padre para él.

Tras su regreso a Dinamarca, Bohr ocupó una plaza en el Instituto Danés de Tecnología. Se casó con Margrethe Nørlund en 1912. Ella permaneció junto a él toda su vida, y fue sumamente eficaz en la organización del grupo de física fundado en Copenhague por su marido.

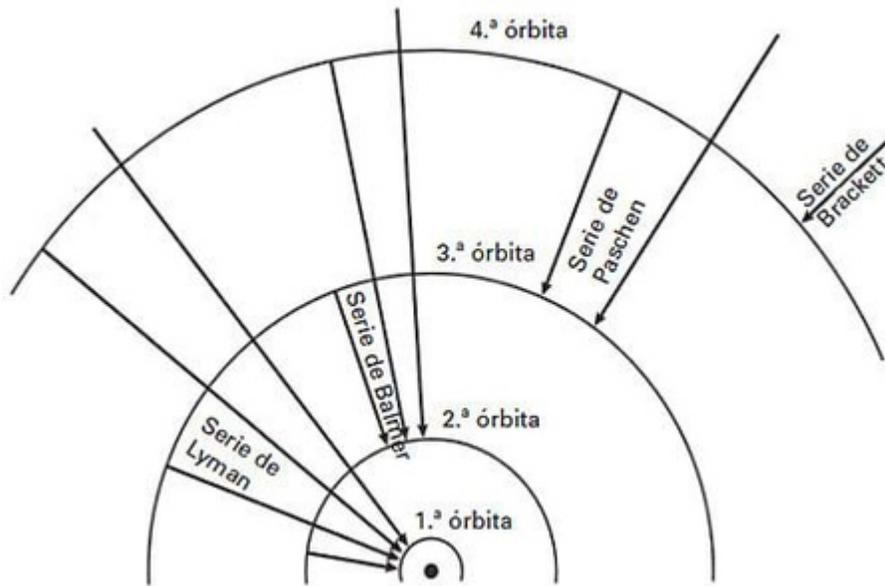
El 6 de marzo de 1913, Bohr envió a Rutherford el primer capítulo de su tratado sobre la constitución de los átomos, pidiéndole que hiciera llegar el manuscrito al *Philosophical Magazine* para su publicación. Este manuscrito iba a catapultarle de ser un joven que ha realizado algún progreso importante en física a ser una figura mundial de la ciencia. El descubrimiento capital de Bohr era que resulta imposible describir el átomo en términos clásicos, y que las respuestas a todas las cuestiones sobre física atómica tenían que provenir de la teoría cuántica.

Los esfuerzos de Bohr se dirigieron permanentemente a entender el más sencillo de los átomos, esto es, el hidrógeno. Cuando abordó este problema, ya se sabía que el átomo de hidrógeno radia en series específicas de frecuencias: las conocidas series de Rydberg, Balmer, Lyman, Paschen y Brackett, cada una de las cuales cubre una parte diferente del espectro de radiación de átomos de hidrógeno excitados, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo pasando por el visible. Bohr trataba de encontrar una fórmula que explicara por qué el hidrógeno radiaba en esas frecuencias concretas y no en otras.

Bohr dedujo de los datos disponibles en todas las series de radiación del hidrógeno que todas las frecuencias permitidas se debían al descenso de un electrón desde un nivel de energía en el átomo hasta otro más bajo. Cuando el electrón bajaba de un nivel a otro, la diferencia entre sus energías al principio y al final se emitía en forma de un *cuanto de energía*. Hay una fórmula que relaciona estos niveles de energía y los cuantos:

$$E_a - E_b = h\nu_{ab}$$

Donde E_a es la energía del nivel inicial del electrón en el átomo de hidrógeno; E_b es la del nivel final una vez que el electrón ha descendido desde su estado previo; h es la constante de Planck y ν_{ab} es la frecuencia del cuanto de la luz emitida durante el salto del electrón desde el primero al segundo nivel. Esto se muestra en la figura siguiente.



El sencillo modelo atómico de Rutherford no se ajustaba bien a la realidad. El átomo de Rutherford se modeló de acuerdo con la física clásica, y si el átomo fuera tan simple como implicaba el modelo no habría existido más de una cienmillonésima de segundo. El gran descubrimiento de Bohr al usar la constante de Planck en el marco atómico resolvió elegantemente el problema. La teoría cuántica explicaba ahora todos los fenómenos observados de la radiación del hidrógeno, que habían confundido a los físicos durante décadas.

El trabajo de Bohr se ha desarrollado parcialmente para explicar las órbitas y energías de los electrones en otros elementos (diferentes del hidrógeno) y para ayudarnos a entender la tabla periódica de los elementos, los enlaces químicos y otros fenómenos fundamentales. La teoría cuántica se ha usado con resultados excepcionales. Cada vez era más evidente que la física clásica no funcionaba

adecuadamente en el dominio de los átomos, moléculas y electrones, y que la teoría cuántica era el camino que seguir.

La brillante solución de Bohr a la cuestión de las diversas series de líneas espectrales de radiación para el átomo de hidrógeno dejaba sin responder la cuestión del porqué. ¿Por qué un electrón salta de un nivel de energía a otro, y cómo sabe el electrón que ha de hacerlo? Esto es una cuestión de causalidad. La teoría cuántica no explica la causalidad, y de hecho causa y efecto se confunden en el mundo cuántico y no tienen explicación o significado. Esta cuestión acerca del trabajo de Bohr fue planteada ya por Rutherford en el momento en que recibió el manuscrito de dicho trabajo. Asimismo, los descubrimientos no comportaron una *formulación general* de la física cuántica, aplicable en principio a todas las soluciones y no sólo a casos especiales. Ésta era la principal cuestión del momento, y no se resolvió con éxito hasta más tarde, esto es, hasta el nacimiento de «la nueva mecánica cuántica» con el trabajo de De Broglie, Heisenberg, Schrödinger y otros.

Bohr se hizo muy famoso como consecuencia de su trabajo sobre la naturaleza cuántica del átomo. Solicitó al gobierno danés que le concediera una cátedra de física teórica, y el gobierno aceptó. Ahora era hijo predilecto de Dinamarca y todo el país le rendía honores. Más tarde, durante unos cuantos años continuó yendo a Manchester para trabajar con Rutherford, viajó a otros sitios y conoció a muchos físicos. Estos contactos le permitieron fundar su propio instituto.

En 1918, Bohr obtuvo permiso del gobierno danés para fundar su instituto de física teórica. Recibió fondos de la Real Academia Danesa de la Ciencia, que a su vez gozaba del apoyo económico de la fábrica de cervezas Carlsberg. Él y su familia se mudaron a una mansión propiedad de la familia Carlsberg en los terrenos del nuevo instituto. Muchos físicos jóvenes de todo el mundo fueron a pasar uno o dos años al instituto, donde trabajaban y recibían ayuda e ideas del gran físico danés. Bohr hizo amistad con la familia real danesa, así como con muchos miembros de la nobleza y de la elite internacional. Recibió el premio Nobel de física de 1922 por su trabajo sobre la teoría cuántica.

Bohr organizó regularmente encuentros científicos en su instituto de Copenhague, a los que asistieron muchos de los más célebres físicos del mundo para discutir sus ideas. En consecuencia, Copenhague se convirtió en un centro mundial para el estudio de la mecánica cuántica durante el período en que esta teoría se estaba elaborando: desde su nacimiento a finales de la primera década del siglo XX hasta justo antes de la segunda guerra mundial. Los científicos que trabajaron en el instituto (llamado Instituto Niels Bohr tras la muerte de su fundador), y muchos de los que fueron a los encuentros celebrados en él, desarrollaron después lo que se conoce como la «Interpretación de Copenhague» de la teoría cuántica, a menudo también denominada interpretación ortodoxa. Esto se hizo después del nacimiento de la «nueva mecánica cuántica», a mediados de los años veinte. Según esta interpretación de las reglas del mundo cuántico, existe una clara distinción entre

lo que se observa y lo que no se observa. El sistema cuántico es microscópico y no incluye los aparatos de medida o el proceso de medición. En los años siguientes, la interpretación de Copenhague sería puesta en tela de juicio por visiones más nuevas del mundo surgidas como consecuencia de la madurez de la teoría cuántica.

Desde la década de 1920, y culminando en 1935, un importante debate apasionaría a la comunidad de físicos cuánticos. El desafío lo lanzaría Einstein, y durante el resto de su vida Bohr «pelearía» regularmente con Einstein sobre el significado y la completitud de la teoría cuántica.

Capítulo 6

Las ondas piloto de De Broglie

Después de una larga reflexión y meditación en solitario, de repente tuve la idea, en 1923, de que el descubrimiento hecho por Einstein en 1905 tendría que ser generalizado extendiéndolo a todas las partículas materiales y especialmente a los electrones.

LOUIS DE BROGLIE

El duque Louis Victor de Broglie nació en Dieppe en 1892. Su familia pertenecía a la alta nobleza, y desde mucho tiempo atrás había dado a Francia diplomáticos, políticos y jefes militares. Louis era el menor de cinco hermanos. Su familia esperaba que el adorado hermano mayor de Louis, Maurice, siguiera la carrera militar, de modo que Louis decidió servir también a Francia. Maurice escogió la marina, porque pensaba que ello le permitiría estudiar las ciencias naturales, que le habían fascinado desde la infancia. Y realmente logró practicar la ciencia instalando el primer radiotransmisor francés a bordo de un navío.

Después de abandonar el ejército y ponerse a estudiar en Toulon y en la Universidad de Marsella, Maurice se trasladó a una mansión en París, donde en una de las habitaciones montó un laboratorio

para estudiar los rayos X. A fin de que le ayudara en sus experimentos, el expeditivo Maurice entrenó a su criado en los rudimentos del procedimiento científico, y éste con el tiempo se convirtió en un ayudante de laboratorio profesional. La fascinación de Maurice por la ciencia era contagiosa, y enseguida su hermano Louis se interesó también por el trabajo de investigación y le ayudó en los experimentos.

Louis asistió a la Sorbona, donde estudió historia medieval. En 1911, Maurice trabajó como secretario del famoso congreso Solvay en Bruselas, donde Einstein y otros importantes físicos se encontraron para discutir los apasionantes nuevos hallazgos en física. A su vuelta, regaló los oídos de su joven hermano con historias acerca de esos fascinantes descubrimientos, y Louis todavía llegó a apasionarse más por la física.

Pero pronto estalló la primera guerra mundial y Louis de Broglie se alistó en el ejército francés. Sirvió en una unidad de radiocomunicaciones, una novedad en esa época. Durante su servicio en la unidad de radiotelegrafía instalada en lo alto de la torre Eiffel, aprendió mucho acerca de las ondas de radio. Y, de hecho, iba a conseguir impacto mundial por el estudio de las ondas. Cuando acabó la guerra, volvió a la universidad y estudió bajo la dirección de algunos de los mejores físicos y matemáticos franceses, entre ellos Paul Langevin y Emile Borel. Diseñó experimentos con ondas y los llevó a cabo en el laboratorio de su hermano en la mansión familiar. Era asimismo amante de la música de cámara, de

manera que tenía un íntimo conocimiento de las ondas desde el punto de vista de la teoría de la música.

De Broglie se sumergió en el estudio del libro de actas del congreso Solvay que le había proporcionado su hermano. Se sintió impresionado por la naciente teoría cuántica discutida en 1911, que estaría presente repetidamente en los congresos Solvay durante los años siguientes. Estudió los gases ideales, que se discutieron en el encuentro Solvay, y llegó a una fructífera instrumentación de la teoría de ondas en el análisis de dichos gases usando la teoría cuántica.

En 1923, mientras trabajaba para doctorarse en física en París, «de golpe», como él mismo diría después, «vi que la crisis en óptica se debía simplemente al fracaso en comprender la verdadera dualidad universal de onda y partícula». En ese momento, de hecho, De Broglie descubrió su dualidad. Publicó tres notas cortas sobre el tema, formulando la hipótesis de que las partículas eran también ondas y las ondas también partículas, en las *Comptes rendus* (actas) de la Academia de París en septiembre y octubre de 1923. Elaboró su trabajo y presentó su descubrimiento en detalle en su tesis doctoral, que defendió el 25 de noviembre de 1924.

De Broglie tomó la concepción de Bohr del átomo y consideró éste como un instrumento musical que puede emitir un tono básico y una secuencia de tonos superiores. Sugirió asimismo que todas las partículas poseen este tipo de aspecto ondulatorio. Más tarde comentó sobre su trabajo: «deseaba representarme la unión de ondas y partículas de una manera concreta, siendo la partícula un

pequeño objeto localizado incorporado a la estructura de una onda en propagación». Llamó a las ondas que asociaba con las partículas «ondas piloto». Toda partícula en el universo se asocia entonces con una onda que se propaga a través del espacio.

De Broglie dedujo algunos conceptos matemáticos para sus ondas piloto. Mediante una deducción que emplea varias fórmulas y la constante de Planck, h , llegó a la ecuación que constituye su legado a la ciencia. Su ecuación liga el momento de una partícula, p , con la longitud de onda de su onda piloto asociada, λ , a través de una relación donde aparece la constante de Planck. Dicha relación se expresa simplemente como:

$$p = h/\lambda$$

De Broglie tuvo una idea brillante: usó la maquinaria de la teoría cuántica para formular una relación explícita entre partículas y ondas. Una partícula posee momento (clásicamente, el producto de su masa y su velocidad). Ese momento se relacionaba directamente con la onda asociada a la partícula. Entonces el momento de una partícula en mecánica cuántica es, por la fórmula de De Broglie, igual al cociente de la constante de Planck y la longitud de onda de la onda correspondiente (es decir, cuando vemos la partícula como una onda).

De Broglie no formuló ninguna ecuación para describir la propagación de la onda asociada a una partícula. Esa tarea quedaría reservada a otro gran cerebro, Erwin Schrödinger. Por su

trabajo pionero, De Broglie recibió el premio Nobel después de que muchos experimentos verificaran la naturaleza ondulatoria de las partículas durante los años siguientes a la presentación de su teoría.

De Broglie permaneció activo como físico y vivió una larga vida, muriendo en 1987 a la edad de 95 años. Cuando era ya un científico mundialmente famoso, el físico George Gamow (que escribió *Thirty years that shook physics*, Treinta años que convulsionaron la física) le visitó en su mansión parisina. Gamow tocó el timbre de la puerta y fue recibido por el mayordomo de De Broglie, a quien dijo: «Je voudrais voir professeur De Broglie» (Querría ver al profesor De Broglie). El mayordomo se inclinó. «Vous voulez dire monsieur le duc De Broglie!» (¡Quiere usted decir el señor duque De Broglie!), le corrigió, «O.K., le duc De Broglie», dijo Gamow, y se le permitió finalmente la entrada.

¿Son las partículas también ondas? ¿Son las ondas también partículas?

La respuesta que nos da la teoría cuántica es «Sí». Una característica fundamental de un sistema cuántico es que muestra aspectos de interferencia ondulatoria cuando atraviesa un dispositivo de doble rendija. Análogamente, las ondas pueden ser partículas, como nos enseñó Einstein en su artículo sobre el efecto fotoeléctrico por el que ganó el premio Nobel y que describiremos más adelante. Las ondas luminosas son también partículas, llamadas fotones.

La luz láser es luz coherente, en la que todas las ondas luminosas están en fase; de ahí la potencia de los láseres. En 2001, el premio Nobel de física fue compartido por tres científicos que mostraron que los átomos también pueden comportarse como rayos de luz en el sentido de que un conjunto de ellos puede estar en un estado coherente, justo como la luz láser. Esto demostró una conjetura avanzada por Einstein y el físico hindú Saryendra Nath Bose en la década de 1920. Bose era un joven y desconocido profesor de física en la Universidad de Dacca, y en 1924 envió a Einstein una carta en la que describía cómo los cuantos de luz de Einstein, los fotones, podrían formar una especie de «gas», similar a uno consistente en átomos y moléculas. Einstein reescribió⁷ y mejoró el artículo de Bose y lo envió para su publicación, apareciendo él como coautor. Ese gas propuesto por Bose y Einstein era una nueva forma de la materia, en la que las partículas no tenían propiedades individuales y no eran distinguibles. Esta nueva forma de materia condujo a Einstein a una «hipótesis acerca de una interacción entre moléculas de una naturaleza aún completamente misteriosa».

La estadística de Bose-Einstein permitió a Einstein formular hipótesis básicas sobre el comportamiento de la materia a temperaturas extremadamente bajas. A tales temperaturas, la viscosidad de los gases licuados desaparece por completo, surgiendo la superfluidez. El proceso correspondiente se denomina condensación Bose-Einstein.

⁷ [Nota del traductor] De hecho, Einstein tradujo el artículo, originalmente escrito en inglés, al alemán para que se publicara en este idioma, que entonces era el más importante desde el punto de vista científico.

Louis de Broglie había enviado su tesis doctoral al amigo de Einstein en París, Paul Langevin, en 1924; éste quedó tan impresionado por la idea de que la materia puede tener un aspecto ondulatorio que envió la tesis a Einstein y le pidió su opinión. Einstein, después de leer la tesis de De Broglie, la calificó de «muy notable», y más tarde usó la idea de las ondas de De Broglie para deducir las propiedades ondulatorias de la nueva forma de materia que Bose y él habían descubierto. Pero nadie vería un condensado Bose-Einstein... hasta 1995.

El 5 de junio de 1995, Carl Weiman, de la Universidad de Colorado, y Eric Cornell, del National Institute of Standards and Technology (de EE.UU.), usaron láseres de gran potencia y una nueva técnica de enfriamiento hasta cerca del cero absoluto para superenfriar alrededor de dos mil átomos de rubidio, y descubrieron que estos átomos poseían las propiedades de un condensado Bose-Einstein. Aparecían como una pequeña nube negra, en la cual los átomos habían perdido su identidad para entrar en un estado único de energía. Esos átomos eran ahora, para cualquier fin, un ente cuántico caracterizado por su onda de De Broglie. Un poco después, Wolfgang Ketterle, del MIT, reprodujo los resultados y mejoró el experimento, creando lo equivalente a un haz láser hecho de átomos. En premio a su trabajo, los tres científicos recibieron el Nobel de física de 2001, y la fascinante idea de De Broglie se volvió a confirmar en una nueva disposición experimental que impulsó los límites de la mecánica cuántica hasta la escala de los objetos macroscópicos.

Capítulo 7

Schrödinger y su ecuación

El entrelazamiento no es un sino más bien el rasgo característico de la mecánica cuántica.

ERWIN SCHRÖDINGER

Erwin Schrödinger nació en una casa situada en el centro de Viena, en 1887, en el seno de una familia acomodada. Hijo único, fue mimado por varias tías, una de las cuales le enseñó a hablar y leer inglés antes incluso de que dominara su alemán nativo. Siendo adolescente empezó a escribir un diario, una práctica que mantuvo durante toda su vida. Desde temprana edad mostró un saludable escepticismo y tendió a cuestionar cosas que la gente presentaba como hechos. Estos dos hábitos serían muy útiles en la vida de un científico que haría una de las contribuciones más importantes a la nueva teoría cuántica. El cuestionar lo que tomamos como verdad a partir de nuestra vida cotidiana es esencial al tratar el mundo de lo muy pequeño. Y por otra parte los cuadernos de notas de Schrödinger serían cruciales en su desarrollo de la ecuación de ondas.

A los once años, Erwin ingresó en el *gymnasium* situado cerca de su casa. Además de matemáticas y ciencia, allí se enseñaba a los estudiantes la lengua y cultura griegas, latín y las obras clásicas de la antigüedad, que incluían a Ovidio, Tito Livio, Cicerón y Homero. A

Erwin le encantaban las matemáticas y la física, y sobresalía en ellas, resolviendo problemas con una prontitud y facilidad que admiraban a sus compañeros. Pero también le gustaban la poesía alemana y la lógica de la gramática, tanto antigua como moderna. Esta lógica, en matemáticas y en estudios humanísticos, modeló su pensamiento y lo preparó para los rigores de la universidad.

Erwin adoraba el senderismo, el montañismo, el teatro y las chicas guapas, unas diversiones que marcarían su comportamiento durante toda su vida. De joven trabajaba duramente en la escuela, pero también se divertía «duramente». Pasaba muchos días caminando por las montañas, leyendo matemáticas y cortejando a la hermana de su mejor amigo, una belleza morena llamada Lotte Rella.⁸

En 1906 Schrödinger se matriculó en la Universidad de Viena —una de las más antiguas de Europa, fundada en 1365— en la carrera de física. La física tenía una larga tradición en esa universidad. Algunos de los grandes cerebros que habían trabajado allí y se jubilaron en la época en que entró Schrödinger fueron Ludwig Boltzmann, que propuso la teoría atómica, y Ernst Mach, el teórico cuyo trabajo inspiró en cierta manera a Einstein. Schrödinger fue estudiante de Franz Exner, y realizó trabajos en física experimental, parte de ellos relacionados con la radiactividad. La Universidad de Viena era un centro importante para el estudio de la radiactividad. Marie Curie recibió en París, del departamento de física vienés,

⁸ Gran parte del material bibliográfico de este capítulo ha sido entresacado del libro de Walter Moore (véase la nota siguiente de este mismo capítulo).

alguna de las muestras de material radiactivo que le sirvieron para llevar a cabo sus descubrimientos.

Schrödinger era admirado por sus compañeros de estudios por su brillantez en física y en matemáticas. Sus amigos siempre le requerían para que les ayudara con las matemáticas. Uno de los cursos que siguió en la universidad fue el de ecuaciones diferenciales, en el que destacó. Como probaría el destino, esta habilidad especial resultó inestimable para su carrera: le ayudó a resolver el mayor problema científico de su vida y a establecer su nombre como un pionero de la mecánica cuántica.

Pero la vida de Schrödinger como estudiante en la universidad de Viena en el cenit de su gloria imperial tuvo diversas facetas. Conservaba sus dotes atléticas y era más sociable que nunca: hizo buenos amigos con los que pasaba su tiempo libre practicando el senderismo y escalando. En cierta ocasión, en los Alpes, pasó toda una noche cuidando a un amigo que se había roto una pierna en una escalada. Cuando finalmente llevaron a su amigo al hospital, se pasó el resto del día esquiando.

En 1910, Schrödinger escribió su tesis doctoral en física, que se titulaba *Sobre la conducción de la electricidad en la superficie de aislantes en aire húmedo*. Era éste un problema que tenía algunas implicaciones en el estudio de la radiactividad, pero no era un trabajo de brillante erudición. Schrödinger no había considerado ciertos factores que tendría que haber conocido y su análisis no era completo ni ingenioso. No obstante, ese trabajo fue suficiente para obtener el doctorado, y después de su graduación pasó un año como

voluntario en la artillería de montaña. Seguidamente, regresó a la universidad para trabajar como ayudante en un laboratorio de física. Entre tanto, trabajaba en el artículo requerido para su habilitación como docente (llamado un *Habilitationschrift*), que le permitiría tener ciertas ganancias como tutor privado (profesor particular) en la universidad. Su artículo, «Sobre la teoría cinética del magnetismo», era un intento teórico de explicar las propiedades magnéticas de ciertos compuestos, y tampoco era de una calidad excepcional, pero satisfacía los requisitos y le permitió trabajar en la universidad. Había comenzado su carrera académica.

Un poco después, Schrödinger, con algo más de veinte años, conoció a otra joven de la que se encaprichó. Su nombre era Felice Krauss, y su familia pertenecía a la capa inferior de la nobleza austriaca. Entablaron una relación y se consideraron prometidos a pesar de las fuertes objeciones de los padres de ella. La madre de Felice, especialmente, estaba decidida a no permitir que su hija se casara con alguien de la clase trabajadora, alguien que —pensaba ella— nunca podría mantener apropiadamente a su hija con un sueldo universitario. Desesperado, Erwin consideró la posibilidad de abandonar la universidad y trabajar para su padre, que era propietario de una fábrica. Pero el padre no quería saber nada de eso, y con la presión creciente de la madre de Felice, los dos amantes pusieron fin a su compromiso informal. Felice se casó algún tiempo después, pero siempre permaneció cerca de Erwin. Esto fue también un patrón recurrente en la vida de Schrödinger:

dondequiera que estuviera, incluso después de casado, siempre había «amiguitas» no demasiado lejos.

Schrödinger prosiguió sus estudios acerca de la radiactividad en el laboratorio de la Universidad de Viena. En 1912, su colega Victor Hess ascendió hasta los cinco mil metros en un globo equipado de instrumentos para medir la radiación. Deseaba resolver el problema de por qué se detectaba radiación no sólo cerca del suelo, donde los depósitos de radio y uranio eran su fuente, sino también en el aire. Arriba en su globo, para su sorpresa Hess descubrió que la radiación era de hecho tres veces superior a la que había a nivel del suelo. Así pues, Hess había descubierto la radiación cósmica, por lo que más tarde recibiría el premio Nobel. Schrödinger, que participaba en experimentos relacionados con la radiación de fondo a nivel del suelo, viajó por toda Austria con sus propios detectores de radiación. De paso, este viaje le permitió gozar de sus queridas salidas al aire libre y hacer nuevos amigos. En 1913 estaba tomando medidas de radiación al aire libre en el área donde pasaba las vacaciones una familia a la que había conocido en Viena. Con la familia estaba una linda jovencita, Annemarie («Anny») Bertel. El científico de veintiséis años y la joven de dieciséis se sintieron atraídos mutuamente y, tras sucesivos encuentros, desarrollaron en los años siguientes una relación amorosa que acabó en matrimonio. Anny permaneció fiel a Schrödinger durante toda su vida, tolerando incluso sus constantes relaciones con otras mujeres.

En 1914, Schrödinger volvió a alistarse en la artillería de campaña para luchar en el frente italiano durante la primera guerra mundial.

Incluso en el campo de batalla, continuaba trabajando en problemas de física y publicaba artículos en revistas profesionales. Hasta entonces, ninguno de sus artículos había sido excepcional, pero los temas eran interesantes. Empleó mucho tiempo investigando sobre la teoría del color, e hizo contribuciones al conocimiento de la luz de diferentes longitudes de onda. En uno de esos experimentos sobre color cuando todavía estaba en la Universidad de Viena, Erwin descubrió que su propia visión en color era deficiente.

En 1917 Schrödinger escribió su primer artículo sobre teoría cuántica, acerca del calor específico atómico y molecular. La labor de investigación que comportaba ese artículo le hizo prestar atención al trabajo de Planck, Einstein y Bohr. Cuando acabó la guerra, Schrödinger no sólo había abordado la teoría cuántica, sino también la teoría de la relatividad de Einstein. Ya se había situado, pues, en la frontera de la física teórica.

En los años posteriores a la guerra, Schrödinger enseñó en las universidades de Viena, Jena, Breslau, Stuttgart y Zúrich. En 1920, en Viena, Erwin se casó con Anny Bertel. La aportación de ella era superior a su sueldo, lo que le hacía sentirse incómodo, apremiándole a buscar empleo en otras universidades europeas. Por medio de Anny, conoció a Hansi Bauer, quien más tarde se convertiría en una de sus amantes de toda la vida.

En Stuttgart, en 1921, Schrödinger empezó una labor muy seria para entender y desarrollar la teoría cuántica. Bohr y Einstein, que no eran mucho mayores que él, ya habían realizado sus

contribuciones a dicha teoría cuando eran veinteañeros. Schrödinger era más viejo y aún no había realizado un hallazgo científico importante. Concentró sus esfuerzos en modelar las líneas espectrales de los átomos alcalinos.

A finales de 1921, Schrödinger fue elegido para una codiciada plaza de catedrático de física teórica en la Universidad de Zúrich. Ese año publicó su primer artículo importante en el área cuántica, acerca de las órbitas cuantizadas de un electrón, basado en el trabajo anterior de Bohr. Sin embargo, poco después de su llegada a Zúrich se le diagnosticó una enfermedad pulmonar y los médicos le ordenaron reposo en un lugar elevado. Los Schrödinger se decidieron por el pueblo de Arosa en los Alpes, no lejos de Davos, a una altura de dos mil metros. Tras su restablecimiento, volvieron a Zúrich, y allí, en 1922, Schrödinger dio su primera clase en la universidad. Durante 1923 y 1924, su investigación se centró en la teoría espectral, la luz, la teoría atómica y la naturaleza periódica de los elementos. En 1924, a los treinta y siete años, fue invitado a participar en el congreso Solvay de Bruselas, donde se reunían los mayores cerebros de la física, incluidos Einstein y Bohr. Él estuvo allí casi como un observador externo, puesto que no había publicado ningún trabajo llamativo.

La teoría cuántica tenía aún mucho camino por recorrer y Schrödinger buscaba, desesperadamente un tema en el campo cuántico en el que pudiera sobresalir. Tenía al tiempo en su contra, y si algo no sucedía pronto, estaría condenado a la oscuridad, la mediocridad y el olvido, y a permanecer siempre al borde del camino

mientras otros hacían historia científica. En 1924, Peter Debye, de la Universidad de Zúrich, le pidió que informara acerca de la tesis de De Broglie sobre la naturaleza ondulatoria de las partículas en un seminario desarrollado en la universidad. Schrödinger leyó el artículo, comenzó a meditar sobre las ideas del mismo y decidió desarrollarlas. Trabajó sobre las ideas de De Broglie a lo largo de un año sin llegar a realizar ningún progreso significativo.

Unos días antes de la Navidad de 1925, Erwin salió hacia los Alpes, para residir en la Villa Herwig en Arosa, donde había pasado junto a Annie varios meses mientras se recuperaba unos años antes. Esta vez fue sin su esposa. Por su correspondencia sabemos que había quedado en reunirse en la villa con una de sus antiguas amigas de Viena, que permaneció con él allí hasta los primeros días de 1926. El biógrafo de Schrödinger, Walter Moore, construye todo un misterio acerca de quién pudo ser esa amiga.⁹ ¿Podría haber sido Lotte, Felice, Hansi o alguna de sus otras amigas? En cualquier caso, según el físico matemático Hermann Weyl, los encuentros eróticos de Schrödinger con la misteriosa dama produjeron la explosión energética necesaria para dar su gran paso adelante en la teoría cuántica. En las vacaciones de Navidad en los Alpes con su amante secreta, Schrödinger formuló la actualmente famosa ecuación que lleva su nombre, la *ecuación de Schrödinger*, una ecuación diferencial que proporciona la regla matemática para describir el comportamiento estadístico de las partículas en el micromundo de la mecánica cuántica.

⁹ Walter Moore, *Schrödinger: life and thought*, Cambridge University Press, Nueva York, 1989.

Las ecuaciones diferenciales son ecuaciones matemáticas que formulan una relación entre una cantidad y sus derivadas, esto es, entre una cantidad y su «ritmo» o tasa de cambio. La velocidad, por ejemplo, es la derivada (el ritmo de cambio) de la posición. Si uno se mueve a cien kilómetros por hora, su posición cambia a un ritmo de cien km/h. La aceleración es el ritmo de cambio de la velocidad (cuando uno acelera, está aumentando la velocidad de su coche); entonces la aceleración es la *derivada segunda* de la posición, puesto que es el ritmo de cambio del ritmo de cambio de la posición. Una ecuación en la que aparece como una variable la posición, así como la velocidad, es una ecuación diferencial. Una ecuación que relaciona la posición con la velocidad y la aceleración es una ecuación diferencial de segundo orden.

Cuando Schrödinger empezó a abordar el problema de deducir una ecuación que gobernase el comportamiento cuántico de una partícula pequeña como el electrón, ya se conocía un buen número de ecuaciones diferenciales de la física clásica. Era conocida, por ejemplo, la ecuación que rige la propagación del calor en un metal. También se conocían las ecuaciones que gobiernan las ondas clásicas, por ejemplo, las ondas en una cuerda vibrante y las ondas sonoras. Al haber seguido cursos de ecuaciones diferenciales, Schrödinger estaba bien enterado de estos desarrollos. Su tarea era encontrar una ecuación que describiera la propagación de las ondas de las partículas, las ondas que De Broglie había asociado con ellas. Schrödinger hizo suposiciones razonables acerca de la forma que esa ecuación debía tener, basándose en la conocida ecuación de

ondas clásica. Lo que tenía que determinar era si usaría la primera o la segunda derivada de la onda con respecto a la posición y, asimismo, si usaría la primera o la segunda derivada de la onda con respecto al tiempo. El avance significativo lo dio cuando descubrió que la ecuación apropiada es de primer orden con respecto al tiempo y de segundo orden con respecto a la posición.

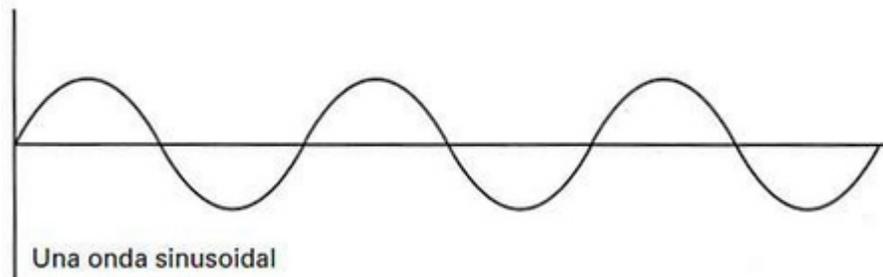
$$H\psi = E\psi$$

Ésta es la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo, expresada en la forma simbólica más simple. El símbolo ψ representa la *función de onda* de una partícula. Esa es la «onda piloto» de De Broglie de una partícula. Pero aquí ya no es un ente hipotético, sino más bien una función que podemos estudiar y analizar mediante la ecuación de Schrödinger. El símbolo H se refiere a un *operador*, el cual se representa mediante una fórmula apropiada que dice lo que hay que hacer con la función de onda: calcular una derivada y también multiplicar por ciertas constantes, entre ellas la constante de Planck, h . El operador H opera sobre la función de onda, y el resultado, en el segundo miembro de la ecuación, es un nivel de energía, E , multiplicado por la función de onda.

La ecuación de Schrödinger se ha aplicado con éxito a muy diversas situaciones en física cuántica. Lo que hace el físico es escribir dicha ecuación, aplicada a un caso particular, por ejemplo, una partícula en una caja microscópica, o un electrón situado en un campo

potencial, o el átomo de hidrógeno. En cada caso, el físico *resuelve* la ecuación de Schrödinger y obtiene una solución; las soluciones de dicha ecuación son ondas.

Las ondas se representan usualmente en física mediante funciones trigonométricas, con frecuencia las funciones seno y coseno, cuya gráfica se parece a la representación de una onda. (Los físicos también usan otras funciones, como las exponenciales). La figura siguiente es una onda sinusoidal típica.



Al resolver la ecuación de Schrödinger, un físico encontrará una solución que expresa la función de onda de una forma como: $\psi = A \sin(n\pi x/L)$. (Ésta es la solución para una partícula en una caja rígida. El término «sen» se refiere a la función seno —de tipo ondulatorio— y las otras letras en la ecuación son constantes salvo una variable, x . Pero aquí el elemento esencial es la función seno).

Con esta ecuación de ondas, Schrödinger llevó la mecánica a un nivel muy elevado. Los científicos ahora pueden «manejar» una función de onda concreta, que a veces puede expresarse en términos específicos, como en el ejemplo anterior, para describir partículas o fotones. Esto condujo a la teoría cuántica a un punto

donde varios de sus aspectos más importantes son evidentes. Dos de ellos son la *probabilidad* y la *superposición*.

Cuando tratamos de sistemas cuánticos —cada uno con una función de onda asociada ψ —, no estamos considerando elementos conocidos con precisión. Una partícula cuántica puede describirse sólo por sus probabilidades, nunca en términos exactos. Estas probabilidades vienen determinadas por la función de onda, ψ . La interpretación en función de probabilidades («probabilista») de la mecánica cuántica fue sugerida por Max Born, aunque Einstein la conocía primero.¹⁰ La probabilidad de que una partícula se encuentre en un lugar determinado es igual al cuadrado de la amplitud de la función de onda en ese lugar:

$$\text{Probabilidad} = |\psi|^2$$

Ésta es una fórmula extremadamente importante en teoría cuántica. Representa, en muchos sentidos, la esencia de lo que nos puede proporcionar dicha teoría. En física clásica, podemos, en principio, medir, determinar y predecir con total certeza la posición y la velocidad de un objeto que se mueve. Esta característica de la física clásica (a escala macroscópica) es lo que nos permite enviar una nave espacial a la Luna, así como conducir un coche y cosas por el estilo. En el mundo de lo muy pequeño (microscópico), no poseemos

¹⁰ [Nota del traductor] Esto no es del todo correcto. No existe ningún dato histórico que avale que Einstein hablara de la función de onda de Schrödinger en términos de probabilidades *antes de* 1926, año en que Born introdujo la interpretación probabilista, si bien es cierto que Einstein había introducido en cierto modo la probabilidad en el problema de la absorción y emisión de la radiación, que trató con la «vieja» teoría cuántica en 1916-1917.

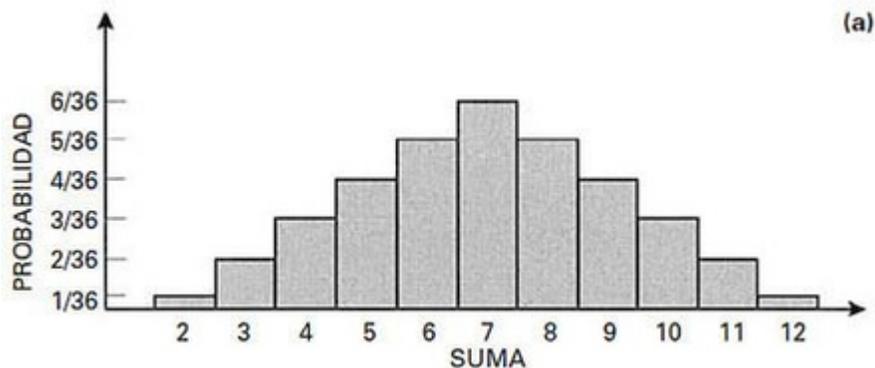
esa capacidad de predecir los movimientos de objetos particulares. Nuestras predicciones son sólo de naturaleza estadística. Podemos determinar dónde estará una partícula (si se actualiza el observable posición) sólo en términos de probabilidades de diferentes resultados (o, de manera equivalente, qué proporción de una gran cantidad de partículas estará en un lugar específico). La ecuación de Schrödinger nos permite hacer tales predicciones estadísticas. Como se demostraría matemáticamente unas décadas después, una probabilidad es lo máximo que podemos obtener de la mecánica cuántica. No existen aquí magnitudes físicas ocultas cuyo conocimiento reduzca la incertidumbre. Por su misma naturaleza, la teoría cuántica es probabilista.

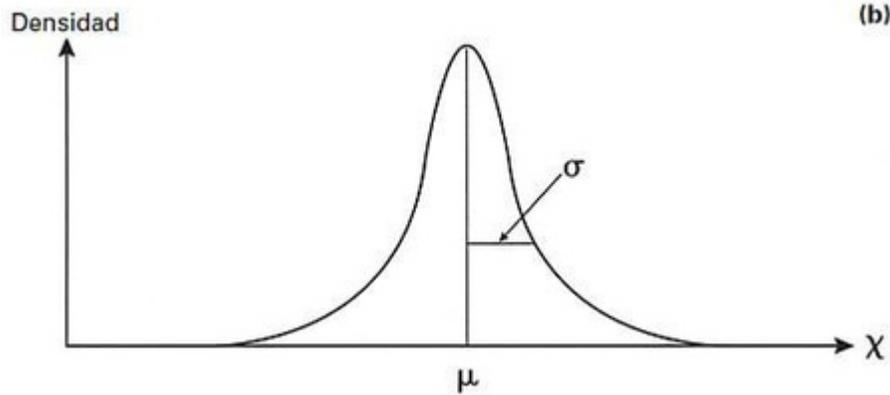
Las probabilidades vienen dadas por una distribución de probabilidad, que en el caso de la teoría cuántica se especifica como el cuadrado de la amplitud de la función de onda. Predecir los resultados de los sucesos cuánticos es diferente a predecir, por ejemplo, el movimiento de un coche, donde si se conocen la posición y la velocidad inicial se puede saber su posición después de cierto tiempo viajando a una velocidad dada, cuando el tiempo y la velocidad puedan medirse con mucha precisión. Si se viaja durante dos horas a 100 km/h, se estará a 200 km de donde se ha partido. Esto no sucede así en el mundo cuántico. Lo mejor que puede hacerse es predecir los resultados en términos de probabilidades. La situación, por consiguiente, es similar a tirar dos dados. En cada uno de ellos existe una probabilidad de $1/6$ de que salga un número dado. Los dos dados son independientes, de modo que la

probabilidad de que salgan dos seis es el producto de las probabilidades de que salga un seis en cada uno de ellos, es decir, $1/6 \cdot 1/6 = 1/36$. La probabilidad de obtener un total de doce entre los dos dados es entonces de $1/36$. La probabilidad más alta para la suma de los puntos de los dos dados se da cuando ésta vale siete, y es de $1/6$. La distribución de probabilidad para dicha suma puede verse en la siguiente figura (a).

El cuadrado de la amplitud de la función de onda, ψ , es frecuentemente una distribución en forma de campana, tal y como muestra la figura (b).

La distribución de la figura (a) nos da la probabilidad de encontrar la partícula en cualquier rango de valores dado del eje horizontal, siendo esa probabilidad el área bajo la curva entre los extremos del segmento horizontal correspondiente a dicho rango de valores.





El segundo elemento esencial de la teoría cuántica desvelado por la ecuación de Schrödinger es el *principio de superposición*. Las ondas pueden superponerse entre sí siempre. La razón de ello es que la curva del seno y la del coseno para varios parámetros pueden añadirse la una a la otra. Esto constituye el principio del análisis de Fourier, inventado por el gran matemático francés Joseph B. J. Fourier (1768-1830) y publicado en su libro *Théorie analytique de la chaleur* (Teoría analítica del calor) en 1822. Fourier aplicó su teoría a la propagación del calor, como sugiere el título de su libro. Demostró que funciones matemáticas muy diversas pueden expresarse como sumas de muchas funciones seno y coseno.

En mecánica cuántica, como las soluciones de la ecuación de Schrödinger son ondas, las sumas de estas ondas son también soluciones de la ecuación. (La suma de varias soluciones de la ecuación de Schrödinger es también una solución debido a la propiedad de linealidad). Esto sugiere, por ejemplo, que el electrón también puede encontrarse en un estado que es superposición de otros estados; y ello sucede porque una solución de la ecuación de

Schrödinger para el electrón sería alguna onda sinusoidal y entonces una suma de tales ondas podría ser también una solución. La superposición de ondas explica el fenómeno de una interferencia. En el experimento de Young de la doble rendija, las ondas interfieren entre sí: esto es, las líneas brillantes en la pantalla son regiones donde las ondas provenientes de las dos rendijas se suman para reforzarse entre sí, mientras que las rayas negras son regiones donde se sustraen, haciendo que la luz sea más débil o esté ausente del todo.

La superposición es uno de los principios más importantes de la mecánica cuántica. Lo extraño de la mecánica cuántica se revela en todo su esplendor cuando una partícula se superpone *consigo misma*. En el experimento de Young, cuando la luz es tan débil que se emite fotón a fotón, aún encontramos el patrón de interferencia en la pantalla. (El patrón lo producen muchos fotones, no uno, aunque lleguen a la pantalla uno a uno). La explicación de este fenómeno es que el fotón no escoge pasar por una rendija o por la otra, sino que escoge pasar por ambas a la vez, esto es, por una rendija *y* por la otra. La partícula atraviesa ambas rendijas y entonces interfiere consigo misma, como hacen dos ondas al superponerse.

Cuando un sistema contiene más de una partícula, el principio de superposición da lugar al fenómeno del *entrelazamiento*. Ahora no es una partícula que interfiere consigo misma, sino un sistema que interfiere consigo mismo: un sistema entrelazado. Sorprendentemente, el mismo Schrödinger se dio cuenta de que las

partículas o los fotones que se producen mediante un proceso que los liga entre sí estarán entrelazados, y de hecho fue él quien acuñó el término de «entrelazamiento», en su alemán nativo y en inglés. Schrödinger descubrió la posibilidad del entrelazamiento en 1926, cuando realizó su trabajo pionero sobre la nueva mecánica cuántica, pero usó por primera vez la palabra «entrelazamiento» en 1935, en su discusión del artículo de Einstein, Podolsky y Rosen. Según Horne, Shimony y Zeilinger, Schrödinger advirtió en una serie de artículos de 1926 que el estado cuántico de un sistema de n partículas puede ser un estado entrelazado.¹¹ Schrödinger escribió:

Hemos llamado repetidamente la atención sobre el hecho de que la función ψ no puede, y no debe, ser interpretada directamente en función del espacio tridimensional —por mucho que el problema de un solo electrón tienda a confundirnos en este punto— porque es en general una función en el espacio de configuración, no en el espacio real.¹²

De acuerdo con Horne, Shimony y Zeilinger, Schrödinger comprendía, por tanto, que la función de onda en el espacio de configuración no puede ser factorizada, lo cual es una característica del entrelazamiento. Nueve años más tarde, dio su nombre actual a este fenómeno. Y lo definía como sigue:

¹¹ M. Horne, A. Shimony y A. Zeilinger, «Down-conversion photon pairs: a new chapter in the history of quantum mechanical entanglement», en J. S. Anandan (ed.), *Quantum Coherence*, World Scientific, Singapur, 1989.

¹² E. Schrödinger, *Collected papers on wave mechanics*, Chelsea, Nueva York, 1978, p. 130.

*Cuando dos sistemas, de los que conocemos sus estados por su respectiva representación, entran en interacción física temporal debido a fuerzas conocidas entre ellos y tras un tiempo de influencia mutua se separan otra vez, entonces ya no pueden describirse como antes, esto es, dotando a cada uno de ellos de una representación propia. Yo no llamaría esto un sino el rasgo característico de la mecánica cuántica.*¹³

En 1927, Schrödinger fue nombrado para suceder a Max Planck como catedrático en la Universidad de Berlín y en 1929 fue además elegido miembro de la Academia Prusiana de Ciencias. Después, en mayo de 1933, abandonó su plaza disgustado tras haber sido elegido Hitler canciller de Alemania y se exilió a Oxford. En 1933, se le otorgó el premio Nobel por sus grandes hallazgos en física. Compartió ese premio con el físico inglés Paul Dirac, que hizo asimismo grandes contribuciones a la teoría cuántica y predijo la existencia de la antimateria basándose en consideraciones puramente teóricas.

Schrödinger regresó a Austria y ocupó una cátedra en la Universidad de Graz. Pero cuando los nazis se apoderaron de Austria en 1938, escapó de nuevo a Oxford. Volvió a Europa por un año y enseñó en Gante, pero como la guerra se hacía más intensa partió a Dublín, donde fue catedrático de física teórica hasta 1956. Cuando vivía en el exilio en Irlanda, en 1944, se involucró en otro

¹³ E. Schrödinger, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, n° 31 (1935), p. 555.

lío extramatrimonial. Tenía entonces cincuenta y siete años y se «entrelazó» con una joven casada, Sheila May Greene. Le escribió versos, asistió a las representaciones en las que ella actuaba y prohió a su hija pequeña. Su esposa, Anny, le ofreció el divorcio para que pudiera casarse con Sheila, pero Erwin lo rehusó. La relación sentimental concluyó, y David, el esposo de Sheila, crió a la niña a pesar de que Sheila y él se separaron después. En 1956, Erwin regresó finalmente a Viena. Murió allí en 1961, con su mujer, Annie, a su lado.

Capítulo 8

El Microscopio de Heisenberg

Entrar en el espíritu de la teoría cuántica era, diría yo, sólo posible en Copenhague en esa época.

WERNER HEISENBERG

Werner Carl Heisenberg (1901-1976) nació cerca de Múnich, y cuando todavía era un niño su familia se trasladó a esa ciudad. Heisenberg se sintió muniqués durante toda su vida y siempre que podía volvía a su ciudad desde donde estuviera. En la celebración de su sexagésimo cumpleaños, organizada por la ciudad, Heisenberg dijo: «Quien no haya tenido la experiencia de Múnich en los años veinte no sabe nada sobre lo espléndida que puede ser la vida». Su padre, August Heisenberg, era profesor de filología griega en la Universidad de Múnich, y de hecho era el único catedrático de filosofía griega medieval y moderna en Alemania. El padre infundió a Werner estimación por las ideas griegas, y éste nunca perdió su amor a Platón. (Irónicamente, los antiguos conceptos griegos de espacio, tiempo y causalidad entrarían en conflicto con la teoría cuántica creada por Heisenberg y sus colegas). Cuando aún estaba en la escuela, Heisenberg empezó a interesarse por la física y decidió llegar a ser científico. Asistió a la Universidad de Múnich y, tras acabar sus estudios de licenciatura, siguió allí para realizar su doctorado en física.

En 1922, cuando era estudiante graduado en Múnich, Werner escuchó una conferencia pública de Niels Bohr en el campus. Levantó la mano y le hizo a Bohr una pregunta difícil. Cuando acabó la conferencia, Bohr se acercó a él y le pidió que fueran a dar un paseo. Caminaron durante tres horas, hablando de física. Aquel fue el comienzo de una duradera amistad.

Después de finalizar sus estudios, Heisenberg se marchó al Instituto de Bohr en Copenhague y estuvo allí desde 1924 hasta 1927, aprendiendo danés e inglés a la vez que proseguía sus otros estudios. Hacia 1924, con veintitrés años, había escrito ya doce artículos sobre mecánica cuántica, algunos de ellos en colaboración con los grandes físicos Max Born y Arnold Sommerfeld. Heisenberg se convirtió en el discípulo preferido de Bohr, a quien visitaba con frecuencia en su casa. Cuando comenzó el gran debate entre Einstein y Bohr, Heisenberg adoptó básicamente el punto de vista de Bohr, mientras que Schrödinger tomaba partido por Einstein. Este entrelazamiento entre Bohr y Heisenberg duró mientras vivieron.

Heisenberg desarrolló una teoría de la mecánica equivalente (aunque formalmente distinta) a la de Schrödinger. Terminó su versión un poco antes que su colega más veterano. Mientras que en el tratamiento de Schrödinger se usaba la ecuación de ondas, el de Heisenberg, conceptualmente más desafiante, se basaba en el cálculo con matrices. La mecánica matricial hace uso de números dispuestos en filas y columnas para predecir las intensidades de la

luz emitida por átomos «excitados» al cambiar los niveles de energía, así como otros fenómenos cuánticos.

Se demostró después que ambos métodos eran equivalentes. En el enfoque más abstracto de Heisenberg, las matrices infinitas representan propiedades de entes observables y la matemática usada es la manipulación de matrices. La multiplicación de matrices no es conmutativa, lo que significa que si multiplicamos las matrices A y B, en el orden AB, el resultado será en general distinto al obtenido en el orden inverso, en contraste con lo que ocurre en la multiplicación de números que es conmutativa (por ejemplo, $5 \times 7 = 35 = 7 \times 5$) y, por lo tanto, no importa el orden en que se multipliquen. La no-conmutatividad de la operación de multiplicación de matrices tiene importantes consecuencias en mecánica cuántica que van más allá del trabajo de Heisenberg.

Un *observable* (algo que podemos observar acerca de un sistema cuántico) se representa en la mecánica cuántica moderna mediante la acción de un operador sobre la función de ondas del sistema. Algunos de estos operadores conmutan, lo que quiere decir que, si aplicamos al sistema uno de los operadores y después el otro en el orden AB, el resultado es el mismo que si lo hacemos en el orden inverso: BA. Otros operadores no conmutan, lo que significa que el orden de aplicación de los mismos (y, por tanto, el orden en que se realizan las observaciones) sí importa, ya que el resultado depende de dicho orden. Por ejemplo, medir la posición de una partícula en mecánica cuántica se asocia con aplicar el operador posición a la función de ondas de la partícula, y medir el momento se entiende

como la aplicación de la derivada parcial respecto al operador posición a la función de ondas (clásicamente, el momento, p , es el producto de la masa de la partícula por su velocidad, y la velocidad se define como la derivada de la posición respecto al tiempo). Los operadores posición y momento *no conmutan entre sí*. Ello significa que no podemos medirlos al mismo tiempo, ya que si medimos uno y después el otro el resultado será diferente del que habríamos obtenido si los hubiéramos medido en el orden inverso. En este ejemplo, la razón de la no-conmutatividad no resulta difícil de entender si se sabe algo de cálculo: Derivada de $(X\psi) = \psi + X(\text{Derivada de } \psi)$, lo cual no es igual a $X(\text{Derivada de } \psi)$, que representa la aplicación de los dos operadores en el orden inverso. La primera expresión es consecuencia de la regla para la derivada de un producto.

El hecho de que los dos operadores X (posición de la partícula) y Derivada (momento de la partícula) no conmuten tiene inmensas consecuencias en mecánica cuántica. Nos indica que no podemos medir la posición y el momento de la misma partícula y esperar una buena precisión en ambas medidas. Si conocemos una de las dos cantidades con buena precisión (la que medimos *primero*), la otra la conoceremos con escasa precisión. Ello es una consecuencia matemática de la no-conmutatividad de los operadores asociados con esas dos clases de medidas. El hecho de que la posición y el momento de la misma partícula no puedan ser determinados con alta precisión se conoce como el *principio de incertidumbre*, y fue descubierto asimismo por Werner Heisenberg, siendo ésta su

segunda contribución importante a la teoría cuántica tras la formulación de la mecánica matricial. El principio de incertidumbre de Heisenberg es fundamental en mecánica cuántica e introduce en ella las ideas de la teoría de la probabilidad a un nivel muy básico. Afirma que la incertidumbre no puede eliminarse en los sistemas cuánticos. Se expresa como:

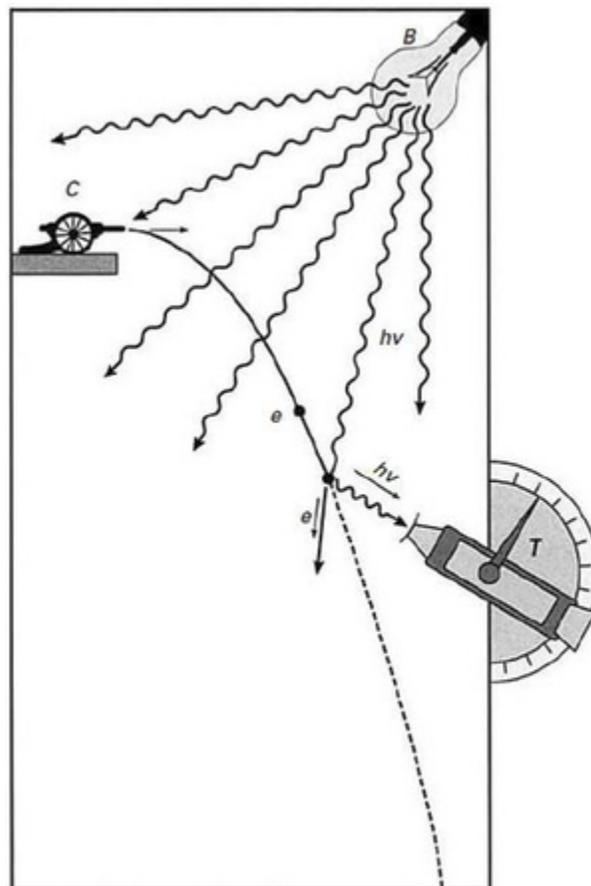
$$\Delta p \Delta x \geq h$$

Aquí Δp es la incertidumbre respecto al momento y Δx la correspondiente a la posición. El principio establece que el producto de ambas incertidumbres es mayor o igual que la constante de Planck. Las implicaciones de esta aparentemente sencilla fórmula son muy grandes. Si conocemos de forma muy precisa la posición de una partícula, *no podemos* conocer su momento mejor que un determinado nivel de precisión, *no importa lo que nos esforcemos en ello y lo buenos que puedan ser nuestros aparatos*. Recíprocamente, si conocemos exactamente el momento de una partícula, no podemos conocer bien su posición. La incertidumbre en el sistema no puede desaparecer nunca ni reducirse por debajo del nivel prescrito por la fórmula de Heisenberg.

Para ilustrar el principio de incertidumbre aplicado a la posición y el momento de una partícula, usaremos el *microscopio de Heisenberg*. En febrero de 1927, Bohr dejó a Heisenberg trabajando solo en Copenhague y se fue a esquiar con su familia a Noruega. El estar solo permitió a Heisenberg que sus pensamientos vagaran

libremente, como más tarde lo describió él mismo, y decidió hacer del principio de incertidumbre el punto central de su interpretación de la naciente teoría cuántica. Recordaba una discusión que había tenido hacía mucho tiempo con un estudiante compañero en Gotinga, que le dio la idea de determinar la posición de una partícula con la ayuda de un microscopio (ideal) de rayos gamma. Esta idea afirmó en su mente el principio al que ya había llegado sin necesidad de esa analogía. Heisenberg escribió rápidamente una carta a Wolfgang Pauli (otro pionero de la teoría cuántica) describiendo su experimento ideal acerca del uso de un microscopio de rayos gamma para determinar la posición de una partícula, y cuando recibió la respuesta de Pauli, usó las ideas en la carta para mejorar el artículo que estaba escribiendo. Cuando Bohr regresó de Noruega, le mostró el trabajo, pero Bohr no estaba satisfecho. Bohr deseaba que la argumentación de Heisenberg surgiera de la dualidad entre partículas y ondas. Tras algunas semanas de discusión entre ambos, Heisenberg admitió que el principio de incertidumbre estaba ligado a los otros conceptos de la mecánica cuántica y el trabajo estuvo listo para su publicación. ¿Qué es el microscopio de Heisenberg? La siguiente figura muestra el microscopio. La radiación se dirige sobre una partícula y se refleja en la lente. Al ser reflejada la radiación por la partícula hacia el interior del microscopio, ejerce sobre la partícula a la que ilumina una presión, la cual la desvía de la trayectoria esperada. Si deseamos reducir el efecto del impacto sobre la partícula, para no perturbar demasiado su momento, debemos aumentar la longitud

de onda. Pero cuando la longitud de onda llega a una determinada cantidad, la radiación entrante en el microscopio es incapaz de localizar la partícula. Así que, de una u otra forma, existe un mínimo para el *producto* de las imprecisiones en la posición y en el momento.



Otra contribución importante de Heisenberg a la mecánica cuántica fue su análisis del concepto de *potencialidad* en sistemas cuánticos. Lo que separa la mecánica cuántica de la mecánica clásica es que en el mundo cuántico lo potencial está siempre presente, en adición a lo que sucede realmente. Esto es muy importante para entender el

entrelazamiento. El entrelazamiento es un fenómeno cuántico, sin un análogo clásico. Es la existencia de potencialidades lo que crea el entrelazamiento. En particular, en un sistema de dos partículas entrelazadas, el entrelazamiento se evidencia en el hecho de que potencialmente se den AB (partícula 1 en el estado A y partícula 2 en el estado B) y CD (partícula 1 en el estado C y partícula 2 en el estado D). Profundizaremos en esto más adelante.

Los años treinta fueron testigos de grandes cambios tanto en la vida de Heisenberg como en la ciencia. En 1932 se le concedió el premio Nobel de física. El año siguiente Hitler llegó al poder y la ciencia alemana empezó a desplomarse con la expulsión de los intelectuales y hombres de ciencia judíos de Alemania por parte de los nazis. Heisenberg permaneció en Alemania, viendo cómo sus colegas y amigos se iban a América y a otros lugares. En una infame publicación de las SS, fue ultrajado como un «judío blanco» y «un judío en espíritu, inclinación y carácter», presumiblemente debido a sus amigos judíos. No obstante, se quedó en la Alemania nazi a pesar de los ruegos de sus colegas para que se marchara de allí. Dónde estaban sus verdaderas simpatías es un misterio. Se ha sugerido que había lazos entre las familias de Heisenberg y Himmler.¹⁴ Se ha sugerido incluso que Heisenberg empleó esta relación para pedir directamente a la dirección de las SS que pusiera fin a las diatribas contra él. En 1937, un Heisenberg de treinta y cinco años, que padecía entonces una depresión, conoció a una mujer de veintidós años en una librería de Leipzig. Los dos

¹⁴ Armin Hermann, *Werner Heisenberg 1901-1976*, Internations, Bonn, 1976.

compartían un gran interés por la música y hacían música juntos, él cantando y ella tocando el piano. En tres meses se prometieron y poco después se casaron.

En 1939, Heisenberg fue llamado a filas. Por entonces, él era el único físico de primera magnitud que quedaba en Alemania, y no fue ninguna sorpresa que en su servicio militar los nazis esperasen de él que desarrollara una bomba atómica. En 1941, Heisenberg y sus colegas construyeron un reactor nuclear, que escondieron en una caverna bajo la iglesia de un pequeño pueblo. Afortunadamente para la humanidad, el principal proyecto de Hitler era Peenemunde (el esfuerzo nazi por la construcción de misiles, que se lanzaban sobre Gran Bretaña) y el proyecto nuclear estaba por debajo en la lista de prioridades. Como se supo luego, Heisenberg no sabía cómo hacer una bomba atómica, y el proyecto Manhattan en Estados Unidos iba muy por delante del esfuerzo nazi. Después de la guerra, Heisenberg siguió siendo un científico líder en Alemania, y probablemente se llevó consigo a la tumba las respuestas a las muchas preguntas que ahora nos hacemos acerca del papel real que desempeñó en el intento nazi de construir una bomba atómica.

Capítulo 9

El gato de Wheeler

Comenzaremos a entender lo simple que es el universo cuando admitamos lo extraño que es.

JOHN ARCHIBALD WHEELER

Muchos libros de mecánica cuántica hablan del ejemplo que empleaba Schrödinger para ilustrar una paradoja de la superposición de estados. Ese ejemplo ha llegado a conocerse como «el gato de Schrödinger». Schrödinger se imaginaba un gato metido en una caja cerrada con un aparato que contiene una pizca de material radiactivo. Una parte del aparato es un detector que controla un mecanismo para romper una ampolla llena de cianuro. Cuando un átomo del elemento radiactivo sufre una desintegración que registra el detector, la ampolla se rompe y mata al gato. Como la desintegración radiactiva es un *suceso cuántico*, los dos estados —el gato vivo y el gato muerto— pueden encontrarse superpuestos. Entonces, antes de abrir la caja y hacer una medida —esto es, antes de descubrir realmente si el gato está vivo o muerto— el gato está vivo y muerto a la vez. Implicaciones poco gratas aparte, este ejemplo resulta demasiado instructivo. Murray Gell-Mann dice en su libro *El quark y el jaguar* que el gato de Schrödinger no es un ejemplo mejor que el de abrir una caja que contiene un gato que ha estado durante un largo viaje en el depósito de equipajes de un

avión. El dueño del gato al recibir la caja hará inevitablemente la terrible pregunta: ¿está mi gato vivo o muerto? De acuerdo con Gell-Mann, el problema que ilustra el gato de Schrödinger es el de la decoherencia. Un gato es un sistema macroscópico, no un elemento del mundo microscópico cuántico, y como tal, interactúa muy extensamente con su entorno: respira aire, absorbe y emite radiación, come y bebe. Por consiguiente, es imposible que el gato se comporte de un modo específicamente cuántico, que esté en el filo de la navaja, «muerto y vivo a la vez», como un electrón en una superposición de más de un estado.

No obstante, a mí me gusta usar un gato para ilustrar este punto, pero no necesitamos que esté muerto, de modo que nuestro ejemplo no será macabro. Consideraremos un gato que está en dos sitios a la vez, justamente como el electrón. Imagínese el electrón como un gato, el gato de Wheeler.

John Archibald Wheeler tenía un gato que vivía con él y su familia en Princeton. La casa de Einstein estaba cerca, y al gato parecía agradaarle ésta. Wheeler veía a Einstein frecuentemente de regreso a su casa, flanqueado por sus ayudantes, y con seguridad, el teléfono sonaba tras unos minutos y Einstein estaba al aparato preguntándole si deseaba que le llevara su gato a casa. Imaginemos un gato que, en lugar de estar muerto y vivo a la vez como en el ejemplo de Schrödinger, se halla en una superposición de estar a la vez en la casa de Einstein y en la de Wheeler. Cuando realizamos una medida: Einstein o Wheeler buscando al gato, éste se ve

obligado a hallarse en uno de los dos estados, justamente igual que una partícula o un fotón.

La idea de superposición de estados es importante en mecánica cuántica. Una partícula puede encontrarse en dos estados a la vez. El gato de Wheeler, supongámoslo, puede hallarse en una superposición de los dos estados; puede estar *a la vez* en la casa de Wheeler *y* en la de Einstein. Como le gusta señalar a Michael Horne, en la mecánica cuántica abandonamos el cotidiano «bien-o» lógico en favor del nuevo «ambos-y» lógico. Y ese concepto es ciertamente muy extraño porque nunca lo encontramos en nuestra vida cotidiana. Tal vez se puedan poner algunos ejemplos más. Estoy en el banco y hay dos colas frente a las ventanillas. Ambas son igual de largas y no hay nadie detrás de mí. Deseo estar en la que avanza más rápidamente, pero no sé cuál será. Permanezco entre ambas, o voy pasando de una a la otra cuando una de ellas se hace más corta. Estoy en «ambas colas a la vez». Estoy en una superposición de los dos estados: (estoy en la cola 1) y (estoy en la cola 2). Volviendo al gato de Wheeler, éste se encuentra en una superposición de los siguientes estados: (gato en casa de Wheeler) y (gato en casa de Einstein). Por supuesto, en el ejemplo original del gato de Schrödinger, el gato está en una superposición más triste: (gato muerto) y (gato vivo).

John Archibald Wheeler nació en Jacksonville, Florida, en 1911. Obtuvo su doctorado en física por la Universidad Johns Hopkins en 1933, y estudió asimismo física con Niels Bohr en Copenhague. Fue catedrático de física en la Universidad de Princeton, y su estudiante

estrella allí fue Richard Feynman (1918-1988). Feynman, que años más tarde ganaría el premio Nobel y sería uno de los físicos norteamericanos más famosos, escribió su brillante disertación doctoral bajo la dirección de Wheeler, y se doctoró en Princeton en 1942. Su tesis, que desarrollaba un trabajo anterior de Dirac, introducía una importante idea en mecánica cuántica: la aplicación del principio de mínima acción al mundo cuántico. Lo que hizo Feynman fue inventar la formulación de la suma-de-historias en mecánica cuántica. Esa formulación considera todos los caminos que puede seguir una partícula (o un sistema) para ir de un punto a otro. Cada camino tiene su probabilidad, y por lo tanto se puede descubrir el camino más probable que ha seguido la partícula. En la formulación de Feynman, se emplean las amplitudes de onda asociadas a cada camino para hallar la amplitud total —y de ahí la distribución de probabilidad— de resultados en el punto final común a todos los caminos posibles.

Wheeler estaba entusiasmado con el trabajo de Feynman, y le enseñó su tesis a Einstein. «¿No es maravilloso?», le preguntó. «¿No le hace creer en la teoría cuántica?». Einstein ojeó la tesis, meditó un momento y respondió: «Aún no creo que Dios juegue a los dados... pero quizás me he ganado el derecho a cometer mis errores».¹⁵

Paul A. M. Dirac (1902-1984) fue un físico británico que empezó su carrera como ingeniero eléctrico. Como tenía dificultades para encontrar trabajo en su especialidad, solicitó una beca a la

¹⁵ Entrevista del autor a John Archibald Wheeler, 24 de junio de 2001.

Universidad de Cambridge. Con el tiempo se convirtió en una de las figuras clave de la física del siglo XX y ganó el premio Nobel. Dirac desarrolló una teoría que combinaba la mecánica cuántica con la relatividad especial. Su trabajo, por tanto, hacía posible que las ecuaciones de la mecánica cuántica fueran corregidas para tener en cuenta los efectos relativistas en el caso de partículas que se mueven a velocidades del orden de la velocidad de la luz. Una consecuencia de su trabajo fue la predicción de la existencia de las *antipartículas*. El artículo de Dirac sobre la posibilidad teórica de la existencia de antipartículas se publicó en 1930, y un año después el físico estadounidense Carl Anderson descubrió el *positrón*, el electrón con carga positiva, en el análisis de los rayos cósmicos. Al encontrarse, el electrón y el positrón se aniquilan mutuamente, produciendo dos fotones.

En 1946, Wheeler propuso que el par de fotones producido cuando se aniquilan entre sí un positrón y un electrón podría usarse como test de la teoría de la electrodinámica cuántica. De acuerdo con dicha teoría, los dos fotones deberían tener polarizaciones opuestas: si uno está polarizado verticalmente, el otro ha de estarlo horizontalmente. «Polarización» quiere decir la dirección espacial del campo eléctrico de la onda electromagnética del fotón.

En 1949, Chen-Shiung Wu (conocida como «Madame Wu», siguiendo la forma en que los físicos se referían a Marie Curie) e Irving Shakhnov, de la Universidad de Columbia, llevaron a cabo el experimento sugerido por Wheeler. Wu y Shakhnov produjeron *positronio*, un elemento artificial constituido por un electrón y un

positrón girando uno alrededor del otro, el cual «vive» durante una fracción de segundo, hasta que el electrón y el positrón aproximándose en espiral el uno al otro acaban aniquilándose entre sí, y se emiten dos fotones. Wu y Shakhnov usaron cristales de antraceno para analizar la dirección de polarización de los fotones resultantes. Su resultado confirmó la predicción de Wheeler. Los dos fotones tenían polarizaciones opuestas. El experimento de Wu y Shakhnov de 1949 fue el primero en la historia que produjo fotones entrelazados, aunque este importante hecho sólo se reconoció ocho años después, en 1957, por Bohm y Aharonov.

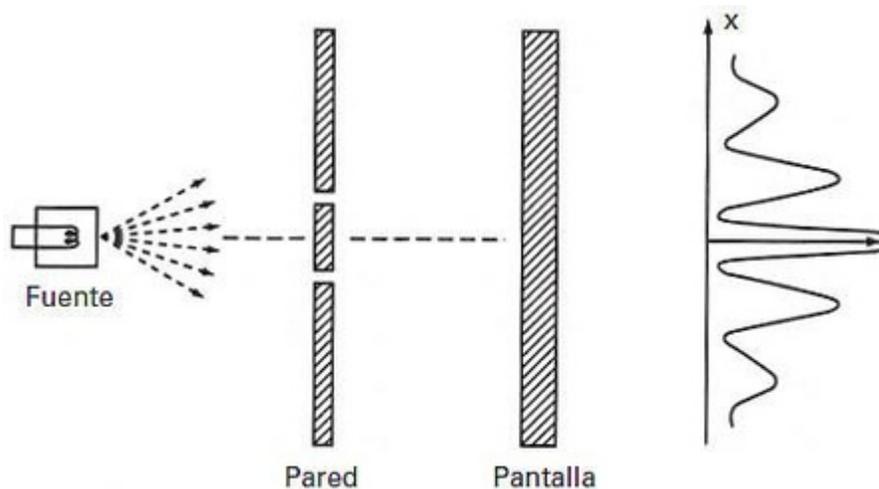
Además de a la mecánica cuántica, Wheeler ha realizado importantes contribuciones a muchas áreas de la física como la gravitación, la relatividad y la cosmología. Él inventó el término «agujero negro» para describir la singularidad espacio-temporal resultante de la muerte de una estrella de gran masa. Junto con Niels Bohr, Wheeler descubrió la fisión nuclear. En enero de 2001, a la edad de noventa años, sufrió un ataque cardíaco. La enfermedad cambió su visión de la vida, y decidió que deseaba emplear el tiempo que le quedaba trabajando en los problemas más importantes de la física, los problemas del cuanto.

Según Wheeler, el problema del cuanto es el problema del ser, de la existencia. Recuerda vívidamente la historia del debate cuántico entre Bohr y Heisenberg, relatada por H. Casimir, un estudiante de Bohr. Ambos fueron invitados a casa del filósofo Hoffding, un amigo común, a fin de discutir el experimento de la doble rendija de Young y sus implicaciones sobre el cuanto. ¿Adónde fue la partícula?

¿Pasó por un agujero o por el otro? Con la discusión ya avanzada, Bohr, meditando sobre el tema, murmuró: «Ser... ser... ¿qué *significa* ser?».

El mismo John Wheeler llevó más tarde el experimento de la doble rendija a un nuevo nivel, mostrando de un modo convincente y elegante que en una variante de este experimento, con el mero acto de medir, un experimentador puede cambiar la *historia*. Mediante la decisión de si se desea medir algo de una manera, o de otra, el experimentador, un ser humano, es capaz de determinar lo que «habrá sucedido en el pasado». La siguiente descripción del montaje experimental de Wheeler está adaptada de su artículo «Law without law» (Ley sin ley).¹⁶

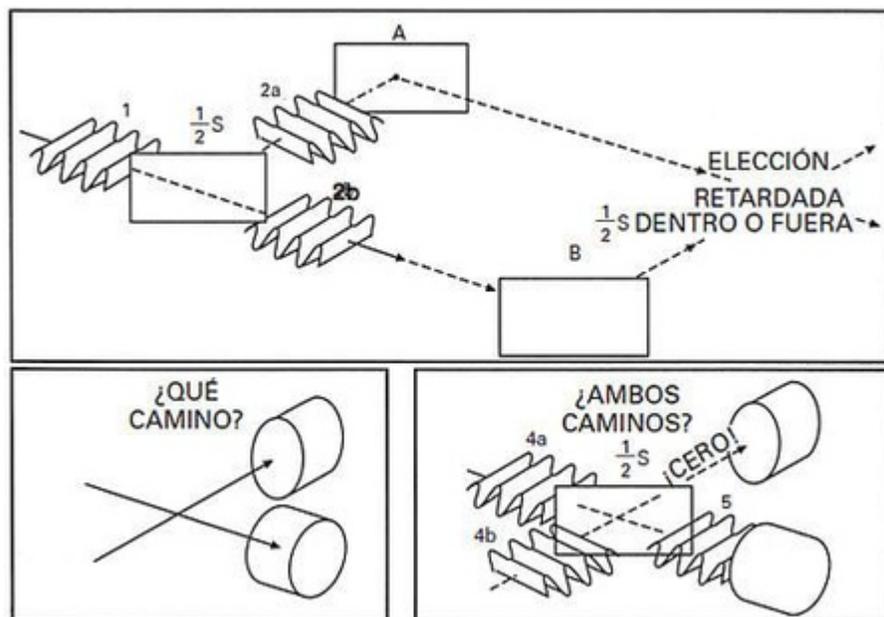
Wheeler describía en el artículo una variante moderna del montaje del experimento de la doble rendija de Young. La siguiente figura muestra la disposición usual de dicho experimento.



¹⁶ J. A. Wheeler, «Law without law», en la colección de artículos, *Quantum theory and measurement*, edición de J. A. Wheeler y W. H. Zurek, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1983.

Los rayos de luz chocan con la pared donde están las rendijas y producen dos conjuntos de ondas, como sucedería con ondas de agua al salir de las rendijas. En su punto de encuentro, las ondas luminosas interfieren entre sí, bien constructivamente, dando lugar a una amplitud mayor, o destructivamente, produciendo una amplitud menor e incluso anulándose entre sí. El montaje moderno usa espejos en lugar de rendijas, y emplea luz láser, que puede controlarse con mucha más precisión que la luz ordinaria. En dispositivos experimentales más avanzados, se usa la fibra óptica como el medio de elección de los experimentos.

El montaje más simple de un experimento análogo al de la doble rendija se muestra en la figura siguiente.



Se tiene un diseño de tipo «diamante» (de la baraja), en el que la luz que procede de una fuente se dirige sobre un espejo semiplateado que permite que la mitad de la luz se transmita y la otra mitad se refleje. Tal espejo se llama un *separador de haz*, ya que divide el haz incidente en dos haces separados: el reflejado y el transmitido. Cada uno de ellos se refleja después en un espejo que hace que se crucen y seguidamente se detectan. Observando qué detector registra la llegada de un fotón, el experimentador puede decir qué camino ha seguido éste. ¿Fue transmitido por el separador de haz o fue reflejado por éste? Alternativamente, el experimentador puede situar otro separador de haz (espejo semiplateado) justo en el punto de cruce de los dos haces. La colocación de ese espejo semiplateado causará que los haces interfieran entre sí, justamente igual que en el experimento de la doble rendija. En tal caso, sólo se disparará un detector (donde los haces interfieren constructivamente) y no lo hará el otro (ya que allí la interferencia es destructiva). Cuando esto sucede en un experimento con luz muy débil en el que se envían los fotones uno a uno, resulta que el fotón va por *ambos* caminos: es a la vez transmitido y reflejado por el primer separador de haz (de otra manera no habría interferencia: ambos detectores se dispararían, lo cual no sucede).

Wheeler dice que Einstein, que usó una idea similar en un experimento ideal, argüía que «no es razonable que un fotón viaje simultáneamente por dos rutas. Quítese el espejo semiplateado y se encontrará que se dispara un contador o el otro, de modo que el fotón ha seguido sólo una ruta. Sigue sólo una ruta, pero sigue

ambas rutas; sigue ambas rutas, pero sólo sigue una ruta. ¡Qué absurdo! ¡Qué evidente es que la teoría cuántica es inconsistente!» Bohr insistía en que no había inconsistencia alguna. «Estamos considerando dos experimentos diferentes. El que no tiene el espejo semiplateado indica qué camino (ha seguido el fotón). El que incluye el espejo semiplateado muestra que el fotón ha seguido los dos caminos. Pero es imposible hacer ambos experimentos a la vez».¹⁷

Wheeler formuló la pregunta: ¿puede el experimentador determinar qué ruta sigue el fotón? Si el experimentador deja fuera el segundo separador de haz, los detectores indican la ruta seguida por el fotón. Si se coloca el segundo separador de haz, sabemos, por el hecho de que un detector se dispare y el otro no, que el fotón ha seguido ambos caminos a la vez. Antes de tomar la decisión de introducir el separador de haz, sólo puede describirse el fotón en el interferómetro como en un estado con varias potencialidades (puesto que las potencialidades pueden coexistir). El hecho de introducir, o no introducir, el separador de haz determina qué potencialidad se actualiza. Los dos montajes se muestran en la figura anterior.

Lo sorprendente, según Wheeler, es que mediante *elección retardada* el experimentador puede cambiar la historia; puede decidir si colocar o no el segundo separador de haz *después de que el fotón haya recorrido la mayor parte del camino hasta su destino*. La ciencia moderna nos permite escoger aleatoriamente la acción (colocar o no el separador de haz) tan rápidamente —en una

¹⁷ John A. Wheeler, «Law without law» (véase nota 2 de este capítulo).

pequeñísima fracción de segundo— que el fotón prácticamente ya haya realizado su recorrido. Al proceder así, estamos determinando *después del hecho* qué «decisión» habrá tomado el fotón. ¿Habrá seguido un camino o ambos?

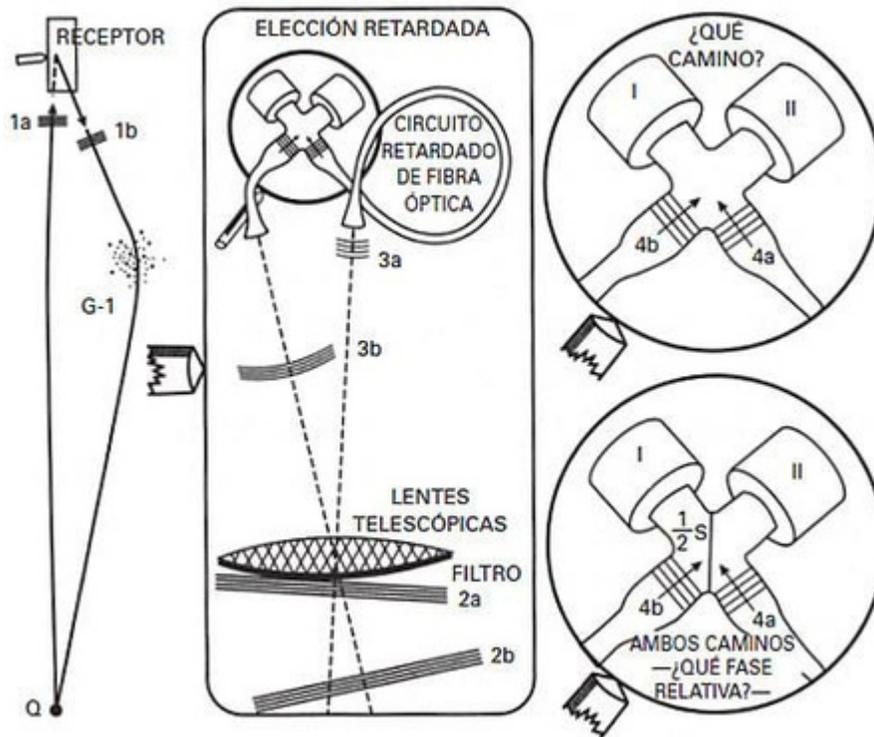
A continuación Wheeler trasladó esta, aparentemente, estrafalaria idea a la escala cósmica.¹⁸ Se preguntó: ¿cómo llegó el universo a ser, a existir?, ¿por medio de un proceso extraño y remoto, más allá de toda esperanza de análisis? Entonces Wheeler vinculó el Big Bang y la creación del universo a un evento cósmico, y lo hizo años antes de que los cosmólogos de los años ochenta y noventa llegaran a la idea de que las galaxias se formaron a causa de fluctuaciones cuánticas en la «sopa» primordial del Big Bang. Su respuesta a la creación y la historia del universo es que deberíamos mirar el experimento de elección retardada. Un experimento tal «retrocede hacia el pasado en clara oposición al orden normal del tiempo». Wheeler ofrece el ejemplo de un cuásar, conocido como 0957+561A,B, que los científicos consideraron durante algún tiempo como dos objetos y ahora se sabe que es un cuásar. La luz de ese cuásar se divide al pasar «cerca» de una galaxia interpuesta entre éste y nosotros. Dicha galaxia actúa como una «lente gravitacional», en torno a la cual se divide la luz del cuásar. La galaxia toma dos rayos de luz, separados entre sí cincuenta mil años luz en su camino del cuásar a la Tierra, y los reúne de modo que llegan juntos a la Tierra. Podemos realizar un experimento de acción retardada con el cuásar actuando como el espejo

¹⁸ John A. Wheeler, «Law without law» (véase la nota 2 de este capítulo).

semiplateado y la galaxia como los dos espejos completos del montaje experimental usado en el laboratorio. Tenemos entonces un experimento cuántico a escala cósmica. En lugar de una distancia de unos cuantos metros, como en el laboratorio, aquí tenemos un experimento con distancias de miles de millones de años luz. No obstante, el principio es el mismo. Wheeler dice:

Nos levantamos por la mañana y pasamos el día meditando sobre si observar (por) «qué camino» u observar la interferencia entre «ambos caminos». Cuando llega la noche y podemos finalmente usar el telescopio, dejamos el espejo semiplateado fuera o lo ponemos, de acuerdo con nuestra elección. El filtro monocromatizador colocado sobre el telescopio hace que el «contaje» sea bastante lento. Hemos de esperar una hora para el primer fotón. Cuando éste dispara un contador, descubrimos «por qué camino» llegó con uno de los montajes; o, mediante el otro, cuál es la fase relativa de las ondas asociadas con la travesía del fotón desde la fuente hasta el receptor «por ambos caminos», separados quizás cincuenta mil años luz cuando pasan por la lente galáctica g-1. Pero el fotón ha pasado ya por esa galaxia miles de millones de años antes de que tomáramos nuestra decisión. Éste es el sentido en el que, hablando sin mucha precisión, decidimos lo que el fotón habrá hecho después de lo que ya ha hecho. En realidad es incorrecto hablar del «camino» del fotón. Para expresarlo apropiadamente, recordemos una vez más que no tiene

sentido hablar del fenómeno hasta que no ha sido finalizado mediante un acto de amplificación irreversible: «Ningún fenómeno elemental es un fenómeno hasta que es un fenómeno registrado (observado)».



Reproducido de J. A. Wheeler, Law without Law, Wheeler y Zurek, eds., 1983.

Capítulo 10

El matemático húngaro

Me consta, no obstante, que cuando Bohr se encontraba en Princeton discutía frecuentemente la teoría de la medida con Johnny Von Neumann, que fue un pionero en este campo. En mi opinión, estas consideraciones han contribuido, de manera importante, más a la matemática que a la física.

ABRAHAM PAIS

Jancsi («Johnny») von Neumann nació en Budapest en 1903 en una familia acomodada de banqueros. Entre 1870 y 1910 Budapest experimentó un crecimiento económico sin precedentes, y mucha gente con talento emigró allí desde el campo húngaro y desde otras naciones para aprovechar las oportunidades que les brindaba esta próspera capital. Hacia 1900 Budapest presumía de tener seiscientos cafés, numerosas salas de espectáculos, una orquesta sinfónica y una compañía de ópera prestigiosas, y un sistema educativo que era la envidia de Europa. Mucha gente ambiciosa y trabajadora se agolpaba en Budapest, donde tenía oportunidad de lograr éxito en la creciente vida económica de la ciudad. Entre los

recién llegados se contaban muchos judíos de toda Europa, que se congregaban en una ciudad conocida por su tolerancia religiosa y su ilustrada población.¹⁹

Los padres de Johnny, Max y Margaret Neumann, llegaron a Budapest desde la ciudad de Pecs, en la frontera yugoslava, como hicieron muchos judíos por entonces, a finales del siglo XIX. Max trabajó muy duramente, pero fue espléndidamente pagado y en unos pocos años se convirtió en un alto ejecutivo de un acreditado banco húngaro que prosperaba prestando dinero a propietarios de pequeños negocios y a corporaciones agrícolas. Max lo hizo realmente tan bien que unos años después pudo comprar a su familia un piso de 18 habitaciones en un edificio donde también residían otras familias judías ricas, entre ellas la de su cuñado. Los niños de ambas familias correteaban juntos por el edificio, entrando y saliendo de los dos suntuosos pisos.

Además de éxito financiero, Max Neumann tuvo cierta influencia en la política húngara. En 1913 se le concedió un título nobiliario hereditario por ser un relevante personaje en la sociedad húngara, así como un prestigioso consejero de finanzas del gobierno húngaro. Esto era el equivalente húngaro a ser nombrado *sir* por la reina de Inglaterra. Aparte de ese gran honor —raro entre los judíos— Max podía añadir el prefijo «von» a su nombre. Así que se convirtió en Max von Neumann, miembro de la nobleza húngara. Sus hijos,

¹⁹ Gran parte de la información bibliográfica de este capítulo ha sido adaptada de la obra de Norman Macrae *John von Neumann: the scientific genius who pioneered the modern computer, game theory, nuclear deterrence, and much more*, American Mathematical Society, Providence, RI, 1992.

John, el mayor, y sus dos hermanos, Michael y Nicholas, disfrutaron el mismo privilegio. A los diez años, el joven Jancsi Neumann se convirtió en John von Neumann, y durante toda su vida le encantó su estatus de noble europeo. La familia diseñó incluso su propio escudo de armas, en el que figuraban un conejo, un gato y un gallo. Max creía que Johnny era como un gallo porque a veces cacareaba; Michael parecía un gato y Nicholas, el más joven, era el conejo. Los Von Neumann exhibían su escudo de armas en su impresionante piso en la ciudad y también en la puerta de la suntuosa casa de campo que compraron después y donde pasaban los veranos. La familia no sólo se convirtió en miembro de la aristocracia húngara, sino que se contaba entre los más firmes defensores de ésta. Después de que Bela Kun estableciera una dictadura comunista en 1919, Max von Neumann viajó a Viena e instó al almirante Horthy a atacar a las fuerzas de Kun para volver a tomar el poder en Hungría, lo que la liberó del comunismo por primera vez (la segunda vez fue tras el derrumbamiento de la Unión Soviética).

En el funesto año de 1913, cuando la familia se hizo noble y se declaró la guerra a lo largo y ancho de Europa,²⁰ Johnny empezó a mostrar la asombrosa capacidad intelectual que con el tiempo acabaría separándolo de su familia, y de todos los que le rodeaban. El descubrimiento se produjo, de un modo harto inocente, cuando su padre pidió al entonces niño de diez años multiplicar dos

²⁰ Como es sabido, la gran guerra europea (o primera guerra mundial) no empezó en 1913, sino en agosto de 1914. (*N. del t.*)

números y éste lo hizo con una rapidez apabullante. Max dio seguidamente dos números muy grandes a Johnny para que los multiplicara, y el niño lo hizo en unos segundos. Esto maravilló al padre, que empezó a darse cuenta de que tenía un hijo fuera de lo común. Johnny estaba mucho más dotado de lo que nadie había imaginado.

Sólo después llegaron las revelaciones de que Johnny sabía más acerca de lo que le enseñaban en la escuela que sus mismos maestros. En las conversaciones familiares de sobremesa, él iba muy por delante de los demás en la comprensión de las ideas y asuntos tratados.

Cuando sus padres comprendieron que su hijo mayor era un superdotado, no perdieron la oportunidad de prepararlo para ser algo grande. Le procuraron profesores particulares que le enseñaban matemáticas avanzadas y ciencia. Y el padre dirigía discusiones intelectuales en torno a la mesa del comedor en las cuales se esperaba que participaran todos los miembros de la familia. Esto permitió al joven genio refinar aún más su talento.

A la edad de once años, Johnny fue enviado al *gymnasium*, institución centroeuropea similar al instituto de enseñanza media (o secundaria), que normalmente sólo admitía estudiantes varios años mayores. En el *gymnasium* estudió matemáticas, griego, latín y otras materias, sobresaliendo en todas ellas. Laslo Ratz, un instructor de matemáticas del *gymnasium*, se dio cuenta enseguida de que tenía un genio en su clase. Se dirigió a Max von Neumann y le sugirió que le proporcionara a su hijo aún más formación en

matemáticas. Se dispuso que Ratz le daría clases particulares tres veces por semana. Pero Ratz se dio cuenta pronto de que Johnny sabía más que él, y entonces lo llevó a la Universidad de Budapest. Allí, el muchacho, sin duda la persona más joven que jamás había asistido a la universidad, se inscribió en los cursos de matemáticas avanzadas.

Un año después de empezar las clases en la universidad, un compañero (varios años mayor) le preguntó si tenía noticia de un determinado teorema de teoría de números. Johnny conocía el teorema; era un resultado no probado sobre el que habían trabajado muchos matemáticos. Su amigo (que años más tarde sería premio Nobel) le preguntó si podría demostrarlo. Johnny trabajó en el teorema durante varias horas y acabó probándolo. Un año más tarde se matriculó en la prestigiosa universidad técnica de Zúrich, el ETH (el alma mater de Einstein), y un poco después en la Universidad de Berlín. En las tres instituciones despertó admiración de renombrados matemáticos, entre ellos el famoso David Hilbert (1862-1943), por su agudo entendimiento de las matemáticas y su increíble capacidad para hacer cálculos y analizar problemas a una velocidad inaudita.

Cuando estaba resolviendo un problema matemático, Von Neumann se ponía de cara a la pared, sin expresión alguna en su rostro, y hablaba en voz baja consigo mismo durante varios minutos. Completamente inmerso en el problema, ni oía ni veía nada de lo que sucedía a su alrededor. Después, de repente, su rostro volvía a

tener su expresión normal, se daba la vuelta, y decía tranquilamente la solución del problema.

Johnny von Neumann no fue el único intelecto sobresaliente que dio Budapest en esos días. Entre 1875 y 1905 nacieron en Budapest seis premios Nobel (cinco de ellos judíos). Otros cuatro líderes de la ciencia y de las matemáticas modernas nacieron también allí en ese mismo período. Todos ellos habían ido a las soberbias escuelas de Hungría, los *gymnasia*, y fueron también excelentemente educados en sus casas. Medio siglo más tarde se le preguntó al premio Nobel Eugene Wigner, que era uno de aquellos diez genios, cuál creía que era la razón de este fenómeno. Wigner contestó que no entendía la pregunta. «Hungría ha producido sólo un genio —dijo—. Su nombre es John von Neumann».

La mayoría de los prodigios húngaros emigró a Estados Unidos, donde su influencia en el desarrollo de la ciencia moderna fue inmensa. Cuando llegaron a Estados Unidos, sus especiales dotes asombraron a la comunidad científica, y algunos empezaron a especular medio en serio acerca de si esos científicos extranjeros no serían húngaros, sino extraterrestres decididos a dominar la ciencia norteamericana. El primero de los diez en llegar a Estados Unidos fue Theodore von Karman. A éste le siguieron Edward Teller y los otros, incluido John von Neumann, en los años treinta. Al llegar, a Teller le contaron la historia del origen extraterrestre de esos genios. Teller adoptó una expresión de preocupación y dijo: «Von Karman se ha debido ir de la lengua».

Pero antes de emigrar a Estados Unidos, Johnny von Neumann — seguramente el mayor genio de todos ellos— recibió una soberbia formación en matemáticas y ciencia que ayudó a que se convirtiese en uno de los mayores matemáticos de su tiempo. Esta formación tuvo lugar en las universidades de Zúrich, Gotinga y Berlín.

En 1926, Von Neumann fue a Gotinga y escuchó una conferencia de Heisenberg sobre la mecánica matricial y la diferencia entre su enfoque de la mecánica cuántica y el de Schrödinger (más o menos la misma charla que el autor de este libro oyó en Berkeley 46 años después). Entre el público se hallaba también David Hilbert, el mayor matemático de la época. Según Norman Macrae (*John von Neumann*, AMS, 1999), Hilbert no entendía la teoría cuántica tal como la presentaba Heisenberg y le pidió a su ayudante que se la explicara. Al ver eso Von Neumann, decidió explicarle la teoría cuántica al anciano matemático en términos que éste pudiera entender, esto es, en lenguaje matemático. Y para ello, Von Neumann utilizó las ideas del *espacio de Hilbert*, con gran alegría de Hilbert.

En la actualidad, los físicos usan el espacio de Hilbert para analizar y explicar el mundo de lo muy pequeño. Un espacio de Hilbert es un espacio vectorial con una norma (una medida de la distancia) y con la propiedad de completitud.

Von Neumann desarrolló el artículo que escribió en 1926 para Hilbert en un libro llamado *Los fundamentos matemáticos de la*

mecánica cuántica publicado en 1932.²¹ Von Neumann demostró que la geometría de los vectores de un espacio de Hilbert complejo tiene las mismas propiedades formales que los estados de un sistema cuántico. Asimismo dedujo un teorema, empleando algunas hipótesis sobre el mundo físico, que probaba que no existen «variables ocultas», cuya inclusión podría reducir la incertidumbre en los sistemas cuánticos. Aunque la posteridad probaría que esto es así, John Bell desafió con éxito las hipótesis de Von Neumann en sus atrevidos artículos de los años sesenta. En cualquier caso, fue uno de los fundadores de los fundamentos matemáticos de la teoría cuántica y su trabajo es importante a la hora de establecer modelos matemáticos para los inexplicables fenómenos físicos del mundo cuántico. Esencial entre esos conceptos es la idea del espacio de Hilbert.

Un espacio de Hilbert, denotado por H , es un espacio vectorial completo (donde *completo* significa que cualquier secuencia de elementos del espacio converge a un elemento del mismo). Cuando se aplica en mecánica cuántica, el espacio se define sobre los números complejos, lo cual es indispensable a fin de dotarlo de la estructura necesaria para que resulte ser un modelo adecuado en diferentes situaciones físicas. Los números complejos son aquellos que pueden contener el elemento i (la raíz cuadrada de -1). El espacio de Hilbert H permite a los físicos manipular vectores, es decir, entes matemáticos que poseen magnitud y dirección:

²¹ Primera edición en alemán. La primera edición española es de 1949, en excelente traducción de R. Ortiz Fornaguera. Existe una segunda edición, facsímil de la primera, con una amplia introducción de J. M. Sánchez Ron (CSIC, 1991). (*N. del t.*)

pequeñas flechas en el espacio de Hilbert. Estas flechas son los elementos matemáticos de la teoría física pues representan los estados de los sistemas cuánticos.

Von Neumann llegó al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton a principios de los años treinta. Él y Einstein estaban básicamente de acuerdo. Sus diferencias eran políticas. Von Neumann encontraba a Einstein ingenuo: Von Neumann creía que todos los gobiernos de izquierdas eran débiles y apoyaba firmemente las políticas conservadoras. Estuvo involucrado en el proyecto Manhattan y, contrariamente a muchos otros científicos que contribuyeron a construir la bomba, nunca pareció sentirse atormentado por el resultado de su trabajo.

Nadie cuestiona que Von Neumann hizo grandes contribuciones a la teoría cuántica. Su libro sobre esta materia se ha convertido en una herramienta indispensable para quienes la practican y un importante tratado sobre los fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica.

Eugene Wigner, que más tarde ganó el premio Nobel por su trabajo en física, llegó a Princeton cuando Von Neumann ya se había establecido allí. Alguien ha dicho que el Instituto de Princeton contrató a Wigner para que «Johnny» no se sintiera solo y tuviera a alguien con quien hablar en húngaro. Cuando el fundamental libro de Von Neumann apareció en inglés (1958), Wigner le dijo a Abner Shimony: «He aprendido mucho de Johnny sobre la teoría cuántica, pero el material de su capítulo seis [sobre la medida] lo ha aprendido Johnny de mí». El libro de Von Neumann contenía una

argumentación que fue importante en discusiones subsiguientes de las interpretaciones de la mecánica cuántica, a saber, una prueba de que la teoría cuántica no podía «completarse» mediante una teoría de variables ocultas en la que todo observable tiene un valor definido. Su demostración de esta proposición era matemáticamente correcta, pero se basaba en una premisa físicamente dudosa. Ese punto débil del libro de Von Neumann fue mostrado por John Bell décadas más tarde.

Capítulo 11

Entra Einstein

Los procesos elementales hacen que la formulación de una teoría de la radiación basada verdaderamente en el cuanto parezca casi inevitable.

ALBERT EINSTEIN

Albert Einstein nació en Ulm, Alemania, en 1879, en el seno de una familia judía de clase media. Su padre y su tío tenían un negocio de electricidad que acabó fracasando. Como resultado de ello, la familia se trasladó a Múnich, después a un par de sitios en el norte de Italia y finalmente de nuevo a Alemania. Einstein se educó en Suiza, y su primer trabajo fue el —famoso— de técnico experto en la Oficina Suiza de Patentes, en Berna. Allí, en 1905, Einstein publicó tres artículos que cambiaron el mundo. Estos artículos fueron sus exposiciones de las tres teorías que desarrolló mientras trabajaba solo en la oficina de patentes: la teoría de la relatividad especial, una teoría del movimiento browniano con una nueva formulación de la termodinámica estadística y, por último, una teoría del efecto fotoeléctrico.

La vida de Einstein y su desarrollo de las teorías (especial y general) de la relatividad han sido expuestos detalladamente.²² Pero Einstein tuvo una influencia muy importante sobre la teoría cuántica desde los orígenes de ésta. Muy poco después de leer el artículo de Planck, comenzó a reflexionar acerca de la naturaleza de la luz desde el punto de vista de la nueva teoría, formulando entonces la hipótesis de que la luz era una corriente de partículas, o *cuantos*.

Einstein estudió el efecto de la interacción de la luz con la materia. Cuando rayos de luz chocan contra un metal, se emiten electrones, los cuales pueden detectarse y cuyas energías pueden medirse. Esto lo demostró en una serie de experimentos el físico estadounidense Robert Millikan (1868-1953). El análisis del efecto fotoeléctrico en varios metales y usando luz de diferentes frecuencias reveló los siguientes fenómenos: cuando se ilumina una superficie metálica con luz de baja frecuencia, menor que una frecuencia umbral ν_0 , no se emiten fotoelectrones. Para una frecuencia por encima del umbral se emiten fotoelectrones, y al variar la intensidad de la luz de esta frecuencia el número de dichos fotoelectrones varía pero su energía no cambia. La energía de los fotoelectrones aumenta sólo cuando se aumenta la frecuencia. La frecuencia umbral, ν_0 , depende del tipo de metal usado.

La teoría clásica de la luz no explica los fenómenos que acabamos de citar. ¿Por qué al aumentar la intensidad de la luz no aumenta la energía de los electrones? ¿Y por qué la frecuencia es lo que influye sobre dicha energía? ¿Por qué no se emite ningún electrón cuando

²² Véase Amir D. Aczel, *God's equation*, Four Walls Eight Windows, Nueva York, 1999.

la frecuencia está por debajo de un determinado nivel? Lo que hizo Einstein en su investigación que culminó en el trabajo de 1905 fue suponer que la luz estaba constituida por partículas —llamadas después fotones— y aplicar la idea cuántica de Planck a estos fotones.

Einstein consideraba los fotones como pequeños paquetes discretos de energía que se desplazaban por el espacio. Su energía estaba determinada por la fórmula de Einstein:

$$E = h\nu$$

(donde h es la constante de Planck y ν es la frecuencia de la luz).

La conexión entre esta fórmula y la ecuación anterior de Planck es simple. Hay que recordar que Planck había dicho que las únicas energías posibles para un sistema emisor de luz (por ejemplo, una carga oscilante) son:

$$E = 0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, 4h\nu\dots \text{ o, en general, } nh\nu,$$

donde n es un entero positivo.

Claramente, la cantidad de energía más pequeña que puede emitir el sistema es la diferencia entre dos valores contiguos de Planck, que es h , de donde sale la fórmula de Einstein para la energía de la cantidad más pequeña posible de luz.

Vemos a partir de la fórmula de Einstein que la intensidad de la luz no aumenta la energía de sus fotones; de hecho, lo que aumenta

con dicha intensidad es el *número* de fotones presentes, estando determinada la energía de cada uno de ellos por la frecuencia de la luz (multiplicada por la constante de Planck). Para separar un electrón de la red de átomos del cristal se requiere una energía mínima, denotada por W (de «work», el trabajo necesario para desalojar un electrón). Así pues, cuando la frecuencia alcanza un nivel mínimo, la energía impartida al electrón sobrepasa el umbral W y el electrón es «liberado» (emitido). La ley de Einstein que explica el efecto fotoeléctrico viene dada por la fórmula:

$$K = h\nu - W,$$

donde K es la energía del electrón liberado. Esta energía es igual a la energía de Einstein ($E = h\nu$) menos la energía mínima para desalojar el electrón, W . La fórmula explica perfectamente el efecto fotoeléctrico. Esta elegante teoría de la interacción de la luz con la materia, una teoría cuántica de un efecto previamente conocido y mal entendido, proporcionó a Einstein el premio Nobel en 1921, que se le notificó cuando estaba visitando Japón. Curiosamente, Einstein no recibió el premio Nobel por su teoría de la relatividad especial ni por la de la relatividad general, dos teorías que han revolucionado la ciencia moderna.

Así que ahí estaba Einstein cuando nació la teoría cuántica, y fue uno de los «padres» de la nueva teoría. Él creía entender la naturaleza bastante bien, como evidenciaba el hecho de que pudiera proponer tan revolucionarias teorías (la relatividad especial en 1905

y la general en 1916) que explicaban los fenómenos en el dominio de lo grande y de lo rápido. Pero aunque era un maestro incomparable de la física del macromundo, y contribuyó mucho a la teoría cuántica de lo muy pequeño, la filosofía de Einstein chocaba con la interpretación en progreso de la mecánica cuántica. Einstein no podía abandonar su principio de que Dios no juega a los dados, es decir, que el azar no tiene lugar en las leyes de la naturaleza. Creía que la mecánica cuántica era correcta al atribuir probabilidades a los resultados posibles de un experimento, pero pensaba que la necesidad de recurrir a probabilidades se debía a nuestra ignorancia de un nivel más profundo de la teoría que es describible mediante una física determinista (es decir, libre de estructura probabilista). Ése es el significado de su afirmación sobre Dios y los dados frecuentemente citada.

La teoría cuántica estaba —y está— basada en probabilidades, y no en predicciones exactas. Como especifica el principio de incertidumbre de Heisenberg, es imposible conocer a la vez el momento y la posición de una partícula; si se conoce uno de ellos con cierta precisión, el otro, necesariamente, sólo puede conocerse con incertidumbre. Pero el azar, la borrosidad, la incertidumbre en la nueva teoría física sobrepasa su manifestación en el principio de incertidumbre. Recuérdese que partículas y fotones son a la vez onda y partícula y que cada uno tiene su función de onda. ¿Qué es esa «función de onda»? Es algo que conduce *directamente* a probabilidades, ya que el cuadrado de la amplitud de la onda que asociamos a cada partícula es, de hecho, una distribución de

probabilidad (la regla que proporciona las probabilidades de los diversos resultados) para la posición de dicha partícula. Para obtener la distribución de probabilidad de los resultados de la medida de otro observable (como el momento), el físico ha de realizar un cálculo donde se usan la función de onda y el operador que representa el observable en cuestión.

La teoría cuántica es probabilista a un nivel muy básico, absolutamente fundamental. No hay escapatoria de las probabilidades se haga lo que se haga. Según esta teoría, existe un nivel mínimo de incertidumbre acerca de los resultados que en ningún caso puede reducirse, no importa el ahínco con que se intente. La teoría cuántica es entonces muy diferente de otras teorías que usan probabilidades. En economía, por ejemplo, no existe ninguna teoría que afirme inequívocamente que no podemos conocer alguna variable con el grado de precisión que deseemos. En este caso, la probabilidad representa nuestra falta de conocimiento, no una propiedad fundamental de la naturaleza. Einstein era un gran crítico de la teoría cuántica porque no le agradaba pensar que la naturaleza funciona de manera probabilista. Dios decreta, no juega a los dados. En consecuencia, Einstein creía que a la teoría cuántica le faltaba algo, quizás algunas variables tales que, si pudiéramos conocer sus valores, la incertidumbre —el azar, el «dado»— desaparecería. Aumentando el número de esas variables, la teoría sería completa y entonces sería como la teoría de Newton, en la que las variables y cantidades pueden conocerse y predecirse con gran precisión.

Además de este desagrado por el azar y la probabilidad como parte de una teoría de la naturaleza, Einstein tenía otras nociones que le parecían intuitivas, y que seguramente así se lo parecen a la mayoría de la gente. Éstas eran el realismo y la localidad. Para él, un elemento de realidad es algo real, que una buena teoría de la naturaleza debería incluir. Si algo sucede en alguna parte, y podemos predecir que sucederá sin perturbar el sistema, entonces lo que sucede es un elemento de realidad. Si una partícula tiene su espín «apuntando» en cierta dirección, y podemos predecir sin perturbarla que tendrá su espín según esa dirección, entonces esto es un elemento de realidad. La localidad es la noción intuitiva de que algo que ocurre en un lugar no debería afectar a cualquier cosa que suceda en un lugar lejano, a no ser, desde luego, que se envíe una señal de un lugar al otro (como máximo a la velocidad de la luz, según dicta la teoría de la relatividad) que pueda producir un cambio en este último.

A lo largo de su vida, Einstein se mantuvo fiel a estos tres principios que, creía, debían formar parte de una buena descripción de la naturaleza:

1. El nivel fundamental de la naturaleza debe ser descrito en principio mediante una teoría determinista, incluso aunque diversas lagunas en el conocimiento humano acerca de las condiciones iniciales y de contorno puedan forzar a los seres humanos a recurrir a la probabilidad al hacer predicciones sobre los resultados de observaciones.
2. La teoría debe incluir todos los elementos de realidad.

3. La teoría debe ser local: lo que sucede aquí depende de elementos de realidad situados aquí, y cualquier cosa que suceda allí dependerá de elementos de realidad situados allí.

Einstein y sus colaboradores encontraron que esas nociones, que a ellos les parecían muy naturales, implicaban la incompletitud de la teoría cuántica (una teoría que Einstein contribuyó a crear). Como veremos, posteriormente (década de 1960) se demostraría que estos principios eran incompatibles con la teoría cuántica; y una creciente evidencia experimental recogida desde los años setenta pondría además de manifiesto que la teoría cuántica era correcta.

En la primavera de 1910, al industrial belga Ernest Solvay se le ocurrió la idea de organizar un congreso científico. El camino hasta esa idea fue algo tortuoso y extraño. Solvay había desarrollado un método para fabricar sosa y como consecuencia de ello se hizo muy rico. Eso le proporcionó un alto nivel de confianza en sus capacidades, y como estaba interesado en la ciencia, empezó a hurgar en la física. Solvay inventó una teoría de la gravitación y la materia que tenía poco que ver con la realidad o con la ciencia. Pero, como era muy rico, la gente le escuchaba, incluso aunque pudieran decir que sus teorías no tenían sentido. El científico alemán Walther Nernst le dijo que podría tener un público para sus teorías si organizara un congreso con los mayores científicos de la época y les presentara sus teorías. A Solvay le gustó la idea, y de ese modo nacieron los congresos Solvay.

El primer *Conseil Solvay* se celebró en el hotel Metropole de Bruselas a finales de octubre de 1911. Se cursaron invitaciones a los físicos más conocidos, entre ellos Einstein, Planck, Madame Curie, Lorentz y otros, y todos los invitados aceptaron y asistieron a la que sería una reunión histórica. Los congresos continuaron a lo largo de las dos décadas siguientes. Las futuras reuniones serían los campos de batalla de la gran controversia sobre la teoría cuántica. Allí, en Bruselas, en posteriores conferencias, se desarrolló el debate entre Einstein y Bohr sobre las implicaciones filosóficas y físicas de la mecánica cuántica.

Einstein admiraba a Bohr desde que éste publicó su primer trabajo sobre la teoría cuántica de los átomos en 1913. En abril de 1920, Bohr fue a Berlín a impartir una serie de conferencias. Einstein tenía un puesto en esa ciudad, en la Academia Prusiana de Ciencias. Los dos se encontraron allí, y Bohr pasó algún tiempo en casa de los Einstein. Les había llevado algunos regalos: buen queso danés y otros manjares. Los dos disfrutaban con las absorbentes conversaciones sobre radiación y teoría atómica. Tras partir Bohr, Einstein le escribió: «Raramente en mi vida una persona me ha proporcionado por su mera presencia tanto placer como usted. Ahora estoy estudiando sus grandes publicaciones y —salvo que suceda que quede aturullado en algún punto— tengo el placer de ver ante mí su alegre y juvenil rostro, sonriendo y explicando».²³

Al cabo de los años, su relación maduró en una amigable competición por la verdad acerca de la naturaleza. Bohr, el

²³ A. Fölsing, *Albert Einstein*, Viking, Nueva York, 1997, p. 477.

intérprete ortodoxo de la teoría cuántica, defendía sus curiosas facetas, mientras que Einstein, el realista, abogaba siempre por una teoría más «natural», que nadie ha sido capaz de construir.

El debate entre Einstein y Bohr sobre la interpretación de la mecánica cuántica empezó de veras durante el quinto congreso Solvay, en octubre de 1927. Estaban allí todos los fundadores de la teoría cuántica: Planck, Einstein, Bohr, De Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Dirac. Durante las reuniones, «Einstein apenas si dijo algo salvo para presentar una objeción muy simple a la interpretación probabilista... Después guardó silencio».²⁴ Pero en el comedor del hotel, Einstein estaba muy animado. Según un relato de primera mano de Otto Stern, «Einstein bajaba a desayunar y manifestaba sus recelos acerca de la nueva teoría cuántica. En cada ocasión había inventado un bello experimento [ideal] que le hacía ver a uno que dicha teoría no funcionaba. Pauli y Heisenberg, que estaban allí, no le hacían demasiado caso, “Ach was, das stimmt schon, das stimmt schon” [¡Bah!, está bien, está bien]. Pero, por otra parte, Bohr reflexionaba cuidadosamente sobre ello, y por la noche, durante la cena, nos reuníamos y aclarábamos el asunto detalladamente».²⁵

También Heisenberg, un importante participante en el congreso de 1927, describió el debate: «Las discusiones se centraron pronto en un duelo entre Einstein y Bohr sobre la cuestión de hasta qué punto la teoría atómica en su forma presente podría considerarse la

²⁴ Louis de Broglie, *New Perspectives in Physics*, Basic Books, Nueva York, 1962, p. 150.

²⁵ Citado en J. A. Wheeler y W. H. Zurek (nota 12)

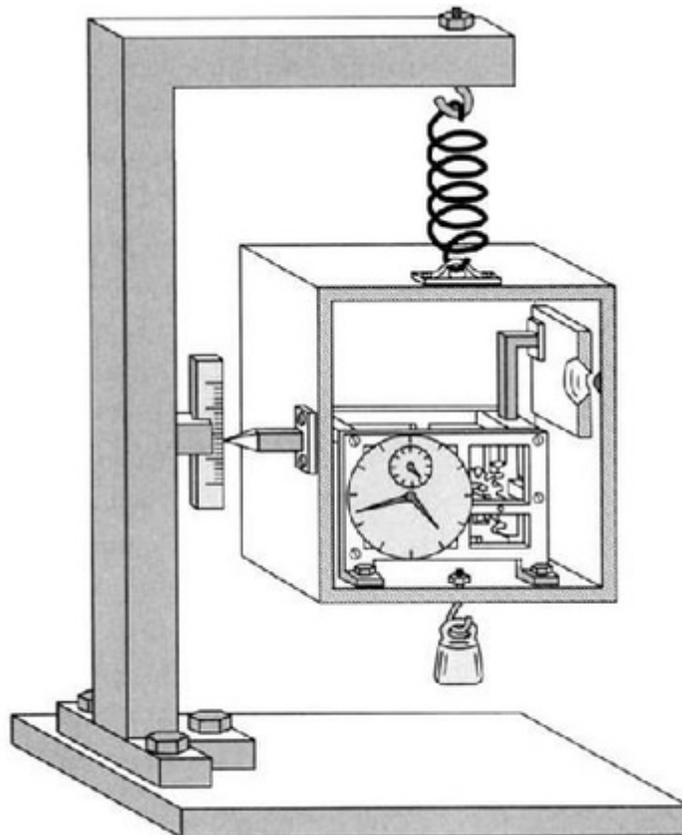
solución final de las dificultades que se habían discutido durante varias décadas. Generalmente nos encontrábamos ya desayunando en el hotel, y Einstein empezaba a describir un experimento ideal que él creía que revelaba las contradicciones internas de la interpretación de Copenhague». ²⁶

Bohr trabajaba todo el día para encontrar una respuesta a Einstein, y por la tarde explicaba sus argumentos a sus compañeros teóricos cuánticos. Durante la cena, exponía a Einstein su respuesta a la objeción que éste le había planteado por la mañana. Aunque Einstein no hallaba ningún buen argumento en contra, en su fuero interno seguía sin estar convencido. Según Heisenberg, Paul Ehrenfest (1880-1933), buen amigo de Einstein, le dijo a éste: «Me siento avergonzado de ti. Estás adoptando la misma postura que tus oponentes en sus fútiles intentos de refutar tu teoría de la relatividad».

Los argumentos en pro y en contra de la teoría cuántica se intensificaron durante el siguiente congreso Solvay, que tuvo lugar en 1930. El tema central de este congreso era el magnetismo, pero eso no impidió que los participantes continuaran su acalorado debate sobre la teoría cuántica fuera de las sesiones ordinarias, en los pasillos, y durante los desayunos y las comidas en el hotel. Un día, en el desayuno, Einstein le dijo a Bohr que había encontrado un contraejemplo al principio de incertidumbre energía-tiempo. Einstein contemplaba un ingenioso y complejo dispositivo: una caja con una abertura en una de sus paredes, donde se coloca una

²⁶ Citado en Wheeler y Zurek (nota 12), p. 7.

puerta, controlada por un reloj situado en el interior de la caja. La caja se llena de radiación y se pesa. La puerta se abre durante una fracción de segundo, dejando escapar un fotón. La caja se pesa de nuevo. A partir de la diferencia de pesos, puede deducirse la energía del fotón mediante la fórmula de Einstein, $E=mc^2$. Por consiguiente, argüía Einstein, puede determinarse en principio la energía del fotón y su tiempo de paso con el grado de precisión que se desee, refutando así el principio de incertidumbre (que dice, en este contexto, que no puede conocerse con gran precisión la energía del fotón y su tiempo de paso a la vez). El dispositivo de Einstein se muestra en la figura siguiente.



Según relató Pais (1991), los participantes del congreso encontraron a Bohr abatido. No veía una solución al desafío de Einstein a la mecánica cuántica. Durante toda esa tarde se mostró extremadamente infeliz, hablando con uno y con otro, tratando de persuadirlos de que la conclusión de Einstein no podía ser cierta: ¿pero cómo? Si Einstein tuviera razón, decía Bohr, sería el final de la física. Pero aunque se esforzaba al máximo, no era capaz de refutar el astuto argumento de Einstein. Leon Rosenfeld (1904-1974), un físico presente en el congreso, dijo: «Nunca olvidaré la imagen de los dos antagonistas saliendo del club: Einstein, una figura majestuosa, caminando despacio, con una sonrisa tirando a irónica, y Bohr trotando a su lado, muy excitado... La mañana siguiente llegó el triunfo de Bohr».²⁷ Existe una fotografía que ilustra muy bien esa descripción (véase la primera fotografía del pliego de ilustraciones).

Bohr halló finalmente un punto débil en el argumento de Einstein. Éste no había tenido en cuenta que el hecho de pesar la caja implica observar su desplazamiento en el campo gravitatorio. La imprecisión en el desplazamiento de la caja genera una incertidumbre en la determinación de la masa —y por tanto de la energía— del fotón. Y cuando se desplaza la caja, el reloj en su interior también lo hace. Ahora éste marcha en un campo gravitatorio ligeramente diferente de aquel en que se encontraba inicialmente. El ritmo de marcha del reloj en la nueva posición es diferente del que tenía antes de

²⁷ Abraham Pais (nota 4), p. 427.

moverse debido al acto de pesar. En consecuencia, existe una incertidumbre en la determinación del tiempo. Bohr pudo demostrar que la relación de incertidumbre de energía y tiempo era exactamente la expresada por el principio de Heisenberg.

La respuesta de Bohr al desafío de Einstein era brillante, y usaba la teoría general de la relatividad para rechazar el ataque. El hecho de que los relojes marchan a ritmos diferentes según el campo gravitatorio en que se encuentran es una faceta importante de la relatividad general. Bohr empleó en este caso un inteligente argumento al aplicar la teoría de la relatividad para establecer el principio cuántico de incertidumbre.

Pero la controversia siguió con vehemencia. Einstein, el zorro astuto de la física, continuó elaborando argumentos cada vez más inteligentes, esforzándose en combatir una teoría cuyos mismos fundamentos consideraba trastornados. Y, puesto que, como uno de sus fundadores, conocía la teoría cuántica mejor que cualquiera, él sabía cómo administrar sus golpes. Siempre que Einstein golpeaba, Bohr se mostraba inquieto y preocupado y buscaba frenéticamente una respuesta hasta que encontraba alguna. Se repetía a sí mismo una palabra mientras estaba sumido en sus pensamientos. Sus colegas físicos lo describen en una habitación murmurando: «Einstein... Einstein...», caminando hacia la ventana, mirando afuera, como ausente, y continuando: «Einstein... Einstein...».

Einstein asistió al congreso Solvay de 1933 y escuchó a Bohr dando una charla sobre la teoría cuántica. Siguió atentamente la argumentación, pero no hizo ningún comentario. Cuando empezó la

discusión, la dirigió hacia el significado de la mecánica cuántica. En palabras de Rosenfeld, Einstein «todavía sentía el mismo desasosiego que antes (“unbehagen” era la palabra que empleaba) al enfrentarse con las extrañas consecuencias de la teoría».²⁸ Fue durante esa ocasión cuando esgrimió por primera vez la que después sería su arma más formidable contra la teoría cuántica.

¿Qué diría de la situación siguiente? —le preguntó a Rosenfeld—. Supongamos dos partículas que se ponen en movimiento la una hacia la otra con el mismo, muy grande, momento y que interactúan entre sí durante un tiempo muy corto cuando pasan por posiciones conocidas. Consideremos ahora a un observador que «agarra» una de esas partículas, muy lejos de la región de interacción, y mide su momento; entonces, por las condiciones del experimento, podrá evidentemente deducir el momento de la otra partícula. Si, sin embargo, elige medir la posición de la primera partícula, será capaz de decir dónde está la otra partícula. Ésta es una deducción perfectamente correcta y simple a partir de los principios de la mecánica cuántica, ¿pero no resulta muy paradójica? ¿Cómo puede el estado final de la segunda partícula verse influido por una medida llevada a cabo en la primera después de que haya cesado toda interacción física entre ellas?

²⁸ Wheeler y Zurek (nota 12), p. 137.

Allí estaba, dos años antes de que la soltara sobre el mundo de la ciencia con todo su poder, la tremendamente poderosa idea de Einstein sobre la teoría cuántica, en la que se servía de sus, en apariencia, manifiestas contradicciones para invalidarla. Rosenfeld, con quien Einstein cuchicheaba mientras oía la charla de Bohr, no creía que Einstein estuviera intentando mediante su experimento ideal algo más que ilustrar una característica no familiar de la mecánica cuántica. Pero la chispa de la idea de Einstein formulada por primera vez durante la charla de Bohr continuaría aumentando y tomaría su forma final dos años más tarde.

Cuando Hitler llegó al poder, Albert Einstein abandonó Alemania. Ya en 1930 había pasado fuera gran parte de su tiempo: estuvo en Caltech (Instituto Tecnológico de California) y después en la Universidad de Oxford. En 1933 aceptó un puesto en el recientemente fundado Instituto de Estudios Avanzados en Princeton (EE.UU.). Había planeado pasar parte de su tiempo allí y parte en Berlín. Pero tras la victoria de Hitler, abandonó todos sus compromisos en Alemania y se juró no volver nunca. Pasó algún tiempo en Bélgica e Inglaterra y finalmente llegó a Princeton en octubre de 1933.

Einstein se estableció en su nuevo puesto en el Instituto de Estudios Avanzados. Se le proporcionó un ayudante, un físico armenio de veinticuatro años llamado Nathan Rosen (1910-1995), y volvió a entrar en contacto con un físico del Instituto a quien había conocido en Caltech tres años antes, Boris Podolsky. Einstein había cruzado el Atlántico y se hallaba a miles de kilómetros de Europa,

donde había nacido y se había desarrollado la teoría cuántica, pero esta remota teoría, con su lógica e hipótesis incomprensibles, permanecía en su mente.

Einstein solía trabajar solo y sus artículos rara vez tenían coautores. Pero en 1934 se procuró la ayuda de Podolsky y Rosen a fin de escribir una última polémica contra la teoría cuántica.²⁹ Einstein explicó cómo se escribió el ahora famoso artículo de Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) en una carta a Schrödinger el año siguiente: «Por razones lingüísticas, Podolsky escribió el artículo, tras prolongadas discusiones. Pero no se expresaba demasiado bien lo que yo quería decir; por el contrario, la cosa principal aparecía como enterrada bajo la erudición». A pesar de la impresión de Einstein en sentido contrario, el mensaje del artículo de EPR, en el que él y sus colegas usaban el concepto de entrelazamiento para cuestionar la completitud de la teoría cuántica, se escuchó alto y claro en todo el mundo. En Zúrich, Wolfgang Pauli (1900-1958), uno de los fundadores de la teoría cuántica y el descubridor del «principio de exclusión» para los electrones del átomo, estaba furioso. Escribió una larga carta a Heisenberg, en la cual decía: «De nuevo Einstein se ha expresado públicamente sobre la mecánica cuántica, de hecho en el número del 15 de mayo de *Physical Review* (junto con Podolsky y Rosen: una compañía nada buena, dicho sea de paso). Como es sabido, cada vez que esto sucede es una catástrofe». A Pauli le inquietaba que el artículo de EPR se hubiera

²⁹ Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen, «Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?», *Physical Review*, n.º 47 (1935), pp. 777-780.

publicado en una revista norteamericana, y le preocupaba que la opinión pública norteamericana se volviera en contra de la teoría cuántica. Pauli sugirió que Werner Heisenberg, cuyo principio de incertidumbre constituía el objetivo del ataque del artículo de EPR, replicara de inmediato.

Pero fue en Copenhague donde la reacción fue más pronunciada. Niels Bohr parecía abatido por un rayo. Parecía hallarse en estado de *shock*, confuso y además enfadado. Salió del Instituto y se marchó a casa. Según Pais, Rosenfeld visitó Copenhague por entonces y dijo que a la mañana siguiente Bohr apareció en su despacho todo sonrisas. Encaró a Rosenfeld y dijo: «Podolsky, Opodolsky, Iopodolsky, Asiopodolsky, Basiopodolsky...». Después explicó al asombrado físico que estaba adaptando una línea de la obra de teatro de Holberg *Ulysses von Ithaca* (acto I, escena 15), en la que un criado empieza de pronto a hablar en camelo.³⁰

Rosenfeld recordaba que Bohr abandonó todos los proyectos que tenía entre manos cuando salió el artículo de EPR. Pensaba que el equívoco tenía que aclararse cuanto antes. Sugirió que él y sus ayudantes usaran el mismo ejemplo empleado por Einstein para mostrar el modo «verdadero» de considerarlo. Bohr, excitado, comenzó a dictarle a Rosenfeld la respuesta a Einstein. Pero pronto empezó a vacilar: «No, esto no funcionará... Tenemos que rehacer esto completamente... Debemos ponerlo muy claro...». Según Rosenfeld, esto continuó durante un largo rato. De vez en cuando, Bohr se dirigía a Rosenfeld: «¿Qué *pueden* querer decir? ¿Tú lo

³⁰ Pais, 1991, p. 430.

entiendes?». Y se estrujaba el cerebro, sin llegar a ninguna parte. Finalmente, dijo que «lo consultaría con la almohada».³¹

Pocas semanas después, Bohr se calmó lo suficiente para escribir su refutación del artículo de EPR. Tras tres meses de duro trabajo, envió finalmente su respuesta a Einstein y sus colegas a la misma revista que había publicado el artículo de EPR, *Physical Review*. El siguiente párrafo (cursivas incluidas) es suyo: «*Con la libertad de elección ofrecida por [EPR], de lo que tratamos es simplemente de una discriminación entre diferentes procedimientos experimentales que permiten usar sin ambigüedad conceptos clásicos complementarios*».

Pero no todos los físicos veían así la situación. Erwin Schrödinger, cuya teoría fue desafiada por EPR, le dijo a Einstein: «Has agarrado a la mecánica cuántica dogmática públicamente por el cuello». Casi todos los científicos o bien estaban convencidos por la réplica de Bohr a Einstein, o bien pensaban que la controversia era más filosófica que física, puesto que no se cuestionaban los resultados experimentales, y que por tanto no les concernía. Tres décadas más tarde, el teorema de Bell minaría ese punto de vista.

¿Qué dice el artículo de EPR?

Según Einstein, Podolsky y Rosen, cualquier atributo de un sistema físico que pueda predecirse con precisión sin perturbar dicho sistema es un *elemento de realidad física*.

³¹ Wheeler y Zurek, 1983.

Además, arguyen EPR, una descripción *completa* del sistema físico en estudio debe englobar todos los elementos de realidad física asociados al sistema.

Ahora bien, el ejemplo de Einstein (el mismo esencialmente que le expusiera a Rosenfeld dos años antes) de dos partículas enlazadas entre sí muestra que la posición y el momento de una partícula dada pueden obtenerse mediante medidas apropiadas sobre la *otra* partícula sin perturbar a su «gemela». Por lo tanto, ambos atributos de la gemela son elementos de realidad física. Como la mecánica cuántica prohíbe que ambos entren en la descripción de una partícula, la teoría es incompleta.

El artículo de EPR, junto con el posterior teorema de Bell, es uno de los trabajos más importantes de la ciencia del siglo XX.

«Si, sin perturbar en modo alguno un sistema —declara—, podemos predecir con certeza (es decir, con probabilidad uno) el valor de una cantidad física, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a dicha cantidad.»

Nos parece que este criterio, aunque lejos de agotar todos los modos posibles de reconocer una realidad física, al menos nos proporciona uno de tales modos, siempre que se den las condiciones apuntadas». ³²

EPR se embarcan entonces en una descripción de los estados entrelazados. Dichos estados son complicados, porque los autores

³² A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen (véase nota 8 de este capítulo).

usan a la vez la posición y el momento de dos partículas que han interactuado en el pasado y, por consiguiente, están correlacionadas. Su argumento es básicamente una descripción del entrelazamiento cuántico para la posición y el momento. Siguiendo esta descripción, concluyen:

Así pues, midiendo A o B nos hallamos en una posición que nos permite predecir con certeza, y sin perturbar en modo alguno el segundo sistema, bien el valor de la cantidad P o el de la cantidad Q. De acuerdo con nuestro criterio de realidad, en el primer caso debemos considerar que la cantidad P es un elemento de realidad, en el segundo caso lo es la cantidad Q. Pero, como hemos visto, ambas funciones de onda pertenecen a la misma realidad. Previamente probamos que bien (1) la descripción mecánico-cuántica de la realidad proporcionada por la función de onda no es completa o (2) cuando los operadores correspondientes a dos cantidades físicas no conmutan las dos cantidades no pueden tener realidad simultánea... Tenemos entonces forzosamente que concluir que la descripción mecánico-cuántica de la realidad no es completa.

Lo que hicieron Einstein y sus colegas fue formular una hipótesis que parece muy razonable: la hipótesis de localidad. Lo que sucede en un lugar no puede influir inmediatamente en lo que sucede en otro distante de él. EPR decían: «Si, sin perturbar en modo alguno un

sistema, podemos predecir con certeza (es decir, con probabilidad uno) el valor de una cantidad física, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a dicha cantidad». Esta condición se satisface cuando se realiza una medición de posición en la partícula 1 y también cuando se hace una medición de momento en la misma partícula. En cada caso, podemos predecir con certeza la posición (o el momento) de la *otra* partícula. Esto nos permite inferir la existencia de un elemento de realidad física. Ahora bien, como la partícula 2 no es afectada (suponen ellos) por lo que se hace a la partícula 1, y el elemento de realidad —la posición— de esta partícula se infiere en un caso y el momento en el otro, ambos —posición y momento— son elementos de realidad de la partícula 2. De ahí la «paradoja» de EPR. Tenemos dos partículas relacionadas entre sí. Medimos una de ellas y sabemos acerca de la otra. Entonces, la teoría que nos permite hacer eso es incompleta.

En su respuesta, Bohr decía: *«El rumbo de su argumentación [la de EPR] no me parece que responda adecuadamente a la situación real que encontramos en física atómica».* Argüía que la «paradoja» de EPR no era un desafío práctico a la aplicación de la teoría cuántica a problemas físicos reales. La mayoría de los físicos pareció aceptar sus argumentos.

Einstein reconsideró el problema de EPR en artículos de 1948 y 1949, pero pasó la mayor parte del tiempo hasta su muerte en 1955 tratando, sin éxito, de desarrollar una teoría unificada de la física. Nunca llegó a creer en un Dios jugador de dados, nunca creyó que la mecánica cuántica con su carácter probabilista fuera una teoría

completa. Pensaba que a esa teoría le faltaba algo, algunas variables no presentes que podrían explicar mejor los elementos de realidad. El rompecabezas seguía en pie: dos partículas estaban asociadas entre sí —gemelas producidas por el mismo proceso— quedando enlazadas para siempre, siendo su función de ondas no factorizable en dos componentes separados. Cualquier cosa que sucediera a una de esas partículas afectaría a la otra inmediatamente, estuviera donde estuviera. Einstein llamó a eso «*acción fantasmal a distancia*». Bohr nunca olvidó sus discusiones con Einstein. Habló de ellas hasta el día de su muerte, en 1962. Bohr luchó duramente para hacer que el mundo de la ciencia aceptase la teoría cuántica. Se enfrentó a todos los ataques contra la teoría como si hubieran sido de carácter personal. La mayoría de los científicos pensaba que Bohr había resuelto definitivamente la cuestión de la teoría cuántica y EPR. Pero dos décadas después los argumentos de Einstein iban a ser recuperados y mejorados por otro físico.

Capítulo 12

Bohm Y Aharonov

La teoría más fundamental disponible en la actualidad es formalmente probabilista, no determinista.

DAVID BOHM

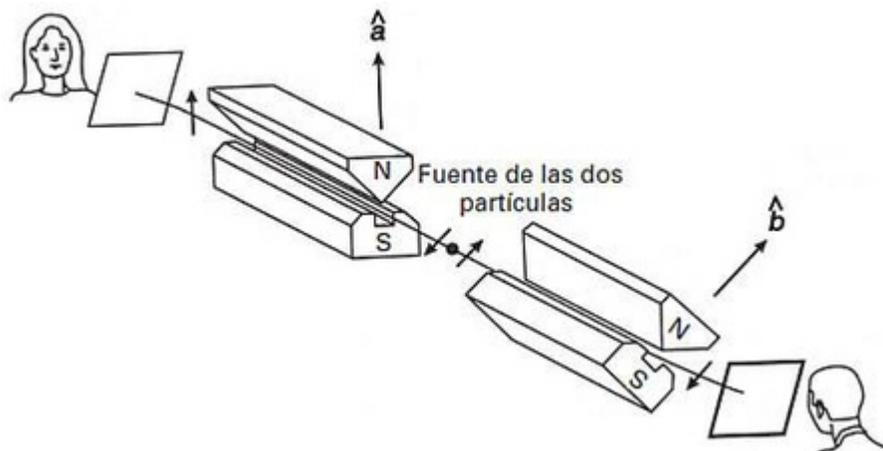
David Bohm nació en 1917. Estudió primero en la Universidad de Pensilvania y más tarde en la Universidad de California, en Berkeley. Fue estudiante de Robert Oppenheimer hasta que éste abandonó Berkeley para dirigir el proyecto Manhattan. Bohm acabó el doctorado en Berkeley y después aceptó un puesto en la Universidad de Princeton.

En Princeton, David Bohm trabajó en la filosofía de la mecánica cuántica, y en 1952 dio un gran paso en la comprensión del problema de EPR. Bohm cambió el diseño del desafío de Einstein a la teoría cuántica —el artículo de EPR— exponiendo la «paradoja» en términos más claros, más concisos y más fáciles de entender. En lugar de usar momento y posición —dos elementos— en el diseño de EPR, Bohm cambió el experimento ideal a otro que involucraba dos partículas con una variable de interés en lugar de dos, siendo el elemento físico de interés la proyección del *espín* de cada una de las partículas según una dirección particular. En la formulación de Bohm, como en el dispositivo original de EPR, ambas partículas

pueden localizarse separadas entre sí, de modo que las medidas de espín sobre una cualquiera de ellas están separadas espacial y temporalmente de las medidas de espín sobre la otra y no tienen efecto directo sobre éstas.

Algunas partículas, por ejemplo los electrones, tienen espín. El espín puede medirse independientemente en cualquier dirección que el experimentador escoja. Cualquiera que sea dicha dirección, siempre se obtiene uno de los dos resultados «espín hacia arriba» o «espín hacia abajo» al medir el espín. Cuando dos partículas están entrelazadas en lo que se denomina un estado *singlete*, en el que el espín total debe ser cero, sus espines están inexorablemente encadenados: si una partícula muestra el espín «hacia arriba», la otra debe mostrarlo «hacia abajo». No sabemos lo que es el espín, y según la teoría cuántica el espín no es una propiedad definida hasta que se mide (o se actualiza de otro modo). Dos partículas emitidas por la misma fuente que ha hecho que estén entrelazadas se alejan entre sí. Algún tiempo después, Alicia mide la partícula «A», escogiendo arbitrariamente medir su espín según la dirección del eje x , digamos. De acuerdo con la teoría cuántica, una vez que la partícula «A» revela un espín «hacia arriba» en la dirección x , si Benito mide el espín de la partícula «B» según esa misma dirección, ésta revelará un espín «hacia abajo». Se da la misma anticorrelación si Alicia y Benito escogen medir el espín en otra dirección cualquiera, la dirección y , por ejemplo (se necesitan dos direcciones para desarrollar el argumento de EPR usando espines).

En la versión de Bohm del experimento ideal de EPR, se emiten dos partículas entrelazadas. Una vez que se mide el espín de una de ellas y se encuentra que es «hacia arriba», el de la otra debe ser «hacia abajo», y esto ha de ser así para todas las direcciones, por ejemplo, la x y la y . Según la mecánica cuántica, los valores del espín en direcciones diferentes no tienen realidad simultánea. Pero el argumento de EPR era que todos ellos son reales. La alteración de Bohm del experimento ideal de EPR simplificó mucho el análisis. La versión de Bohm de dicho experimento ideal se muestra en la figura siguiente.



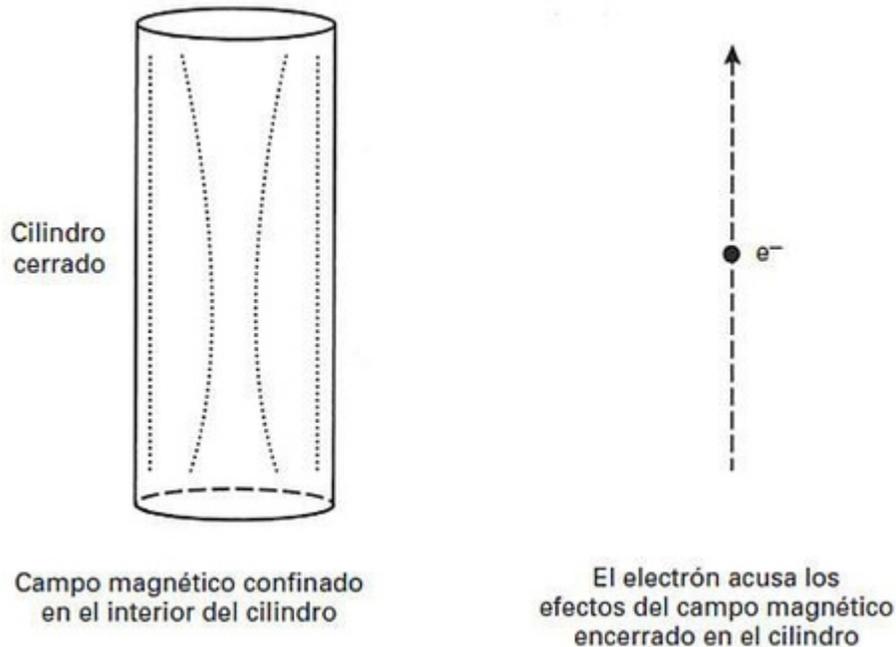
En 1949, Bohm fue investigado por el Comité de Actividades Antiamericanas, durante el momento álgido de la era McCarthy. Rehusó responder a las preguntas, pero no fue acusado. No obstante, perdió su puesto en la Universidad de Princeton, y a consecuencia de ello abandonó Estados Unidos para ocupar un puesto en Sao Paulo, Brasil. Desde allí se trasladó a Israel, donde estuvo algún tiempo, y después a Inglaterra, donde acabó siendo

profesor de física teórica en la Universidad de Londres. Bohm continuó trabajando en los fundamentos de la teoría cuántica, y sus descubrimientos condujeron a una alternativa al punto de vista «ortodoxo», o de Copenhague, de esta disciplina.

En 1957, Bohm y Yakir Aharonov, del Technion de Haifa, Israel, escribieron un artículo que rememoraba y describía el experimento de Wu y Shalnov que exhibía las correlaciones de espín de la versión de Bohm de la paradoja de EPR. El artículo argüía contra el punto de vista de que quizás las partículas no están realmente entrelazadas o que el entrelazamiento cuántico de las partículas podría disiparse con la distancia. La totalidad de los experimentos realizados desde entonces confirma el siguiente punto de vista: el entrelazamiento de las partículas es real y no desaparece al aumentar su separación.

En 1959, Bohm y Aharonov descubrieron lo que en la actualidad se conoce como el efecto Aharonov-Bohm, que les hizo famosos a ambos. Este efecto es un fenómeno misterioso, que, como el entrelazamiento, posee un carácter no local. Bohm y Aharonov descubrieron un desplazamiento de fase en la interferencia de electrones debido a un campo electromagnético que tiene intensidad nula en cualquier punto de la trayectoria del electrón. Lo que esto significa es que incluso cuando se tiene un cilindro en cuyo interior hay un campo electromagnético, pero éste se halla estrictamente confinado en dicha zona (dentro del cilindro), un electrón que pase por fuera del cilindro acusará *no obstante* los efectos del campo electromagnético. Así pues, un electrón que pase por fuera del

cilindro que contiene el campo magnético se verá — misteriosamente— afectado por el campo *dentro* del cilindro. Esto se muestra en la figura siguiente.



Como otros misterios de la mecánica cuántica, nadie entiende realmente «por qué» sucede esto. El efecto es similar al entrelazamiento en el sentido de que es no-local. Bohm y Aharonov dedujeron este efecto mediante consideraciones teóricas, matemáticas. Algunos años más tarde, el efecto Aharonov-Bohm fue verificado experimentalmente.

Las contribuciones de Bohm a nuestra comprensión de la teoría cuántica y del entrelazamiento son importantes. Su versión del experimento ideal de EPR sería una de las más frecuentemente usadas en las décadas siguientes por los experimentadores y los teóricos que estudian el entrelazamiento.

Además, un importante requisito para los tests de la paradoja de EPR lo expusieron Aharonov y Bohm en 1957, al asegurar que para saber si las partículas del experimento de EPR se comportaban de la manera que Einstein y sus colaboradores consideraban objetable, se debería usar un mecanismo de elección retardada. Esto es, un experimentador tendría que escoger qué dirección de espín medir sólo *después* de que las partículas se hallaran en vuelo. Solamente este diseño aseguraría que una partícula, o el aparato experimental, no indica a la otra lo que está sucediendo. Este requisito sería enfatizado por John Bell, cuyo teorema cambiaría nuestra percepción de la realidad. Un importante experimentador añadiría este requisito a sus tests del teorema de Bell, ayudando a establecer el hecho de que el entrelazamiento de las partículas muy alejadas entre sí constituye un fenómeno físico real.

Capítulo 13

El teorema de John Bell

Para mí, entonces, el problema real con la teoría cuántica es el conflicto aparentemente esencial entre cualquier formulación precisa de ésta y la teoría de la relatividad. Puede ser que una síntesis real de la teoría cuántica y la relatividad requiera no sólo desarrollos técnicos sino una radical renovación conceptual.

JOHN BELL

John Bell, un hombre pelirrojo y pecoso que era tranquilo, educado e introspectivo, nació en Belfast, Irlanda del Norte, en 1928, en el seno de una familia de la clase trabajadora cuyos miembros eran herreros y granjeros. Sus padres fueron John y Annie Bell, cuyas familias habían vivido en Irlanda del Norte durante varias generaciones. El segundo nombre de John, Stewart, era el nombre de familia escocés de su madre, y en su casa le llamaron Stewart hasta que fue al colegio. La familia Bell era anglicana (miembros de la Iglesia de Irlanda), pero John cultivó amistades más allá de la religión o de la etnia, y muchos de sus amigos eran miembros de la comunidad católica. Los padres de Bell no eran ricos, pero

valoraban la educación. Trabajaron duro a fin de ahorrar suficiente dinero para enviar a sus hijos a la escuela, aunque los hermanos de Bell la dejaron pronto para empezar a trabajar. Sus dos hermanos eran autodidactas, uno se hizo profesor y el otro llegó a ser un notable hombre de negocios.

Cuando tenía once años, John, que era un lector empedernido, decidió que deseaba llegar a ser científico. Tuvo mucho éxito en los exámenes de ingreso al bachillerato, pero desgraciadamente su familia no podía costear el enviarlo a una escuela con especial dedicación a la ciencia y tuvo que contentarse con su admisión en el Instituto Técnico de Belfast, donde fue educado a la vez académicamente y en áreas prácticas. Se graduó en 1944, a la edad de 16 años, y encontró un empleo como ayudante técnico en el departamento de física de la Queen's University de Belfast. Allí trabajó bajo la supervisión del profesor Karl Emeleus, quien se dio cuenta del gran talento científico de su ayudante y le prestó libros e incluso le permitió asistir a cursos de primer año sin necesidad de matricularse en la universidad.

Tras un año como técnico, John fue aceptado como estudiante universitario y le concedieron una modesta beca que le permitió obtener una diplomatura en física. Se diplomó en 1948 en física experimental y permaneció un año más, al final del cual obtuvo una segunda diplomatura, esta vez en física matemática. Tuvo la suerte de estudiar con el físico Paul Ewald, un dotado refugiado alemán, que fue un pionero en el área de la cristalografía de rayos X. John sobresalía en física, pero no estaba contento con la manera en que

se explicaba la teoría cuántica en la universidad. La profundidad de su mente comprendía que había algunos misterios en esa teoría que se habían pasado por alto en clase. No sabía, entonces, que nadie entendía esas inexplicadas ideas y que sería su propio trabajo lo que en su momento arrojaría luz sobre esos problemas.

Después de trabajar durante algún tiempo en el laboratorio de física del Queen's College de Belfast, Bell entró en la Universidad de Birmingham, donde obtuvo el doctorado en física en 1956. Se especializó en física nuclear y teoría cuántica de campos, y tras recibir el grado de doctor trabajó durante varios años para la Agencia Británica de Energía Atómica.

Cuando estaba investigando en física de aceleradores en Malvern (Gran Bretaña), John conoció a Mary Ross, una compañera de trabajo especialista en esa área. Se casaron en 1954, y siguieron carreras en común, trabajando frecuentemente en el mismo proyecto. Tras haber conseguido sus títulos de doctor (ella lo obtuvo en física matemática por la Universidad de Glasgow) y trabajado durante varios años en Harwell para el *establishment* nuclear británico, comenzó a desilusionarles la dirección que el centro de investigación estaba tomando; abandonaron sus puestos estables en Harwell para ocupar plazas no permanentes en el Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN), en Ginebra. Allí, John trabajaba en la División de Teoría y Mary formaba parte del Grupo de Investigación en Aceleradores.

Toda la gente que conocía a John Bell quedaba impactada por su brillantez, honradez intelectual y modestia personal. Publicó

muchos artículos y escribió muchos memorandos internos importantes, y para quienes le conocían estaba claro que era una de las mayores mentes de la época. Como investigador, Bell desarrolló tres carreras separadas: una fue el estudio de los aceleradores de partículas con los que trabajaba; otra, la física teórica de partículas que llevó a cabo en el CERN; y la tercera, la que al final hizo su nombre famoso más allá de la comunidad de físicos, fue su investigación sobre los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica.

Bell dedicaba sus horas de trabajo en el CERN casi exclusivamente a la física teórica de partículas y al diseño de aceleradores, de manera que sólo podía usar su tiempo libre en casa para seguir con lo que él llamaba su *hobby*: la exploración de los elementos básicos de la teoría cuántica. En 1963 se tomó un año de excedencia en el CERN y lo pasó en Stanford, la Universidad de Wisconsin y la Universidad de Brandeis. Fue durante ese año en el extranjero cuando empezó a abordar los problemas profundos de la teoría cuántica seriamente. Continuó su trabajo sobre estos temas tras su reincorporación al CERN en 1964, pero tuvo cuidado en mantener separada su implicación en la teoría cuántica de su trabajo «principal» de investigación en dicho organismo sobre partículas y aceleradores. La razón era que desde el principio de su carrera Bell ya se había dado cuenta de los puntos oscuros serios de la teoría cuántica. Mientras estaba de permiso en Estados Unidos, Bell tuvo la inspiración de que John von Neumann había cometido un error

en sus hipótesis acerca de la teoría cuántica, pero, en sus propias palabras, «me escapé del problema».

A nadie le cabía la menor duda de que John von Neumann había sido un soberbio matemático, probablemente un genio. Y Bell no tenía nada que objetar a las matemáticas de Von Neumann; era la interfase entre matemáticas y física lo que le causaba problemas. En su libro primordial sobre los fundamentos de la teoría cuántica, Von Neumann había hecho una suposición —esencial para lo que venía después— que, a juicio de Bell, no tenía demasiado sentido físico. En su obra sobre la teoría cuántica Von Neumann supuso que el valor esperado (el promedio pesado con las correspondientes probabilidades) de la suma de varias magnitudes observables era igual a la suma de los valores esperados de dichas magnitudes por separado. [Matemáticamente, para observables A , B , C , ... y operador de expectación $E(\)$, Von Neumann creía que era natural tomar $E(A + B + C + \dots) = E(A) + E(B) + E(C) + \dots$] Bell sabía que esta aparentemente inocua suposición no era defendible cuando los observables A , B , C ... se representan mediante operadores que no conmutan necesariamente entre sí. En un lenguaje no matemático, y de manera no muy precisa, diríamos que Von Neumann no había tenido en cuenta las consecuencias del principio de incertidumbre, puesto que los operadores que no conmutan no pueden medirse simultáneamente con exactitud debido a dicho principio.

El primer trabajo importante de Bell trató de los fundamentos cuánticos, y fue realmente su segunda publicación en esta área (un artículo escrito más tarde, que discutiremos enseguida, se publicó

antes). En este artículo, «On the problem of hidden variables in quantum mechanics» (Sobre el problema de las variables ocultas en mecánica cuántica), abordó el error en el trabajo de Von Neumann, así como dificultades similares con los trabajos de Jauch y Piron y de Gleason.

Andrew Gleason es un matemático de tanto prestigio como lo había sido Von Neumann. Es profesor en la universidad de Harvard, y adquirió su reputación al resolver uno de los famosos problemas de Hilbert. En 1957 escribió un artículo acerca de los operadores de proyección en el espacio de Hilbert. Sin Bell saberlo, el teorema de Gleason era relevante para el problema de las variables ocultas en mecánica cuántica. Josef Jauch, que vivía entonces en Ginebra, donde también vivían John y Mary Bell, despertó la atención de John Bell sobre dicho teorema cuando éste se hallaba investigando sobre lo que sería su primer artículo acerca de las variables ocultas. El teorema de Gleason es bastante general y no está dirigido a resolver problemas de la teoría cuántica; fue demostrado por un matemático puro con interés en matemáticas y no en física. No obstante, el teorema tiene un corolario con implicaciones importantes para la teoría cuántica. El corolario del teorema de Gleason implica que ningún sistema asociado mecanocuánticamente con un espacio de Hilbert de dimensión mayor que dos puede admitir un estado sin dispersión. Bell advirtió, sin embargo, que, si se relajan las premisas de Gleason, existe la posibilidad de una clase más general de variables ocultas, una clase de teorías que hoy día se conocen como teorías de variables ocultas

«contextuales». Así pues, había un escape (para las teorías de variables ocultas) si se trataba de usar el teorema de Gleason en el contexto de la idea de EPR.

Los estados libres de dispersión son aquellos que pueden tener valores medidos con precisión absoluta. No tienen variación, ni dispersión, ni incertidumbre. Si los estados sin dispersión realmente existen, la precisión que revelan debe provenir de algunas variables ocultas no tenidas en cuenta (en la teoría cuántica) porque la teoría cuántica admite un principio de incertidumbre. En consecuencia, para escaparse de la incertidumbre remanente inherente a la mecánica cuántica a fin de obtener esos estados precisos, sin dispersión, se tendrían que usar variables ocultas.

Bell no entendía la prueba de Gleason del corolario de su teorema, así que construyó su propia demostración, que mostraba que excepto para el caso no importante de un espacio de Hilbert bidimensional, no existen estados sin dispersión y, por tanto, tampoco variables ocultas. En lo referente a Von Neumann, probó que la hipótesis empleada por éste era inapropiada y, en consecuencia, que sus resultados eran cuestionables. Tras hacer revivir la discusión sobre si existen variables ocultas en la teoría cuántica, Bell dio un paso adelante: abordó el problema de EPR y el entrelazamiento.

Bell había leído el artículo de 1935 de Einstein y sus colaboradores Podolsky y Rosen (EPR), que había sido publicado treinta años antes como un desafío a la teoría cuántica. Bohr y otros habían respondido a este artículo, y todo el mundo en física creía que la

cuestión estaba resuelta y que se había demostrado que Einstein estaba equivocado. Pero Bell pensaba de otra manera.

John Bell se daba cuenta de una gran verdad acerca del argumento de EPR: sabía que Einstein y sus colegas estaban realmente en lo cierto. La «paradoja de EPR», como la llamaba todo el mundo, no era paradoja en absoluto. Lo que Einstein y sus colaboradores hallaron era algo crucial para nuestra comprensión del funcionamiento del universo. Pero ello no era que la teoría cuántica fuese incompleta, sino más bien que la mecánica cuántica y la insistencia de Einstein sobre el realismo y la localidad eran cosas que se contradecían, y ambas no podían ser ciertas. Si la teoría cuántica era cierta, la localidad no lo era; y si insistimos en la localidad, tiene que haber algo equivocado en la teoría cuántica como descripción del mundo de lo muy pequeño. Bell formuló esta conclusión como un profundo teorema matemático que contenía ciertas desigualdades. Sugirió que si estas desigualdades pudieran violarse, esta violación proporcionaría pruebas a favor de la mecánica cuántica y en contra de la hipótesis de sentido común de Einstein del realismo local. Por el contrario, si las desigualdades se satisficieran, ello probaría que la mecánica cuántica estaba equivocada y la localidad —en el sentido de Einstein— sería el punto de vista verdadero. De un modo más preciso, es posible violar *ambas cosas*, la mecánica cuántica y las desigualdades de Bell, pero es imposible que se satisfagan las desigualdades de Bell y las predicciones de la mecánica cuántica para ciertos estados cuánticos.

John Bell escribió dos artículos pioneros. El primero analizaba la idea de Von Neumann y otros sobre la existencia de *variables ocultas*, las cuales deberían hallarse y añadirse a la teoría cuántica para hacerla «completa», como habían demandado Einstein y colaboradores. En este artículo probó que el teorema de Von Neumann y otros teoremas que demostraban la imposibilidad de la existencia de variables ocultas en mecánica cuántica tenían fallos. Bell probó entonces su propio teorema, que establecía, de verdad, que las variables ocultas no podían existir. A causa de que hubo un retraso en su publicación, ese primer artículo importante de Bell se publicó en 1966, después de la aparición de su segundo artículo; éste, publicado en 1964, se titulaba «On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox» («Sobre la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen»), y en él aparecía el fundamental «teorema de Bell», que cambió nuestro modo de pensar acerca de los fenómenos cuánticos.

Bell usó una forma particular de la paradoja de EPR, la que había sido refinada y expuesta de manera más sencilla por David Bohm. Contempló el caso en el cual dos partículas entrelazadas de espín $1/2$ en el estado singlete son emitidas por la misma fuente y analizó lo que sucede en tal experimento.

En el artículo, Bell decía que la paradoja de EPR había sido propuesta como un argumento a favor de que la teoría cuántica no podía ser completa y debe ser completada por medio de variables adicionales. Tales variables adicionales, según EPR, restituirían a la

mecánica cuántica sus vacantes nociones de causalidad y localidad. En una nota, Bell citaba a Einstein:³³

Pero deberíamos mantener absolutamente, en mi opinión, la siguiente hipótesis: la situación real de hecho del sistema S_2 es independiente de lo que se haga con el sistema S_1 separado espacialmente de aquél.

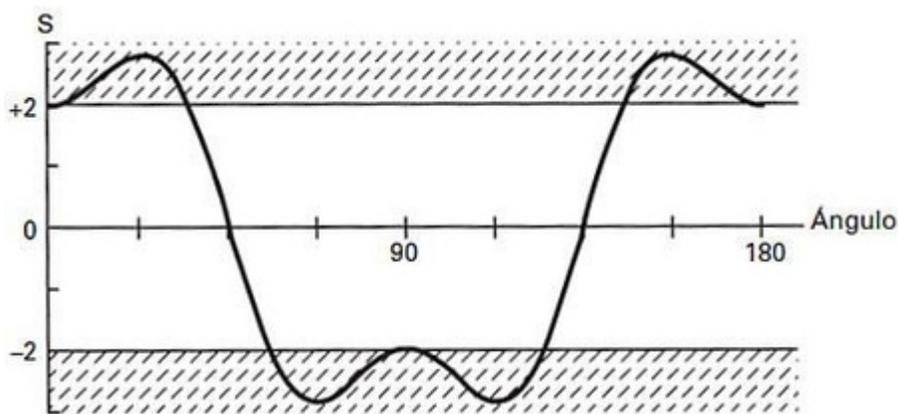
Bell afirmaba que en su artículo demostraría matemáticamente que las ideas de Einstein sobre causalidad y localidad son incompatibles con las predicciones de la mecánica cuántica. Afirmaba además que era el requisito de localidad —que el resultado de una medida en un sistema no sea afectado por operaciones en un sistema distante con el cual ha interactuado en el pasado— lo que crea la dificultad esencial. El artículo de Bell presenta un *teorema en forma de alternativa*: o las variables ocultas locales son verdaderas o lo es la mecánica cuántica, pero no las dos a la vez. Y si la mecánica cuántica es la descripción correcta del micromundo, la no-localidad es una característica importante del mismo.

Bell desarrolló su importante teorema comenzando por suponer que *existe* algún modo de completar la mecánica cuántica con una estructura de variables ocultas, como habría demandado Einstein. Las variables ocultas llevan entonces la información que falta (en la mecánica cuántica). Las partículas están dotadas de un conjunto de instrucciones que les dice, de antemano, lo que han de hacer en

³³ Del libro *Albert Einstein, philosopher scientist*, P. A. Schilpp (ed.), Library of Living Philosophers, Evanston, IL, 1949, p. 85.

cada eventualidad, es decir, en cada elección del eje respecto al cual podría medirse el espín. Por medio de esta suposición, Bell llegó a una contradicción, lo que mostraba que la mecánica cuántica *no podía* completarse con ningún esquema de variables ocultas. El teorema de Bell se expresa mediante una desigualdad. Esta desigualdad se refiere a la suma, S , de los resultados posibles del experimento obtenidos por Alicia y por Benito.

Dicha desigualdad se muestra en la figura siguiente.



La desigualdad de Bell es: $-2 < S < 2$

Según el teorema de Bell, si se viola la desigualdad anterior, esto es, la suma del resultado de Alicia y el resultado de Benito es mayor que dos o menor que menos dos, en algún experimento real con partículas o fotones entrelazados, entonces el resultado de dicho experimento constituye una *prueba de la no-localidad*, en el sentido de que algo que le sucede a la primera partícula afecta, instantáneamente, a lo que le sucede a la segunda, no importa lo

lejos que pueda estar de aquélla. Lo que quedaba por hacer era que los experimentadores buscaran esos resultados.

Sin embargo, aquí había un problema. Bell dedujo su desigualdad a partir de una suposición de localidad haciendo uso de una hipótesis especial. Supuso que la teoría de variables ocultas está exactamente de acuerdo con la predicción de la mecánica cuántica para las dos partículas en el estado singlete, es decir, que, a lo largo de cualquier eje, el espín de la partícula 1 es opuesto al de la partícula 2 a lo largo del mismo eje. De modo que si los valores experimentales están de acuerdo con la predicción de la mecánica cuántica para la cantidad que aparece en la desigualdad de Bell, ello no implica la falsedad de la suposición de localidad salvo que haya pruebas de que la hipótesis especial de Bell es correcta, y tales pruebas son difíciles de obtener en la práctica. Este problema constituía una barrera para realizar *tests* experimentales definitivos. No obstante, Clauser, Horne, Shimony y Holt realizarían posteriormente una mejora que resolvería ese problema técnico y que permitiría la verificación experimental del teorema de Bell.

En cualquier caso, la conclusión del teorema de Bell era que las variables ocultas y una suposición de localidad no tenían lugar dentro de la mecánica cuántica, que era incompatible con tales suposiciones. El teorema de Bell era, así pues, un potente resultado en física.

«¿Sabe usted por qué fue Bell, y no alguna otra persona, quien abordó la paradoja de EPR y probó un teorema que establece que la no-localidad y la teoría cuántica van de la mano?», me preguntó

Abner Shimony. «Todo el mundo que lo conocía tenía claro que debía ser John Bell», continuó. «Bell era un individuo único. Era curioso, tenaz y animoso. Tenía una personalidad más fuerte de lo común. Le metió mano al trabajo de Von Neumann —uno de los matemáticos más famosos del siglo XX— y, sin vacilar, demostró que la hipótesis de éste no era cierta. Después siguió con el de Einstein».

Einstein y sus colegas encontraban increíble el entrelazamiento entre sistemas bien separados espacialmente. ¿Cómo algo que ocurre en un lugar podría afectar instantáneamente a algo en un sitio diferente? Pero Bell era capaz de ver más allá de la intuición de Einstein y probar el teorema que inspiraría a los experimentadores para establecer que el entrelazamiento era un fenómeno real. Él estaba de entrada de acuerdo con Einstein, pero dejaba al experimento la verificación de si la creencia de éste sobre la localidad era correcta.

John Bell murió inesperadamente en 1990, a la edad de 62 años, debido a una hemorragia cerebral. Su muerte supuso una gran pérdida para la comunidad científica. Había continuado activo hasta sus últimos días, escribiendo y dando conferencias sobre mecánica cuántica, el experimento ideal de EPR y su propio teorema. De hecho, los físicos continúan mirando el teorema de Bell, con sus profundas implicaciones acerca de la naturaleza del espacio-tiempo y los fundamentos del cuanto, del mismo modo que lo han hecho durante las tres décadas pasadas. Casi todos los experimentos en conexión con el teorema han proporcionado un fuerte apoyo a la

teoría cuántica y a la realidad del entrelazamiento y de la no-localidad.

Capítulo 14

El sueño de Clauser, Horne Y Shimony

Nuestra comprensión de la mecánica cuántica está dificultada por el problema de la medida y el problema de la no-localidad... Me parece improbable que cualquiera de estos problemas pueda resolverse sin tener la solución del otro y, por lo tanto, sin un profundo ajuste entre la teoría del espacio-tiempo y la mecánica cuántica.

ABNER SHIMONY

Abner Shimony proviene de una familia rabínica judía. Sus antepasados se encontraban entre las escasas familias que habían vivido continuamente en Jerusalén durante muchas generaciones y su abuelo fue el *shochet* principal (supervisor de la matanza *kosher*) de Jerusalén. Abner nació en Columbus, Ohio, en 1928, y creció en Memphis, Tennessee. Mostró desde muy pequeño una fuerte curiosidad intelectual. Fue a la Universidad de Yale a estudiar filosofía y matemáticas desde 1944 a 1948, año en el que obtuvo su título de graduado. Leyó mucha filosofía, incluidos Alfred N.

Whitehead, Charles S. Peirce y Kurt Gödel. Durante su estancia en Yale se interesó también por los fundamentos de la matemática.

Shimony continuó sus estudios en la Universidad de Chicago, donde obtuvo la licenciatura de filosofía, y después fue a Yale para realizar la tesis doctoral en filosofía, consiguiendo su título de doctor en 1953. En la Universidad de Chicago estudió filosofía con la prestigiosa figura central del Círculo de Viena —un selecto club filosófico europeo—, Rudolph Carnap, quien después sería su supervisor informal cuando escribía en Yale la tesis doctoral sobre lógica inductiva. Carnap estaba sorprendido de que Shimony, a pesar de su interés por la lógica matemática y la física teórica, se proclamara metafísico. Era ése un campo de interés para él, en el que alcanzaría una cota muy alta tanto en física como en filosofía al profundizar en los aspectos metafísicos del concepto de entrelazamiento, el cual se convertiría en su obsesión y empeño duradero.

En Princeton, Abner conoció a otro filósofo con estrechos contactos con el Círculo de Viena: el legendario Kurt Gödel. Quedó impresionado con la mente suprema que ideó los famosos teoremas de incompletitud y probó aspectos difíciles de la hipótesis del continuo. Poco tiempo después, decidió que en realidad no estaba muy interesado por los fundamentos de la matemática y dirigió su atención a la física y a la filosofía. Se interesó mucho por los fundamentos filosóficos de la física, de modo que estudió física y se doctoró en esta disciplina en 1962. Su trabajo de tesis se centró en el campo de la mecánica estadística. Se sintió atraído por la teoría

cuántica, y sus ideas estuvieron influidas por Eugene Wigner y John Archibald Wheeler.

Shimony siempre se ha esforzado en combinar cuidadosamente su interés filosófico y su interés físico. Contempla la física desde un punto de vista fundamental, matemático y filosófico, lo que le proporciona una perspectiva única sobre esta disciplina en su totalidad y sobre el lugar que ocupa en el esfuerzo humano por el conocimiento. En 1960, antes de obtener su segundo doctorado, entró en la facultad de filosofía del MIT, donde impartió cursos sobre la filosofía de la mecánica cuántica. Comenzó a ser conocido en esa área y, tras recibir su segundo doctorado por la Universidad de Princeton, obtuvo en la de Boston una plaza compartida entre física y filosofía.

En opinión de Shimony, su trayectoria profesional fue más bien inesperada: comenzó en un centro prestigioso como el MIT y obtuvo allí un puesto permanente, para después cambiarse a una plaza interina en un centro algo menos prestigioso (aunque muy pronto le concedieron una plaza permanente). Pero Abner hizo todo eso porque quería seguir el dictado de su corazón. El MIT tenía, y aún tiene, un soberbio departamento de física; de hecho, el instituto alardea de varios premios Nobel de física. No obstante, él trabajaba en el departamento de filosofía. Anhelaba enseñar e investigar en física y filosofía a la vez. Así que abandonó su puesto en el MIT por una plaza compartida entre los departamentos de física y filosofía de la Universidad de Boston. El nuevo puesto le permitía investigar sobre lo que le interesaba. Nuestra comprensión del complejo

fenómeno del entrelazamiento, tanto desde el punto de vista físico como del filosófico, debe mucho a ese cambio de Shimony a la Universidad de Boston.

En 1963, Abner escribió un importante artículo sobre el proceso de medición en mecánica cuántica. Un año más tarde, John Bell escribió un artículo que ponía en tela de juicio nuestra comprensión del mundo.

Abner Shimony encontró por primera vez el concepto de entrelazamiento en 1957. Ese año, su nuevo supervisor en Princeton, Arthur Wightman, le pasó una copia del artículo de EPR y le pidió que, a modo de ejercicio, intentase encontrar lo que había de equivocado en el argumento de EPR. Shimony estudió el artículo, pero no halló en él ningún error. Cuando el teorema de Bell fue conocido por los físicos varios años después, Wightman hubo de manifestar su acuerdo: Einstein no cometió ningún error; lo que hizo fue inferir la incompletitud de la mecánica cuántica a partir de la conjunción de tres premisas: la exactitud de ciertas predicciones estadísticas de la mecánica cuántica, el criterio de suficiencia para la existencia de un elemento de realidad y la hipótesis de localidad. Einstein y sus colegas nos indicaron que, si nos manteníamos en nuestra creencia de que lo que sucede en un lugar no puede afectar de manera instantánea a lo que sucede en otro lugar distante, entonces algunos fenómenos predichos por la mecánica cuántica se encontrarán en contradicción con tales premisas. Fue el teorema de Bell, al principio ampliamente ignorado por la comunidad de físicos, lo que sacó esta contradicción a la superficie de una manera que, al

menos en principio, podía ser verificado físicamente. Lo que probó Bell fue que, incluso si todas las premisas de EPR fueran correctas, con la consecuencia de que la mecánica cuántica tendría que ser completada con variables ocultas, ninguna teoría que usara variables ocultas *locales* (esto era, desde luego, lo que EPR deseaban) estaría de acuerdo con todas las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica. Este conflicto hace posible un experimento decisivo, al menos en principio. La esencia de esta idea estaba ya tomando forma en la mente de Abner Shimony.

En 1968, un día Shimony recibió en su casa al primer estudiante de doctorado que iba a dirigir como profesor de la Universidad de Boston. Se trataba de Michael Horne, quien llegó a Boston tras graduarse en física en la Universidad de Misisipí, y que estaba deseando trabajar con Shimony.

Michael A. Horne nació en Gulfport, Misisipí, en 1943. Cuando se hallaba en secundaria, la Unión Soviética puso en órbita el primer satélite artificial, el *Sputnik*. Este acontecimiento, que tan profundo efecto tuvo sobre el desarrollo de la ciencia en Estados Unidos, así como sobre otras muchas facetas de nuestras vidas, tuvo también un impacto decisivo sobre la elección de carrera de Michael Horne.

En un estado de agitación para tratar de responder a la ventaja espacial rusa, Estados Unidos creó un consejo de científicos, el Comité de Estudio de las Ciencias Físicas, que se reunió en el MIT para idear maneras de hacer a ese país más competitivo en la confrontación científica, y en particular en física, con los rusos. La idea que impulsaba el programa era hacer que Estados Unidos fuera

superior en educación y en ciencias exactas, y, como parte de sus recomendaciones, el Comité comisionó a físicos para escribir libros de ciencia que ayudaran a preparar a los estudiantes de Estados Unidos para el estudio de la física y otras ciencias. Mike Horne encontró uno de los libros escritos bajo los auspicios del Comité en una librería de Misisipí y lo devoró con gran excitación. El libro, cuyo autor era I. B. Cohen, un historiador de la ciencia de Harvard, se titulaba *The new Physics* (La nueva física). Trataba acerca de Newton y su «nueva» física de hacia 1700. Encontró el libro maravilloso; aprendió tanto de él que encargó la serie entera, a 95 centavos el volumen. El Comité tuvo por lo visto mucho éxito, al menos con Michael Horne; a partir de lo que descubrió en esos libros, decidió en su primer año de bachillerato ser físico. Más tarde, se graduó en física en la Universidad de Misisipí.

Horne conocía la existencia de los grandes centros de física de Estados Unidos y su sueño era hacer los estudios de licenciatura en uno de ellos. Cuando todavía era estudiante no graduado en la Universidad de Misisipí, leyó el conocido libro de Mach sobre la mecánica. La introducción a la traducción al inglés de la edición de Dover estaba escrita por un profesor de física de la Universidad de Boston, Robert Cohen. Se entusiasmó con el libro y la introducción y se preguntó si algún día conocería a Robert Cohen, así que cuando solicitó entrar en la Universidad de Boston preguntaba en su carta si el profesor Cohen continuaba allí. Años más tarde, después de que Horne se hubiese hecho un nombre como uno de los pioneros en los fundamentos de la física, Robert Cohen le confió

que el hecho de que hubiera preguntado por él cambió las cosas. Parece ser que se sintió tan halagado que urgió a la facultad de física de la Universidad de Boston para que se aceptara a Horne en el programa de 1965.

Michael Horne se sintió atraído por los fundamentos de la física tan pronto como se interesó por la ciencia en sí. De modo que, tras ser aceptado en los estudios de licenciatura en la Universidad de Boston y haber cursado los dos primeros años, empezó a trabajar con el profesor Charles Willis en el área de los fundamentos de la física estadística. Willis estaba interesado en el problema de la deducción de las reglas de la mecánica estadística a partir de los principios de la mecánica y problemas similares. Después de algún tiempo trabajando con Willis, Horne formuló algunas cuestiones que llevaron a aquél a creer que su estudiante se beneficiaría hablando con el filósofo de la física de la Universidad de Boston Abner Shimony, así que lo envió allí para que lo conociera.

Shimony le entregó a Horne los dos artículos de John Bell, que le habían sido remitidos hacía poco por un amigo. Abner sabía que los artículos eran extremadamente importantes y que probablemente la mayoría de la comunidad de físicos los estaban pasando por alto. Al darse cuenta de que tenía ante él a un estudiante de mente penetrante y con gran interés en los fundamentos de la teoría cuántica, le pasó los dos artículos y le dijo: «Lee estos artículos y mira si podemos desarrollarlos y proponer un experimento real para poner a prueba lo que dice Bell en ellos». Horne se fue a casa y empezó a considerar cuidadosamente las oscuras pero profundas

ideas que habían escapado a la atención de muchos físicos. Lo que proponía Bell en su artículo era muy interesante. Bell pensaba que el compromiso de Einstein con la localidad podría ser refutado por el experimento (aunque daba la impresión de que él esperaba que ganase Einstein). ¿Era posible idear un experimento real que pusiera a prueba si el realismo local de Einstein era verdadero o si, por el contrario, lo era la mecánica cuántica, con sus implicaciones de no-localidad? Un experimento así sería de inmenso valor para la física.

John F. Clauser nació en 1942 en California, donde su padre, su tío y otros miembros de la familia habían obtenido títulos de Caltech (Instituto Tecnológico de California). El padre de John, Francis Clauser, se había graduado en física por dicho Instituto, y en casa siempre había profundas discusiones sobre física. Esas conversaciones se dieron desde que John estudiaba el bachillerato, de manera que se empapó de la tradición de las discusiones sobre el significado y el misterio de la mecánica cuántica. Su padre le insistía en que no aceptara nunca sin más lo que la gente le dijera, sino que antes se fijara en los resultados experimentales. Ese principio guiaría la carrera de John Clauser.

John fue a Caltech, y allí, al mismo tiempo que estudiaba física, hacía preguntas. Clauser estaba influido por las enseñanzas del famoso físico Richard Feynman, que formaba parte del profesorado de Caltech y sobre quien siempre circulaban historias y leyendas en el campus. Su primera introducción rigurosa a la teoría cuántica tuvo lugar a través de las lecciones de Feynman, que después

fueron publicadas como la famosa obra en tres volúmenes *Feynman's lectures on physics* (Lecciones de física de Feynman). En el volumen tercero es donde Feynman proclama que el resultado del experimento de Young de la doble rendija contiene el misterio esencial y único de la mecánica cuántica.

Clauser cazó al vuelo cuáles eran los elementos clave de los fundamentos de la mecánica cuántica, y algunos años después, cuando decidió poner a prueba la desigualdad de Bell y la paradoja de EPR, le mencionó este deseo a su antiguo profesor. «Feynman me echó de su despacho», explicó Clauser.

Después de Caltech, Clauser trabajó como licenciado en física experimental en la Universidad de Columbia. Estuvo allí a finales de la década de 1960, trabajando bajo la supervisión de Patrick Taddeus sobre el descubrimiento de la radiación de fondo (del universo), que luego fue usado por los cosmólogos en apoyo de la teoría del Big Bang. No obstante, a pesar de la importancia del problema, Clauser se sentía atraído por otra área diferente de la física: los fundamentos de la teoría cuántica.

En 1967, Clauser estaba ojeando algunas oscuras revistas de física en el Instituto Goddard de Estudios Espaciales cuando un curioso artículo llamó su atención. Su autor era John Bell. Leyó el artículo e inmediatamente se dio cuenta de algo que no habían notado otros físicos. El artículo de Bell tenía en potencia inmensas implicaciones sobre los fundamentos de la teoría cuántica. Bell revivía la paradoja de EPR y exponía sus elementos esenciales. Además, tomado literalmente, el teorema de Bell presentaba una manera de poner a

prueba experimental la propia esencia de la mecánica cuántica. Como estaba familiarizado con el trabajo de David Bohm y su despliegue de la idea de EPR en su artículo de 1957, así como con el trabajo de De Broglie, Clauser no se sintió demasiado sorprendido por el teorema de Bell. Pero como había sido educado en el escepticismo, trató de hallar algún fallo en el argumento de éste. Se pasó mucho tiempo intentando encontrar un contraejemplo que refutara el importante teorema de Bell. Pero tras semanas de empeño, llegó al convencimiento de que no había nada equivocado en el teorema; Bell tenía razón. Así pues, había llegado el momento de usar el teorema y poner a prueba los mismísimos fundamentos del mundo cuántico.

El artículo de Bell era claro para Clauser en todo salvo en lo referente a los aspectos experimentales de las predicciones de la teoría, lo que hizo que, cauto como era, indagase en la literatura física buscando experimentos que Bell hubiera podido pasar por alto y que pudieran arrojar luz sobre el problema abordado por el teorema. Sin embargo, lo único que pudo encontrar fue el experimento de Wu y Shakhnov sobre emisión del positronio (la emisión de dos fotones de alta energía como resultado de la aniquilación mutua de un electrón y un positrón) de 1949, que no trataba completamente el problema de la correlación. El artículo de Bell no proponía una manera clara de llevar a cabo un experimento según las líneas del mismo. Al ser un teórico, Bell supuso —como hacen frecuentemente los teóricos— un montaje experimental ideal: aparato ideal que no existe en el laboratorio y preparación ideal de

las partículas correlacionadas. Era el momento de que alguien versado tanto en física teórica como en física experimental emprendiera la tarea a partir de donde la había dejado Bell y diseñara un experimento real.

Clauser fue a Columbia para hablar con Madame Wu y preguntarle acerca de sus experimentos sobre el positronio. Como mostraron Bohm y Aharonov en 1957, los dos fotones así producidos están entrelazados. Le preguntó a Madame Wu si había medido las correlaciones entre los fotones en sus experimentos, y ella respondió que no había llevado a cabo tales mediciones. Clauser pensó que si lo hubiera hecho él podría haber obtenido de ella los resultados experimentales que necesitaba para poner a prueba la desigualdad de Bell. (Wu no podía haber hecho tales mediciones porque los fotones de alta energía provenientes de la desintegración del positronio no dan suficiente información sobre la correlación de la polarización par a par para realizar un test de la desigualdad de Bell, como estaban a punto de descubrir independientemente Horne y Shimony, y Clauser). Wu envió a Clauser a hablar con su estudiante de doctorado Len Kasday, que estaba haciendo de nuevo el experimento del positronio de varias décadas antes. El nuevo experimento de Wu y Kasday (realizado junto con Ullman) midió en su momento esas correlaciones y sería usado para llevar a cabo tests de la desigualdad de Bell. Sus resultados, publicados en 1975, se emplearían para añadir pruebas a favor de la mecánica cuántica; aunque, para medir las correlaciones, Kasday y Wu tenían que hacer fuertes suposiciones auxiliares que no podían verificar,

debilitando así sus resultados. Pero entonces Clauser supo que los resultados de Wu y Shaknov eran inútiles para los tests de la desigualdad de Bell y que tenía que desarrollar algo nuevo.

Clauser continuó trabajando solo, sin dedicar demasiada atención a lo que se suponía que iba a ser su tesis doctoral acerca de la radiación cósmica de fondo de microondas. Pero la reacción de sus compañeros no fue favorable. Parecía que nadie con quien hablaba pensaba que valiese la pena el trabajo experimental sobre las desigualdades de Bell. Los físicos creían o bien que tales experimentos no podían producir resultados, o bien que Bohr ya había vencido en el debate con Einstein treinta años atrás y que todo intento de reconciliar las objeciones de Einstein con las respuestas de Bohr sería una pérdida de tiempo. Pero Clauser no se rendía. Revisando el viejo experimento de Wu y Shaknov, concluyó que se necesitaba algo que estaba más allá de sus resultados experimentales para poner a prueba la mecánica cuántica frente a las teorías de variables ocultas del modo sugerido por el teorema de Bell. Siguió trabajando en el problema, y en 1969 realizó finalmente un avance decisivo, como resultado del cual envió un resumen de un trabajo para ser presentado en un congreso de física, en el que sugería cómo podría llevarse a cabo un experimento para verificar la desigualdad de Bell. Ese resumen se publicó en el *Boletín* del encuentro de Washington de la Sociedad Americana de Física en la primavera de 1969.

De regreso a Boston, Abner Shimony y Mike Horne pasaron mucho tiempo, a finales de 1968 y principios de 1969, trabajando

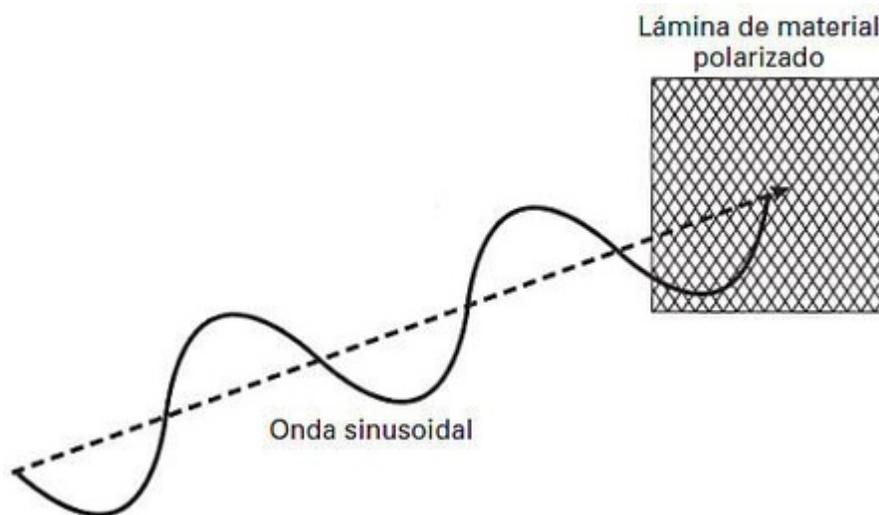
firmemente para diseñar lo que, pensaban, sería uno de los experimentos más importantes que los físicos podrían intentar llevar a cabo. Su trayectoria era muy parecida a la tomada por Clauser en Nueva York. «Lo primero que hice después de recibir el encargo de Abner fue examinar los resultados del experimento de Wu y Shaknov», rememoró Mike Horne. Comprendió que dicho experimento sobre la desintegración del positronio debería haber tenido alguna relevancia para el problema del teorema de Bell porque los dos fotones emitidos en la aniquilación electrón-positrón tenían que estar entrelazados. El problema era que esos dos fotones resultaban de muy alta energía y, en consecuencia, sus polarizaciones resultaban mucho más difíciles de medir que las de los fotones en la zona visible del espectro (luz visible).

Para poner de manifiesto las correlaciones de polarización, Wu y Shaknov habían dispersado los pares de fotones por electrones («dispersión Compton»). De acuerdo con las fórmulas de la mecánica cuántica, las correlaciones entre las direcciones de polarización de los fotones se transfieren débilmente por el efecto Compton a correlaciones entre las direcciones en el espacio de las partículas dispersadas, esto es, arriba-abajo o derecha-izquierda o algo intermedio. Mike sospechaba, como lo había hecho John Clauser, que esa transferencia es demasiado débil estadísticamente para ser de alguna utilidad en un experimento tipo Bell. Para probarlo de una vez por todas, Mike construyó un modelo matemático explícito de variables ocultas que satisfacía completamente la localidad de EPR y los requisitos de realidad y, no obstante, reproducía

exactamente las predicciones cuánticas para la dispersión Compton conjunta (de los dos fotones).

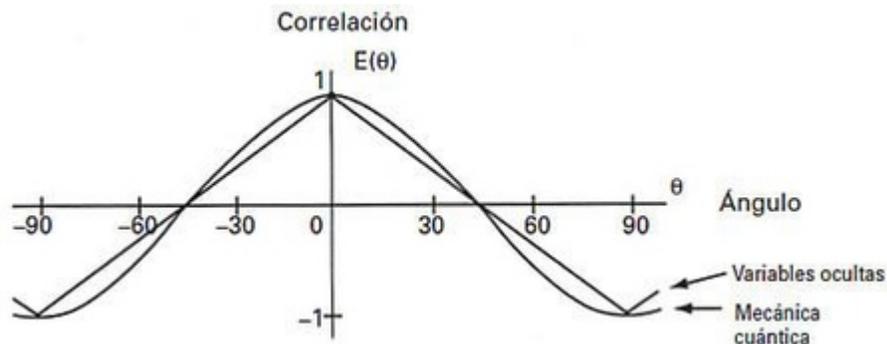
Así pues, los resultados experimentales de Wu y Shaknov —o cualquier versión perfeccionada de su experimento usando dispersión Compton— no podían usarse para discriminar entre las dos posibilidades de la alternativa: variables ocultas locales (como había sugerido Einstein) *versus* mecánica cuántica. Había que diseñar algo completamente nuevo.

Mike le mostró a Abner su modelo explícito de variables ocultas locales y ambos decidieron que el experimento debía hacerse con fotones visibles. Existen láminas Polaroid, prismas de calcita y algunos otros instrumentos ópticos para analizar la dirección de polarización de los fotones de la luz visible. Un instrumento de ese tipo se muestra a continuación.



Abner pidió consejo a diversos experimentadores acerca de tales experimentos, y finalmente supo por un antiguo compañero de clase

de Princeton, Joseph Snider, entonces en Harvard, que, en Berkeley, Carl Kocher y Eugene Commins ya habían llevado a cabo un experimento de ese tipo. Abner y Mike descubrieron pronto que el experimento de Kocher y Commins usaba ángulos de polarización de cero y noventa grados solamente, de modo que sus resultados no podían utilizarse para un test de la desigualdad de Bell, puesto que los ángulos intermedios eran los que la determinaban. Técnicamente, para llevar a cabo el muy sensible test requerido para decidir entre las dos posibilidades de la alternativa en el teorema de Bell (teoría cuántica o variables ocultas), el experimento debía realizarse para una amplia gama de ángulos. Esto se muestra a continuación:



Como puede verse en esta figura, la diferencia entre la teoría cuántica y las teorías de variables ocultas es sutil. Sólo a través de un minucioso estudio de lo que ocurre a pares de fotones cuando el ángulo entre ellos es un rango de valores, puede un investigador descubrir cuál de las dos teorías es correcta. Mike y Abner trabajaron en el diseño del experimento real que cumpliera todos los requisitos de modo que sus resultados determinaran cuál de las dos

ramas de la alternativa era la correcta: Einstein o la mecánica cuántica.

Proyectaron rápidamente una modificación del experimento de Kocher-Commins que permitiría a un físico hacer un test de la desigualdad de Bell en condiciones ideales. Todo lo que tendría que hacer un experimentador sería medir la dirección de polarización de cada uno de los fotones de un par entrelazado según ejes apropiados, diferentes de los usados por Kocher y Commins. Un problema aquí era que sólo unos pocos pares de fotones cumplirían la condición idealizada de haber sido emitidos en direcciones estrictamente opuestas entre sí (a 180 grados). De modo que en la etapa siguiente Horne y Shimony suavizaron esta poco realista y restrictiva suposición y consideraron pares de fotones que formaban ángulos distintos de 180 grados. Al hacer eso, sin embargo, se requería un cálculo mucho más complicado para analizar los resultados experimentales. Con la ayuda de Richard Holt, un estudiante de Frank Pipkin en la Universidad de Harvard que estaba interesado en realizar el experimento, Mike Horne fue capaz de calcular las predicciones cuánticas para las correlaciones de polarización en ese caso realista. Resulta interesante que dichos cálculos estuvieran de acuerdo con los realizados por Abner Shimony dos años antes usando las reglas de la mecánica cuántica para la adición de momentos angulares.

«Éste fue sin duda mi mejor artículo de física», comentó Shimony, cuando me describía el artículo que Mike y él habían escrito sobre el diseño de un experimento para poner a prueba las desigualdades de

Bell con resultados reales de laboratorio a fin de ver si la naturaleza se comportaba de una manera coherente con las variables ocultas o de acuerdo con la mecánica cuántica. El experimento que proponían usaría el mágico teorema de Bell para determinar cuál de las dos posibilidades era cierta: la afirmación de Einstein de que la mecánica cuántica era una teoría incompleta o la idea de Bohr de que era completa. Al decidir si la teoría cuántica era correcta, el experimento también revelaría si, como Einstein temía, había una posibilidad de «acción a distancia fantasmal», esto es, un entrelazamiento no-local. Sin ellos saberlo, sus ideas estaban en ese momento entrelazadas con las de otro físico, John Clauser, que trabajaba en el mismo problema a una distancia de sólo trescientos kilómetros.

Horne y Shimony hablaron con muchos expertos durante la fase de preparación del experimento. «Fuimos bastante pesados», decía Shimony. Preguntaron a los experimentadores acerca de varias técnicas que les permitieran poner a prueba el teorema. Tendrían que encontrar un aparato que emitiera pares de fotones de baja energía que estuvieran entrelazados, determinar un medio de medir sus polarizaciones, calcular las predicciones de la mecánica cuántica para las correlaciones de esas polarizaciones y mostrar que las correlaciones así calculadas violaban la desigualdad de Bell. Tras muchos meses de trabajo, tuvieron finalmente un diseño, y el artículo estuvo casi listo. Esperaban presentarlo en la reunión de primavera de la Sociedad Americana de Física en Washington DC, pero se les pasó la fecha límite de envío. «Pensé: ¿qué importa?», dijo

Shimony, «¿Quién más podría estar trabajando en problemas tan oscuros? De modo que prescindimos del congreso y preparamos el trabajo para enviarlo directamente a una revista. Algo después recibí las actas del congreso y descubrí la mala noticia: alguien había tenido la misma idea». Ese alguien era John Clauser.

Abner telefoneó a Mike un sábado a primera hora de la mañana. «Se nos han adelantado», le dijo. Se encontraron el lunes siguiente en el departamento de física de la Universidad de Boston y pidieron consejo a otros físicos: «¿Qué deberíamos hacer? Alguien ha hecho ya lo que nosotros hemos hecho...». La mayoría les respondió: «Haced como si no lo supierais y enviad el trabajo a una revista». Eso no les parecía correcto. Finalmente, Abner decidió telefonar a su antiguo director de tesis en Princeton, el premio Nobel Eugene Wigner. «Llama simplemente a esa persona —le sugirió Wigner— y habla con ella». Abner así lo hizo. Llamó a John Clauser a Nueva York.

Aunque honrado y directo, ese modo de actuar podría haber tenido un final desagradable. Los científicos tienden a ser animales territoriales que defienden celosamente su parcela. Y como Clauser había publicado ya el resumen de un artículo muy parecido a aquel en el que Horne y Shimony tan duramente habían trabajado, podría no haber respondido bien a los recién llegados al mismo proyecto. Mucha gente en una situación así podría decir: «¡Éste es mi proyecto de investigación; habéis tenido la idea algo tarde!», y luego colgar el teléfono. Pero John Clauser no. Ante la gran sorpresa de Abner y Mike, la reacción de Clauser fue positiva. «Se estremeció al oír que

estábamos trabajando en el mismo problema, que a nadie más parecía importar», me dijo Mike Horne, recordando aquel momento. De hecho, Shimony y Horne disponían de un arma secreta, lo que hizo que Clauser aún deseara más colaborar con ellos; habían «fichado» a un físico que estaba dispuesto a llevar a cabo el experimento en su laboratorio. Esta persona era Richard Holt, entonces en la Universidad de Harvard. Además de sentirse feliz por haber encontrado otras dos almas interesadas en la misma arcana área que a él le atraía, Clauser se dio cuenta de que podían empezar el experimento, y él deseaba estar en él. A propósito, el diseño experimental de Clauser hacía la misma idealización que habían hecho Horne y Shimony —centrarse en los pares de fotones cuyos componentes forman 180 grados entre sí (son emitidos en sentidos opuestos)— y que estaban en el proceso de eliminarla en cooperación con Holt.

Trabajando solo, John Clauser se hubiera quedado en la búsqueda de la manera de realizar el experimento anhelado; pero ahí estaban Horne, Shimony y Holt, listos para avanzar. No se lo pensó ni un minuto, y se subió al carro con ellos.

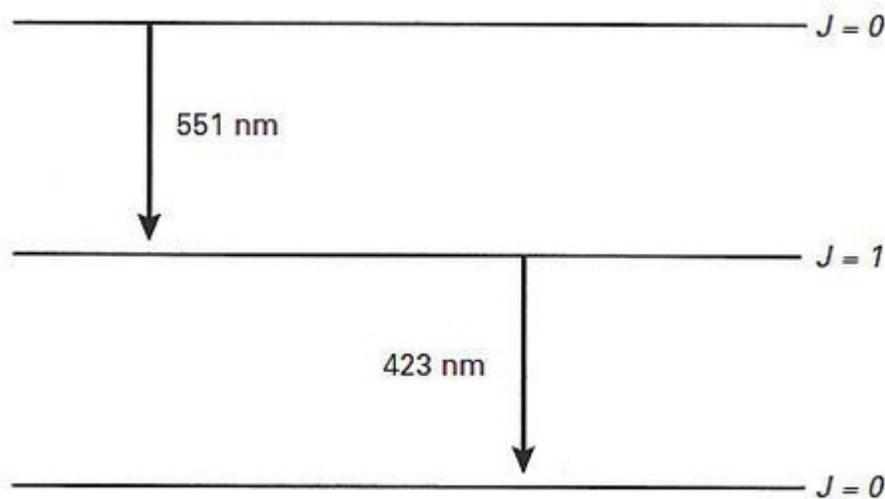
Los cuatro, Shimony, Horne, Clauser y Holt comenzaron una fructífera colaboración y pronto sacaron un artículo fundamental que detallaba cómo podría realizarse un experimento perfeccionado para dar una respuesta definitiva a la cuestión de Bell: ¿cuál es la respuesta verdadera, el realismo local de Einstein, según el cual lo que ocurre aquí no tiene ningún efecto instantáneo sobre lo que

ocurre en otro lugar, o la mecánica cuántica, que permite el entrelazamiento no-local?

El artículo de Clauser, Horne, Shimony y Holt (CHSH), publicado en *Physical Review Letters* en 1969, contenía una importante mejora de la deducción pionera de Bell de su desigualdad. Además de la existencia de una variable oculta que determina localmente el resultado de la medida, Bell había supuesto una restricción prestada de la mecánica cuántica: que si se mide la misma cantidad observable en ambas partículas, los resultados están estrictamente correlacionados. La deducción de Bell de su desigualdad hacía un uso esencial de esta restricción; CHSH la eliminaron, mejorando así la desigualdad. El resto del artículo proponía un desarrollo del diseño experimental usado por Carl Kocher y Eugene Commins en Berkeley en un experimento de 1966, realizado sin conocer el teorema de Bell, en el que se producían dos fotones y se medía la correlación entre sus direcciones.

Kocher y Commins habían usado el método de la *cascada atómica* para producir sus fotones correlacionados, y CHSH estuvieron de acuerdo en que éste era el método correcto también para su experimento. En dicho método, se excita un átomo, que emite dos fotones al decaer hasta dos niveles más abajo, y estos fotones están entrelazados. La fuente de los fotones era un haz de átomos de calcio procedentes de un horno. Los átomos del haz eran bombardeados con radiación ultravioleta intensa. Como respuesta a esa radiación, los electrones de los átomos de calcio se excitaban a niveles más altos, y cuando descendían de nuevo soltaban pares de

fotones correlacionados. Este proceso se llama «cascada atómica» porque en él un electrón cae en cascada desde un nivel alto, a través de uno intermedio, hasta un nivel final más bajo, soltando un fotón en cada uno de estos pasos. Como los niveles inicial y final son estados de momento angular total nulo, y el momento angular es una cantidad que se conserva, el par de fotones emitidos tiene momento angular cero, y éste es un estado de alta simetría y fuerte correlación entre la polarización de ambos fotones. La idea de una cascada atómica de ese tipo se muestra en la figura siguiente.



Una nota al final del artículo de CHSH reconocía que el trabajo contenía un despliegue de las ideas que había presentado John Clauser en el encuentro de primavera de 1969 de la Sociedad Americana de Física. Así pues, una situación potencialmente comprometida resultó en una gran cooperación, entrelazando las vidas de los cuatro físicos. Como recordó John Clauser años después: «En el proceso de redacción de este artículo, Abner, Mike y

yo forjamos una amistad duradera que daría lugar a muchas colaboraciones posteriores».

Tras doctorarse por la Universidad de Columbia, Clauser se trasladó a la Universidad de California en Berkeley para ocupar una plaza posdoctoral con el famoso físico Charles Townes, que compartió el premio Nobel por la invención del láser. El proyecto posdoctoral de Clauser pertenecía al campo de la radioastronomía, pero, como antes, todo lo que no fuera fundamentos de la mecánica cuántica despertaba en él poco interés. Y ahora, después de haber tenido la idea crucial para verificar la desigualdad de Bell, y con el éxito del artículo de CHSH, aún tenía menos paciencia para cualquier otra cosa. Clauser estaba listo para realizar el experimento real. El artículo de CHSH iba a marcar la pauta de este histórico experimento. Por suerte para John, Gene Commins todavía se encontraba en Berkeley. Clauser, así pues, se dirigió a Charles Townes y le preguntó si le importaría que pasara algún tiempo alejado de la radioastronomía intentando realizar el experimento de CHSH. Sorprendentemente, Townes accedió, e incluso le propuso que pasara la mitad de su tiempo en el proyecto. Commins estaba también contento de cooperar en un proyecto basado en su experimento anterior con Kocher, y ofreció a Clauser la ayuda de su propio estudiante de doctorado, Stuart Freedman. De regreso a Boston, Abner y Mike le desearon suerte.

Clauser y Freedman empezaron a preparar el aparato necesario para el experimento. Clauser presionaba a Freedman para que trabajara más duramente y más deprisa. Sabía que de vuelta en

Harvard, Richard Holt, su coautor en CHSH, estaba preparando su propio experimento. Freedman era un estudiante de doctorado de veinticinco años con poco interés en los fundamentos de la mecánica cuántica, pero que pensaba que ese experimento sería interesante. Clauser estaba desesperado por acabar el experimento; sabía que Holt y Pipkin iban progresando en Harvard y deseaba ser el primero en realizar el test de la validez de la teoría cuántica. En lo más profundo de su interior, apostaba contra la teoría cuántica, pues creía que era bastante probable que las variables ocultas de Einstein fueran verdaderas y que la mecánica cuántica errara en la cuestión del entrelazamiento de los fotones.

Antes, mientras aún trabajaba en solitario en el artículo en que diseñó el experimento, Clauser había escrito a Bell, Bohm y De Broglie, preguntándoles si sabían de algún experimento parecido y si creían que un experimento así sería importante. Todos habían contestado que no conocían experimentos de ese tipo en el pasado y pensaban que podría ser interesante proseguir con el diseño de Clauser. John Bell especialmente entusiasta; ésa era la primera vez que alguien le había escrito en respuesta a su artículo y a su teorema. Bell escribió a Clauser:³⁴

En vista del éxito general de la mecánica cuántica, me resulta muy difícil dudar del resultado de tales experimentos. No obstante, preferiría que estos experimentos, en los que se ponen muy directamente a

³⁴ Reproducido, con autorización, de J. Clauser, «Early history of Bell's theorem», charla invitada en la sesión plenaria de historia de la *Eight Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics*, 2001, p. 11.

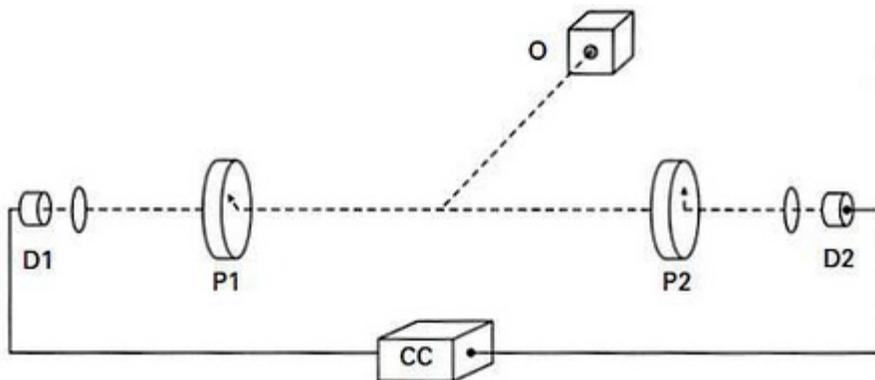
prueba los conceptos cruciales, se hicieran y se registrarán los resultados. ¡Además, siempre existe una pequeña probabilidad de un resultado inesperado, lo que convulsionaría a todo el mundo!

Como veremos, existe además un complicado proceso llamado «intercambio de entrelazamiento» (*entanglement swapping*), en el que dos partículas entrelazadas intercambian sus parejas. En cierto sentido, eso es lo que le pasó a la gente en este gran drama científico puesto en escena en Estados Unidos. En 1969 Shimony y Horne se entrelazaron con Holt, quien iba a llevar a cabo un experimento de acuerdo con sus especificaciones. Cuando descubrieron el trabajo de Clauser, usaron el hecho de que Holt iba a realizar dicho experimento, y, de resultados de eso, Clauser se entrelazó con *ellos*. Los cuatro escribieron el fundamental artículo CHSH proponiendo un importante experimento, y Richard Holt se desentrelazó de los otros y pasó a realizar su propio experimento. Quizás sea ésa la razón de que, al rememorar las relaciones entre ellos muchos años después, Clauser mencionara a Horne y Shimony, pero no a Holt.

El trabajo en la realización de los experimentos prosiguió. El entusiasmo de Bell y la ayuda y cooperación de los nuevos amigos de Clauser en Boston animaron a éste en su investigación. ¿Se violarían las desigualdades de Bell, probándose entonces la teoría cuántica, o serían Einstein y sus colegas los ganadores y el realismo local la respuesta? Clauser, que creía en Einstein y en el realismo

local, hizo una apuesta con Yakir Aharonov, del Technion en Haifa, Israel, de dos a uno en contra de la teoría cuántica. Shimony mantenía una actitud abierta; esperaría a ver cuál era la teoría correcta. Horne creía que prevalecería la mecánica cuántica. Se apoyaba en el gran éxito de la teoría cuántica en el pasado: nunca dejó de proporcionar predicciones extremadamente precisas en una amplia variedad de situaciones.

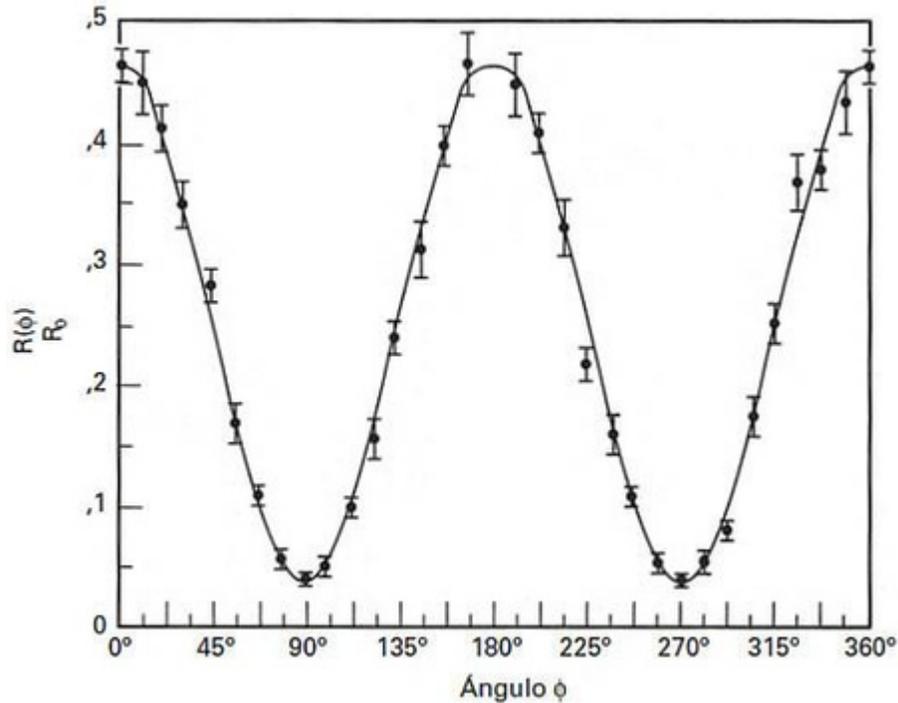
Clauser y Friedman construyeron una fuente de fotones en la que se excitaban átomos de calcio hasta niveles superiores. Generalmente, cuando el electrón en el átomo de calcio desciende a su nivel normal emite un solo fotón. Pero existe una pequeña probabilidad de que se produzcan dos fotones, uno verde y el otro violeta. Los fotones verde y violeta así producidos están correlacionados. El diseño experimental usado por Clauser y Freedman se muestra en la figura siguiente. Los pares de fotones producidos por la cascada atómica se dirigen hacia los polarizadores P_1 y P_2 , dispuestos a diferentes ángulos; a continuación los fotones que atraviesan los polarizadores son detectados por dos detectores, D_1 y D_2 ; y, finalmente, un contador de coincidencias, CC, registra los resultados.



La señal luminosa usada en el experimento era débil, y había muchas cascadas espurias que producían fotones no-correlacionados. De hecho, por cada millón de pares de fotones, sólo un par se detectaba en coincidencia. Posteriormente, este defecto se denominaría «detection loophole» («escapatoria de la detección»), y sería necesario atacar el problema que planteaba. Debido a ese bajo número de cuentas, a Clauser y Freedman les llevó más de doscientas horas de experimentación obtener un resultado significativo. Pero su resultado final apoyaba fuertemente la teoría cuántica y contrariaba el realismo local de Einstein y las teorías de variables ocultas. El resultado de Clauser y Freedman era estadísticamente muy significativo. La mecánica cuántica derrotaba a las variables ocultas por más de cinco desviaciones estándar. Es decir, el valor medido de S (la cantidad usada en la desigualdad de Bell) estaba de acuerdo con la predicción de la mecánica cuántica y sobrepasaba el límite de 2, permitido en la desigualdad, en más de cinco veces la desviación estándar de los datos experimentales.

El experimento de Clauser-Freedman proporcionó la primera confirmación definitiva de que la mecánica cuántica es intrínsecamente no-local. El realismo de Einstein estaba acabado; la mecánica cuántica no contenía ninguna «variable oculta». El experimento constituyó la base de la tesis doctoral de Freedman.

Clauser y Freedman publicaron los resultados de su experimento en 1972. La figura siguiente muestra dichos resultados.³⁵



El experimento de Freedman y Clauser dejaba algunas cuestiones sin responder. En particular, el diseño experimental creaba un gran número de fotones *inobservados*, producidos para obtener los pares entrelazados. Asimismo, los detectores usados eran de baja eficacia, y se planteó el interrogante de hasta qué punto esa eficacia limitada podría afectar a las conclusiones. Clauser y Freedman habían hecho un magnífico trabajo; habían suministrado las primeras pruebas a favor de la mecánica cuántica y en contra de las variables ocultas. Consiguieron esos resultados usando la mejor tecnología entonces disponible, pero ésta no era perfecta. Irónicamente, Clauser estaba

³⁵ La línea continua representa la predicción de la mecánica cuántica. (*N. del t.*)

trabajando para Townes (que había inventado los láser) con un contrato posdoctoral, pero no podía usar láser en su experimento con Freedman puesto que aún no se sabía cómo hacerlo. Los láser les podrían haber ayudado al permitirles producir pares de fotones entrelazados con más rapidez.

Mientras tanto, de vuelta en Harvard, también Holt y Pipkin habían obtenido resultados. Pero éstos eran acordes con Einstein y el realismo local y con las variables ocultas, e iban en contra de la mecánica cuántica. Puesto que los dos creían en la teoría cuántica, decidieron no publicar sus resultados y, en su lugar, esperar a que el equipo de Berkeley publicara los suyos para ver lo que habían obtenido.

El experimento de Holt y Pipkin en Harvard usaba un isótopo del mercurio (mercurio 200) que presenta una cascada parecida al ser bombardeado por una corriente de electrones. Dicho experimento duró 150 horas, porque también sufría la pérdida de muchos fotones. Cuando vieron los resultados de Clauser y Freedman, decidieron no publicar los suyos en una revista. En lugar de ello, en 1973, distribuyeron un informe informal de sus resultados experimentales entre varios físicos. Más tarde, después de que otros obtuvieran resultados que también apoyaban la mecánica cuántica, Holt y Pipkin concluyeron que su experimento adolecía de algún error sistemático.

Aunque ya no trabajaba en radioastronomía con el famoso Charles Townes, Clauser se las arregló para permanecer en Berkeley como miembro del grupo de haces atómicos liderado por Howard Shugart,

lo que le permitió seguir con su trabajo. Y Clauser, siempre un cuidadoso experimentador, decidió examinar de nuevo los resultados de sus competidores y tratar de reproducirlos; le intrigaban esos resultados contrarios a los suyos y deseaba encontrar la razón del desacuerdo. Hizo sólo modificaciones sin importancia al montaje experimental usado por Holt y Pipkin y usó un isótopo de mercurio distinto (mercurio 202) para la cascada atómica. Sus resultados, publicados en 1976, de nuevo eran acordes con la teoría cuántica y contrarios a las teorías de variables ocultas.

El mismo año, en la universidad de Texas A & M, Ed S. Fry y Randal C. Thompson realizaron un experimento con mercurio 200, pero usando un diseño muy perfeccionado. Como Fry y Thompson excitaban sus átomos con un láser, su señal luminosa era varios órdenes de magnitud más potente que las señales conseguidas por los experimentadores que hicieron un trabajo similar antes que ellos. Fry y Thompson lograron tener sus resultados en sólo ochenta minutos de experimentación. Dichos resultados iban a favor de la mecánica cuántica y en contra de la hipótesis de variables ocultas.

En 1978 Shimony estuvo en la Universidad de Ginebra. Durante ese año escribió en colaboración con Clauser un artículo sobre el entrelazamiento (precisando sus puntos de vista por teléfono) que resumía todo lo que se conocía hasta entonces sobre ese extraño fenómeno. El artículo discutía en profundidad todos los hallazgos experimentales sobre el entrelazamiento realizados hasta ese año y aseguraba que el fenómeno es real. Además de los experimentos ya

mencionados, se incluían resultados sobre el teorema de Bell debidos a otros tres equipos que realizaron experimentos en los años setenta.

Uno de ellos era un grupo dirigido por G. Faraci, de la Universidad de Catania, en Italia. Este grupo, que publicó en 1974, usó fotones de alta energía (rayos gamma) de la aniquilación del positronio (cuando un electrón y un positrón se aniquilan mutuamente). Horne, Shimony y Clauser habían decidido no realizar un experimento tipo Bell con pares de fotones de la aniquilación del positronio, pero el grupo de Catania fue capaz de usar esta clase de datos haciendo una hipótesis técnica adicional semejante a la que antes habían hecho Kasday, Ullman y Wu. Las dudas acerca de dicha hipótesis son responsables de la relativa negligencia de esos resultados experimentales.

Otro grupo, formado por Kasday, Ullman y Wu, de la Universidad de Columbia, que publicó en 1975, también usó fotones provenientes de la aniquilación del positronio. Y en 1976, M. Laméhi-Rachti y W. Mittig, del Centro de Investigación Nuclear de Saclay (Francia), usaron pares de protones correlacionados en el estado singlete. Los resultados de estos grupos estaban de acuerdo con la mecánica cuántica y en contra de la alternativa de las variables ocultas.

Siguiendo el éxito en probar la validez de la teoría cuántica, también se mejoraron otros argumentos teóricos. Esto resulta habitual en la ciencia: cuando avanza la teoría, los experimentos no se quedan rezagados, y cuando éstos avanzan, la teoría que los explica también avanza. Cuando uno se mueve hacia adelante, el otro no

permanece lejos, y una vez que alcanza al primero se refuerza la simbiosis. Bell, Clauser y Horne fortalecieron los argumentos teóricos para poner a prueba la realidad local de Einstein. Demostraron una desigualdad verificable, usando la hipótesis de una teoría estocástica (regida por la probabilidad), no determinista, de variables ocultas. Estos avances paralelos en física fundamental, que giraban todos en torno a su importante teorema, llevaron a John Bell a la discusión. Clauser, Horne y Shimony se embarcaron en un intercambio de ideas con Bell que continuó durante varios años.

Aunque, salvo uno, todos los experimentos llevados a cabo en los años setenta proporcionaron buena confirmación de la validez de la teoría cuántica, quedaría para otro científico, lejos de Estados Unidos, proporcionar un test incluso mejor de la desigualdad de Bell usando tecnología láser y un diseño muy perfeccionado que cerraría una importante escapatoria (*loophole*) para las variables ocultas y de este modo presentaría una prueba más completa de la misteriosa naturaleza no-local del universo.

Para poner realmente a prueba el aserto de Einstein contra la mecánica cuántica, un científico necesitaría tener en cuenta la posibilidad —por remota y contraria al sentido común que pueda parecer— de que, de alguna manera, los analizadores de polarización situados en extremos opuestos del laboratorio puedan intercambiarse señales. Este problema sería abordado por Alain Aspect.

Abner soñó en una ocasión que oía una conferencia de Alain Aspect en la que éste preguntaba si existe un algoritmo —un procedimiento mecánico de decisión— para decidir si un estado dado de dos partículas es entrelazado o no. Abner le planteó esta pregunta a Wayne Myrvold, un experto en computabilidad en mecánica cuántica, a quien el departamento de filosofía de la Universidad de Boston le acababa de aceptar la tesis doctoral. Myrvold resolvió el problema en dos semanas. Su respuesta a la cuestión de Aspect en el sueño de Shimony era que tal algoritmo no es matemáticamente posible.

Capítulo 15

Alain Aspect

Bohr tenía la intuición de que la postura de Einstein, tomada en serio, estaría en conflicto con la mecánica cuántica. Pero fue el teorema de Bell lo que materializó esa contradicción.

ALAIN ASPECT

Alain Aspect nació en 1947 en un pueblecito del suroeste de Francia, no lejos de Burdeos y el Perigord, una región en la que la buena comida y los excelentes caldos forman parte de la cultura. Hasta hoy, Aspect sigue elaborando su propio paté y mantiene el corazón sano bebiendo los famosos tintos de la región. Alain se considera una prueba viviente de lo que se ha dado en llamar «la paradoja francesa»: el que los franceses puedan hacer comidas pesadas y, no obstante, disfruten de buena salud cardiovascular gracias a beber con regularidad vino tinto.

Alain sintió desde niño interés por la ciencia, sobre todo por la física y la astronomía. Le encantaba mirar las estrellas, y leía los libros de Julio Verne, de quien le gustaba especialmente *Veinte mil leguas de viaje submarino*. Siempre supo que llegaría a ser un científico.

Alain se trasladó a la ciudad más próxima para ir a la escuela y tras finalizar el bachillerato se fue a otra ciudad mayor, Burdeos, a fin de

prepararse para los exámenes de ingreso en las mejores escuelas de Francia, las renombradas *Grandes Ecoles*. Tuvo éxito en los exámenes y se marchó a la mayor de todas las ciudades francesas y uno de los mayores centros intelectuales y académicos de Europa: París. A los veinticuatro años, Aspect obtuvo la licenciatura, a la que llama «mi pequeño doctorado», y antes de continuar los estudios para su «gran doctorado» se tomó unos años de «permiso» para hacer el voluntariado social en África. Así que en 1971 se marchó al Camerún.

Durante tres años, bajo el ardiente sol africano, Alain Aspect trabajó duramente ayudando a la gente a vivir mejor en condiciones adversas. Pero pasaba su tiempo libre leyendo y estudiando uno de los libros más completos y profundos sobre teoría cuántica jamás escritos: *Mecánica cuántica*, de Cohen-Tannoudji, Diu y Laloë. Alain se sumergió en el estudio de la extraña física de lo muy pequeño. Durante su licenciatura había estudiado mecánica cuántica, pero nunca había entendido del todo la física, puesto que en los cursos que siguió se insistía sólo en las ecuaciones diferenciales y demás maquinaria matemática que se utiliza en la física avanzada. Allí, en el corazón de África, los conceptos físicos en sí mismos se hacían realidad para el joven científico. Aspect empezó a comprender algo de la magia cuántica que impregna el mundo de lo muy pequeño. Pero de todos los extraños aspectos de la teoría cuántica, uno cautivó su atención más que el resto. Era la vieja (de varias décadas) propuesta de Einstein, Podolsky y Rosen lo que estaba tomando un significado especial para él.

Aspect leyó el artículo de John Bell, entonces un oscuro físico que trabajaba en el Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN) en Ginebra. Y el artículo le causó un profundo efecto: decidió dedicar todos sus esfuerzos a estudiar las inesperadas implicaciones del curioso teorema de Bell. Esto le llevaría a explorar los misterios más profundos de la naturaleza. En eso, Alain Aspect se parece a Anner Shimony. Ambos tienen una profunda —aunque natural e intuitiva— comprensión de la mecánica cuántica. Aunque separados entre sí por el Atlántico, ambos poseen de alguna manera una capacidad, compartida con el difunto John Bell, de entender verdades que se le habían escapado a Albert Einstein.

Como Shimony, Aspect siempre se remonta al origen de un concepto o de un tema. Si desea entender el entrelazamiento, lee directamente a Schrödinger y no un análisis propuesto por algún físico posterior. Y si desea entender las objeciones de Einstein a la naciente teoría cuántica, busca y lee los artículos originales de Einstein de los años veinte y treinta. Pero sorprendentemente, excluyendo el hecho de que Shimony tuvo un sueño en el que vio a Aspect pronunciando una conferencia, lo cual le condujo a formular una importante cuestión, las vidas de uno y otro no están entrelazadas. Shimony es un entusiasta, una persona cuyo entusiasmo tiende a desparramarse entre quienes le rodean (Horne, Clauser, Greenberger, Zeilinger), impulsándolos a mayores logros y descubrimientos; en cambio, Aspect trabaja de otra manera.

Tras regresar de África, Aspect se dedicó a un detallado estudio de la teoría cuántica en su país natal. De hecho, Francia era —y sigue

siendo— un importante centro de la física a escala mundial. Se encontró entonces en medio de un grupo de importantes físicos consagrados, de quienes podía aprender mucho y con quienes podía discutir sus ideas. Los nombres de los miembros de su tribunal de tesis eran como un *Who's Who* de la ciencia francesa: A. Marechal, C. Cohen Tannoudji (que sería después premio Nobel), B. D'Espagnat, C. Imbert, F. Laloé. Había un único miembro no francés en el tribunal: el propio John Bell.

Como Shimony al otro lado del Atlántico, Aspect entendía el teorema de Bell mejor que la mayoría de los físicos. Enseguida se dio cuenta del desafío que el remarcable teorema de Bell lanzaba a la física y al entendimiento de Einstein de la ciencia. Desde el punto de vista de Aspect, la esencia de la discusión entre Bohr y Einstein residía en la convicción de éste de que: «Debemos abandonar uno de los dos siguientes asertos: 1. La descripción estadística de la función de ondas es completa; 2. Los estados reales de dos objetos separados espacialmente son independientes entre sí». ³⁶

Aspect entendió rápidamente que era esta afirmación de Einstein, ya formulada así en el artículo de EPR en 1935, lo que abordaba el teorema de Bell de manera tan sucinta y elegante. Usando el dispositivo (ideal) de EPR, Bell ofrecía un marco real para contrastar la hipótesis de que la teoría cuántica era incompleta frente a la de que era ciertamente completa pero que incluía claramente elementos no-locales.

³⁶ Alain Aspect, *Trois tests experimentaux des inégalités de Bell par mesure de corrélation de polarization de photons*, tesis para obtener el grado de doctor en ciencias físicas, Universidad de París, Orsay, 1983.

El teorema de Bell atañe a una clase muy general de teorías *locales* con parámetros ocultos o suplementarios. La hipótesis es la siguiente: supongamos que la teoría cuántica es incompleta pero que se preservan las ideas de Einstein sobre la localidad. Debemos entonces suponer que tiene que haber un modo de *completar* la descripción cuántica del mundo, manteniendo el requisito de Einstein de que lo que se observa *aquí* no puede afectar a lo que se observe *allí*, salvo que pueda enviarse una señal de aquí a allí (*y esa señal no podría ir más deprisa que la luz debido a la teoría de la relatividad*). En tal situación, hacer completa la teoría significa descubrir las variables ocultas y describir las variables que *hacen* que los fotones y las partículas se comporten de una manera determinada. Einstein había conjeturado que las correlaciones entre partículas distantes se deben a que su preparación común las dota con variables ocultas que actúan localmente. Dichas variables ocultas son como hojas de preparación, y las partículas al seguir sus instrucciones, sin correlaciones directas entre ellas, manifiestan un comportamiento correlacionado. Si el universo es de naturaleza *local* (esto es, si no hay posibilidad de comunicación superlumínica o, en otras palabras, el mundo es como Einstein lo veía), la información necesaria para completar la teoría cuántica debe llegar a través de algunas variables ocultas preprogramadas.

Bell había demostrado que una teoría de tales variables ocultas no sería capaz de reproducir todas las predicciones de la mecánica cuántica, en particular las relacionadas con el entrelazamiento en la versión de Bohm del experimento de EPR. El conflicto entre una

teoría cuántica completa y un universo de variables locales se convierte en choque a través de la desigualdad de Bell.

Aspect entendía el punto clave. Sabía que la teoría cuántica había tenido ya entonces un tremendo éxito como una herramienta predictiva en ciencia. Él, por consiguiente, tenía la impresión de que el conflicto antes mencionado, inherente al teorema de Bell y sus desigualdades acompañantes, podría usarse, por el contrario, para derrotar a todas las teorías de variables ocultas. Así pues, contrariamente a Clauser, que antes de su experimento apostó que la teoría cuántica sería derrotada y la localidad ganaría la contienda, Aspect se dispuso a diseñar sus propios experimentos creyendo que la teoría cuántica saldría victoriosa y la localidad derrotada. Si su proyectado experimento tuviera éxito, meditaba, la no-localidad se establecería como un fenómeno real en el mundo cuántico, y la teoría cuántica repelería el ataque sobre su completitud. Es importante observar, sin embargo, que, fuesen cuales fuesen las inclinaciones que Clauser y Aspect pudieran tener en lo referente a los resultados esperados de sus respectivos experimentos, los dos diseñaron el suyo de manera que la naturaleza pudiera hablar sin ninguna inclinación preexistente hacia uno u otro lado.

Aspect era plenamente consciente de que el teorema de Bell, prácticamente ignorado cuando apareció hacia mediados de los años sesenta, se había convertido en una herramienta para sondear los fundamentos de la teoría cuántica. En particular, sabía de los experimentos de Clauser en California y de la implicación en ellos

de Shimony y Horne en Boston. Conocía asimismo varios experimentos sin resultados concluyentes.

Se dio cuenta, como afirmó después en su tesis y artículos posteriores, de que el montaje experimental empleado por los físicos previamente a su trabajo era difícil de usar. Cualquier imperfección del diseño experimental tendía a destruir la delicada estructura que habría puesto de manifiesto el deseado conflicto entre las desigualdades de Bell y las predicciones cuánticas.

Los experimentadores buscaban resultados muy difíciles de producir. La razón de ello es que el entrelazamiento es una condición difícil de crear, mantener y medir de forma eficaz. Y para probar una violación de la desigualdad de Bell, lo que demostraría las predicciones cuánticas, el diseño experimental debía elaborarse con mucho cuidado. La intención de Aspect era producir un dispositivo experimental superior, que esperaba le permitiera reproducir la versión de Bohm del experimento ideal de EPR lo más fielmente posible y que le permitiera medir las correlaciones en sus datos para las que la mecánica cuántica predice una violación de las desigualdades de Bell.

Aspect se puso manos a la obra. Construyó él mismo todas las piezas del equipo, trabajando en el sótano del Centro de Investigaciones Ópticas de la Universidad de París, donde le habían proporcionado acceso a espacio y aparatos. Construyó su fuente de fotones correlacionados y montó el dispositivo de espejos, analizadores de polarización y detectores. Consideró cuidadosamente el experimento ideal de EPR. En la versión

propuesta por David Bohm, el fenómeno en cuestión es más simple y puede aplicarse el teorema de Bell: los espines o polarizaciones de las dos partículas están correlacionados. Por el contrario, el marco de momento y posición de Einstein resulta más complicado, porque estas dos magnitudes físicas tienen un continuo de valores y el teorema de Bell no es directamente aplicable. Después de meditar largo tiempo sobre el problema, Aspect llegó a la conclusión de que la mejor manera de poner a prueba el rompecabezas de EPR sería usando fotones ópticos, como se había hecho en los mejores experimentos anteriores.

La idea, seguida previamente por Clauser y Friedman, así como por sus colegas en Boston Shimony, Horne y Holt, era medir la polarización de los fotones emitidos en pares correlacionados. Aspect sabía que en Estados Unidos se habían efectuado varios experimentos de ese tipo entre 1972 y 1976. El más reciente de ellos con resultados que apoyaban la mecánica cuántica, realizado por Fry y Thompson, se hizo usando un láser para excitar los átomos.

Aspect decidió llevar a cabo una serie de tres experimentos principales. El primero consistía en un diseño de canal simple dirigido a reproducir los resultados de sus predecesores de una manera más precisa y convincente. Usaría la misma cascada radiactiva del calcio, en la que los átomos excitados emiten fotones en pares correlacionados. Después, realizaría un experimento con dos canales, como habían propuesto Clauser y Horne para acercarse a un experimento ideal. Si sólo hay un canal, los fotones que no entran en él pueden hacer esto (no entrar) por dos razones: o

bien llegan al analizador de polarización pero no pueden atravesarlo porque tienen la «mala» polarización, o bien no llegan a entrar en el analizador. Con dos canales se puede limitar la atención a las partículas que se detectan; todas ellas deben haber llegado a la apertura de entrada, y salido a través de uno u otro canal. Tal metodología ayuda a cerrar la escapatoria de la detección (*detection loophole*). Finalmente, Aspect realizaría un experimento sugerido por Bohm y Aharonov en 1957 y descrito claramente por John Bell. En él, la dirección de polarización de los analizadores se establecería *después* de que los fotones hubieran salido de su fuente y estuvieran en vuelo. Éste es un tipo de diseño en el que los experimentadores actúan como abogados del diablo. De alguna manera, el experimentador se pregunta: «¿qué pasa si un fotón o su analizador *envía un mensaje* al otro fotón o a su analizador, informando a la otra parte de la orientación del analizador, de tal modo que el segundo fotón pueda ajustarse convenientemente a sí mismo?». Para evitar tal intercambio de información, el experimentador escoge la orientación que va a usar en su diseño *aleatoriamente* y a la vez *con retardo*. Así pues, Aspect iba tras un test más definitivo de la desigualdad de Bell, un test cuyos resultados no pudieran ser puestos en duda por alguien que piense que los analizadores de fotones se comunican entre sí para engañar al experimentador. Debe observarse que, en el marco de la física, la comunicación puede que no sea una noción tan extraña, y el intento de engañar al experimentador está ausente de este marco. Lo que preocupa a los físicos es que en un sistema físico que haya

alcanzado algún nivel de equilibrio la comunicación mediante luz o calor pueda transferir efectos de una a otra parte del sistema.

En el experimento real, Aspect tuvo que recurrir a una señal que era periódica, y no perfectamente aleatoria; no obstante, la señal fue enviada a los analizadores después de que los fotones se encontraran en vuelo. Éste es, esencialmente, el elemento nuevo e importante de sus experimentos.

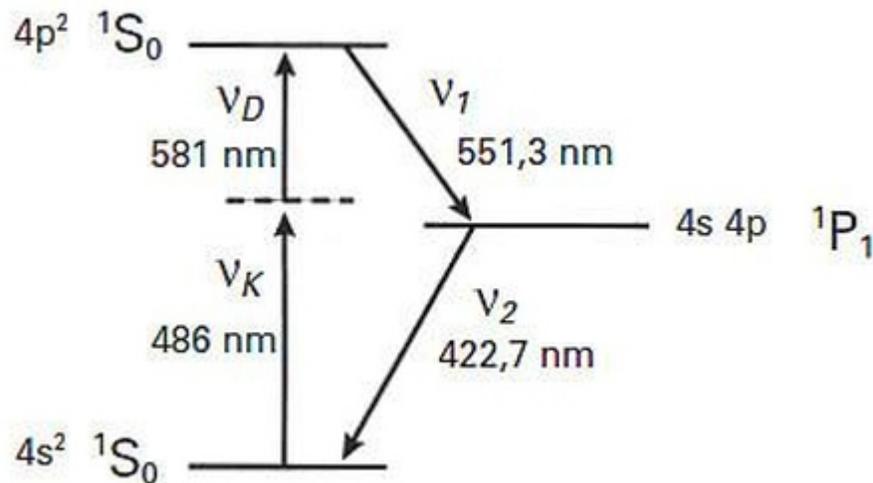
El dispositivo de Aspect de dos canales, pero sin conmutación «aleatoria», se muestra en la figura siguiente (reproducida de su tesis con su permiso).



Puesto que Alain sabía que la desigualdad de Bell ya había sido empleada para determinar cuál de las dos ramas de la alternativa — mecánica cuántica o realismo local— era verdadera, fue a Ginebra a visitar a John Bell. Le dijo que estaba planeando un experimento en el cual incorporaría un principio dinámico de polarizadores variables (su dirección de polarización) con el tiempo con el fin de poner a prueba la separabilidad de Einstein, como el propio Bell había sugerido en su artículo. Bell lo miró y le preguntó: «¿Tienes un puesto permanente?», a lo cual él respondió que tan sólo era un estudiante graduado. Bell se quedó entonces pasmado. «Debes de ser un estudiante muy valiente...», masculló.

Aspect comenzó sus experimentos, usando un haz atómico de calcio como fuente de fotones correlacionados. Los átomos se excitaban mediante un láser. Éste hacía que un electrón en cada átomo subiera dos niveles de energía desde su estado fundamental (como

se había hecho en experimentos previos). Cuando el electrón descendía dos niveles, emitía a veces un par de fotones correlacionados. Los niveles de energía y los fotones entrelazados producidos por el método de la cascada atómica se muestran en la siguiente figura.



La tasa de coincidencias del experimento (el ritmo al que se detectaban y medían pares correlacionados) era varios órdenes de magnitud mayor que la obtenida por los predecesores de Aspect. Los experimentos con un polarizador de canal simple produjeron excelentes resultados. La desigualdad de Bell se violaba por nueve desviaciones estándar. Esto quiere decir que prevalecía la teoría cuántica, no había ninguna posibilidad de variables ocultas y se infería que existía la no-localidad para esos fotones entrelazados —respondían instantáneamente el uno al otro—, con una probabilidad inmensamente pequeña de que estas conclusiones estuvieran

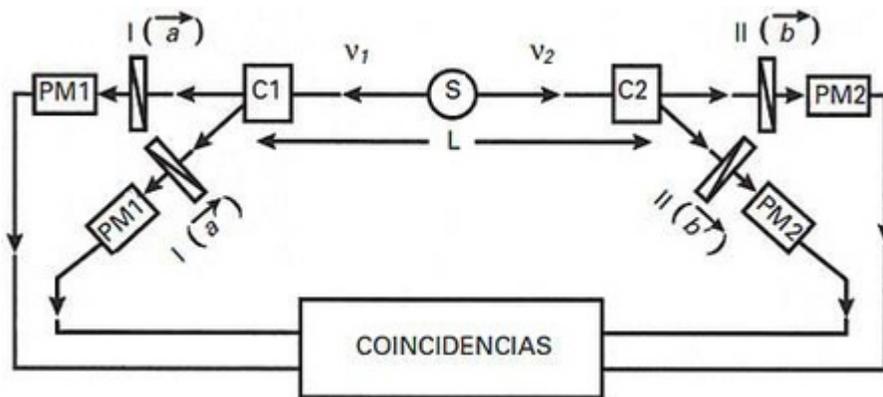
equivocadas. Este resultado era muy potente. Seguidamente, Aspect realizó sus experimentos de dos canales.

Cuando un fotón es bloqueado por el polarizador en un diseño de canal simple, dicho fotón se pierde y no hay manera de determinar si (y cómo) estaba correlacionado con algún otro fotón. Ésa es la razón para usar dos canales. Lo que ocurre entonces es que, si un fotón es bloqueado por el polarizador, éste lo refleja y aún puede medirse. Ello aumenta la tasa de coincidencias del test global y hace que el experimento sea mucho más preciso. Con este esquema de medición tan mejorado, los resultados obtenidos por Aspect fueron más precisos y convincentes todavía. La desigualdad de Bell se violaba por más de cuarenta desviaciones estándar. La evidencia a favor de la mecánica cuántica y la no-localidad era impresionante y superaba todo lo esperado.

Después vino el test definitivo de la no-localidad, un test de si un fotón aún podría enviar una señal al otro, frente a la alternativa mecánico-cuántica de que prevalece la no-localidad y que los fotones —sin ser capaces de enviarse señales entre sí— reaccionan instantáneamente a la situación del «compañero». Aspect diseñó polarizadores cuya dirección en el espacio podía cambiarse a tal velocidad que el cambio se realiza *mientras los dos fotones están en vuelo*. Esto se logró del modo siguiente: en cada lado del experimento había dos analizadores de polarización con diferentes orientaciones. Ambos estaban conectados a un conmutador que podía determinar rápidamente a cuál de los dos analizadores enviar cada fotón y, por tanto, cuál de las dos posibles orientaciones

encontraría dicho fotón. De hecho, debido a esta innovación, este experimento fue el más importante de los de Aspect y el que ha sido ampliamente considerado como el test definitivo de la no-localidad.

En la figura siguiente se muestra el montaje experimental del tercer conjunto de experimentos de Aspect, con la conmutación entre los analizadores mientras los pares de fotones se hallaban todavía en vuelo.



Al explicar el diseño de este tercer conjunto de experimentos, Aspect citó una importante declaración de Bell: «Los montajes de los instrumentos se hacen con suficiente antelación como para permitirles llegar a tener cierta relación mutua mediante el intercambio de señales con velocidad igual o menor que la de la luz. En tal caso, el resultado en el polarizador I podría depender de la orientación, b , del polarizador remoto II, y viceversa; entonces no se cumpliría la condición de localidad y ésta no podría ponerse a prueba». Los científicos son muy cuidadosos en este punto. Actúan como abogados del diablo, contemplando la posibilidad de que polarizadores y fotones interactúen entre sí y proporcionen

resultados coherentes con la realidad local. En cualquier caso, cuando en el experimento los polarizadores son fijos, no se impone la condición de localidad y entonces, en el sentido más estricto, no es posible poner a prueba la idea de EPR, que exige realismo local, frente a la teoría cuántica mediante el teorema de Bell.

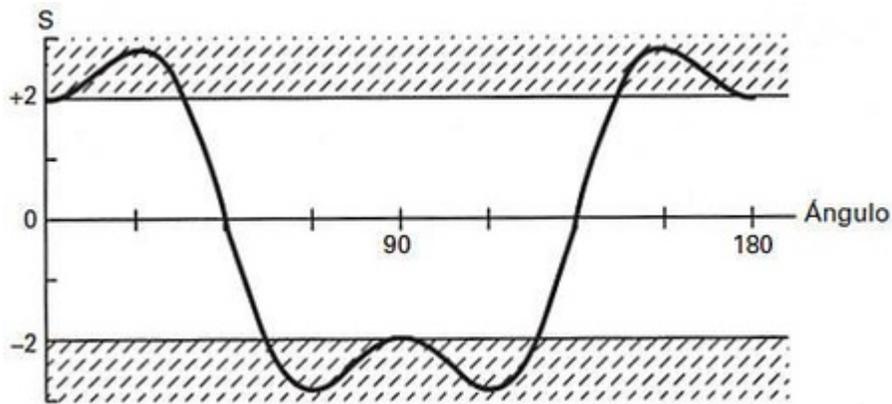
En el laboratorio de Aspect, cada uno de los polarizadores fue colocado a una distancia de 6,5 metros de la fuente. La distancia entre los polarizadores (véase la figura anterior) era de 13 metros. Así que, a fin de resolver el problema y permitir un test objetivo de la «causalidad einsteniana», es decir, un test en el cual los fotones y los polarizadores no puedan «engañar al experimentador» enviándose señales entre sí, Aspect tuvo que diseñar una manera experimental de *conmutar* el polarizador I entre sus dos orientaciones a y a' y el polarizador II entre sus dos orientaciones b y b' en un intervalo temporal que era menor que 13 metros dividido por la velocidad de la luz (unos 300 millones de metros por segundo), lo que es alrededor de $4,3 \times 10^{-8}$ segundos (43 nanosegundos). Aspect logró hacerlo y construyó un dispositivo capaz de responder a velocidades tan increíbles.

En el montaje experimental mostrado en el diagrama del experimento de Aspect, se consigue la conmutación en menos de 43 nanosegundos. Dicha conmutación se hace mediante un dispositivo óptico-acústico en el cual la luz interactúa con una onda de ultrasonido estacionaria en agua. Cuando la onda cambia en el contenedor de agua transparente, el haz luminoso incidente sobre el agua se desvía de una orientación del polarizador a la otra. De

hecho, la conmutación se realizaba a intervalos de 6,7 y 13,3 nanosegundos, bastante por debajo del máximo de 43 nanosegundos.

El tercer conjunto de experimentos de Aspect también tuvo éxito, y la localidad y las variables ocultas fueron de nuevo derrotadas a favor de la mecánica cuántica. Aspect señaló que le habría gustado tener un montaje experimental en el que no sólo se cambiasen las orientaciones de los polarizadores mientras los fotones están en vuelo, sino que también la conmutación se realizase aleatoriamente. Su diseño no proporcionaba aleatoriedad, sino más bien un cambio cíclico de las orientaciones. De modo que, como ha señalado Anton Zeilinger, un grupo de fotones y detectores extremadamente «listos» podría, en principio, «aprender» el patrón del dispositivo y tratar así de engañar al experimentador. Por supuesto, eso sería sumamente improbable. En cualquier caso, el tercer conjunto de experimentos de Aspect contenía un componente dinámico inmensamente importante, que se añadió a la potencia de su conjunto completo de resultados positivos para la mecánica cuántica y ayudó a establecer el entrelazamiento no-local como un fenómeno real.

La figura siguiente muestra, en el área sombreada, la región en la cual fracasa la localidad de Einstein en los experimentos.



En los años siguientes, mientras trabajaba en el Centro de Óptica de la Universidad de París en Orsay, Aspect siguió realizando otros importantes experimentos en física cuántica. Recordando sus innovadores experimentos de los años ochenta, decía: «Estoy también orgulloso de que, aparte de realizar mis experimentos, mi trabajo llamara la atención sobre el teorema de Bell. Cuando hice el trabajo, ése no era un campo popular».

Capítulo 16

Cañones láser

[La interferencia ocurre porque] un fotón debe haber venido de una fuente y el otro de la otra, pero no podemos distinguir cuál vino de cuál.

LEONARD MANDEL

Siguiendo el tremendo triunfo de los experimentos de Aspect, que demostraron definitivamente (para la mayoría de los físicos) la realidad del entrelazamiento, el estudio del fenómeno progresó. Mientras que Alain Aspect y sus colegas en Orsay, así como otros investigadores que habían realizado experimentos anteriores, usaban el método de la cascada atómica para producir estados entrelazados, justo antes de que concluyeran estos experimentos, a principios de la década de 1980, los físicos experimentales comenzaron a usar otro método. Este método, que todavía hoy es la técnica preferida para producir fotones entrelazados, se llama *conversión paramétrica espontánea a la baja* («spontaneous parametric down-conversion»), abreviadamente SPDC.

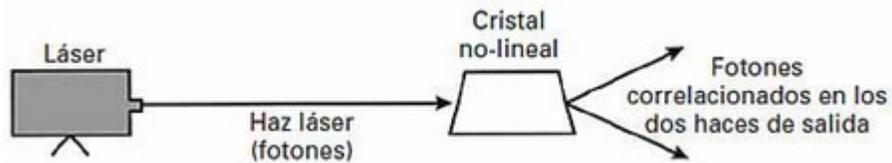
Imaginemos un cristal transparente encima de una mesa iluminado de alguna manera. Al principio, sólo se ve la luz que atraviesa el cristal iluminando el otro lado. Pero cuando la intensidad luminosa crece, aparece de pronto un efecto adicional: un halo pálido que

rodea el cristal. Cuando se mira más de cerca, se observa que el débil halo resplandece con todos los colores del arco iris. Este bello fenómeno se debe a un fenómeno físico interesante. Resulta que, aunque la mayor parte de la luz que incide sobre el cristal lo atraviesa directamente, un pequeño porcentaje de esa luz no lo hace. Esta minoría de fotones sufre una extraña transformación: cada fotón que no atraviesa directamente el cristal «se fragmenta» en dos fotones; es decir, cada uno de esos fotones interactúa con la red cristalina, de un modo que la ciencia aún no entiende del todo, y esta interacción da lugar a un par de fotones. Cuando el fotón sufre esa transformación, la suma de las frecuencias de los dos fotones resultantes es igual a la frecuencia del fotón original. Los fotones de un par así producido están entrelazados.

En el método de conversión a la baja de producir fotones entrelazados, los científicos usan un láser para «bañar a chorro» el cristal con luz. Los cristales que se emplean para tal propósito son unos especiales que poseen esa propiedad de generar pares de fotones. Entre los cristales que pueden usarse figuran el yodato de litio y el borato de bario. Estos cristales se conocen como *cristales no-lineales*, porque cuando se excitan los átomos de la red cristalina, la energía resultante que sale de la red viene descrita por una ecuación que contiene un término no-lineal (cuadrático). El método de conversión a la baja fue usado por los físicos desde 1970. Ese año, D. C. Burnham y D. L. Weinberg descubrieron el fenómeno al examinar la naturaleza de la luz secundaria producida cuando pasaba luz láser intensa a través de un cristal no-lineal y éste de

repente parecía inmerso en un débil arco iris. Estos científicos descubrieron que la mayor parte de la luz atravesaba el cristal, pero que alrededor de un fotón entre cien mil millones originaba dos fotones. Como la suma de las frecuencias de los dos fotones resultantes es igual a la frecuencia del fotón original (lo que quiere decir que cada uno de ellos ha bajado en frecuencia), los físicos llamaron a este proceso *conversión a la baja* («down conversion»). Un simple fotón se convertía en un par de fotones con frecuencias más bajas. Sin embargo, esos investigadores no se dieron cuenta de que los dos fotones así producidos estaban de hecho entrelazados, y que habían descubierto un modo adecuado de producir fotones entrelazados. Estos pares de fotones están entrelazados no sólo en su *polarización* sino también en su *dirección*, lo que resulta útil en estudios que involucran interferencia de dos fotones.

Los científicos que experimentaban con el entrelazamiento usando el método más antiguo de la cascada atómica habían observado que había una escapatoria (para las variables ocultas) en la eficacia de «recogida» de los fotones. Este defecto es debido al retroceso atómico. Cuando los átomos retroceden (al emitir fotones), una parte del momento (la del retroceso) no se tiene en cuenta. Entonces los ángulos que forman los fotones entrelazados resultantes no se conocen con precisión, haciendo difícil identificar por la dirección qué fotón está asociado con cuál como componentes de un par entrelazado. El método de conversión a la baja es mucho más preciso. La figura siguiente ilustra dicho método.

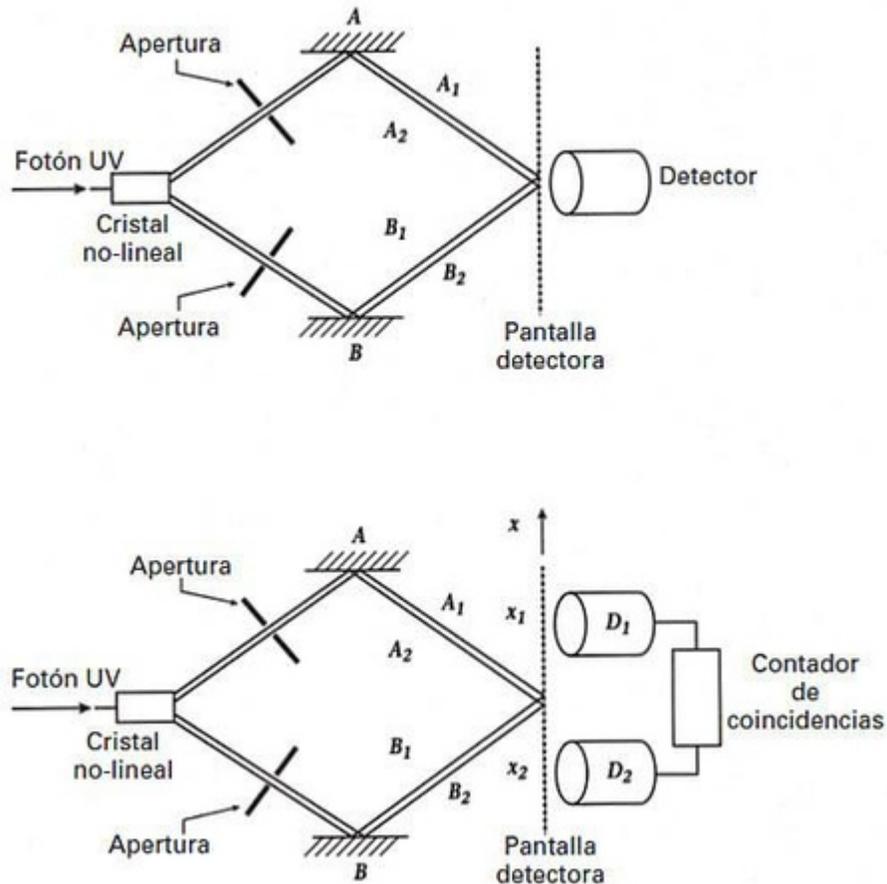


El primer científico que empleó el método de conversión a la baja para estudiar el entrelazamiento fue Leonard Mandel. Mandel nació en Berlín en 1927, pero cuando aún era un niño se trasladó con su familia a Inglaterra. Obtuvo su doctorado en física por la Universidad de Londres en 1951 y fue profesor agregado de física en el Imperial College de Londres, donde estuvo hasta 1964. Ese año se le ofreció formar parte del profesorado de la facultad de física de la Universidad de Rochester, en Nueva York. En Estados Unidos trabajó sobre rayos cósmicos, lo que comportaba ascender a las cumbres de altas montañas con el aparato experimental apropiado para detectar y medir las partículas de alta energía cuando atraviesan la atmósfera. A grandes alturas había muchas más partículas de ese tipo que podían medirse que a niveles más bajos. Tras algunos años de investigación, se entusiasmó con la óptica así como con la teoría cuántica, que rige el comportamiento de las partículas que estaba estudiando.

A finales de los años setenta, Leonard Mandel se embarcó en una serie de experimentos, algunos de ellos en colaboración con H. Jeff Kimble, que demostraron los efectos cuánticos con luz láser. En algunos de estos experimentos se hacían «rebotar» fotones por átomos de sodio. Algunos de ellos tenían que ver con la complementariedad: la dualidad onda-partícula de la luz y la idea

mecánico-cuántica de que uno de esos aspectos de la luz, pero no los dos, puede ponerse de manifiesto mediante un solo experimento. Estos experimentos demostraron algunas de las propiedades cuánticas más sorprendentes de la luz. En ciertos experimentos, Mandel ha demostrado que si el diseño experimental diera al experimentador meramente la *posibilidad* de medición, eso sería suficiente para cambiar el resultado del experimento de un patrón ondulatorio a un comportamiento tipo partícula.

En los años ochenta, Mandel y sus colegas comenzaron a usar la técnica de conversión a la baja para producir fotones correlacionados. Uno de estos experimentos, cuyos resultados se publicaron en 1987 en un artículo de R. Ghosh y L. Mandel (*Physical Review Letters*, vol. 59, p. 1.903), demostró algo interesante sobre el entrelazamiento. El diseño experimental de Ghosh y Mandel se muestra en la figura siguiente.



En el experimento de la parte superior, una luz láser incide sobre un cristal no-lineal, dando lugar a pares de fotones entrelazados. Como el fotón que entra en el cristal puede producir pares de fotones de una cualquiera de las infinitas maneras posibles (porque todo lo que se requiere es que la suma de las frecuencias de los fotones engendrados sea igual a la frecuencia del fotón padre), dentro de un cierto rango de distancias en la pantalla puede haber fotones entrelazados.

En el experimento que se muestra en el diagrama superior, se mueve un pequeño detector a lo largo de la pantalla. Ghosh y Mandel encontraron, sorprendentemente, que no aparece *ninguna*

interferencia. Por lo tanto, un solo fotón no presenta el patrón de interferencia que se esperaría según el viejo experimento de Young de la doble rendija. En el segundo experimento, que se muestra en la parte inferior de la figura, se emplean *dos* detectores, en puntos separados de la pantalla. De nuevo, cuando se mueven los dos detectores a lo largo de la pantalla, no aparece ningún patrón de interferencia. Ghosh y Mandel conectaron entonces los dos detectores a un contador de coincidencias: un contador que registra una cuenta sólo si los dos detectores se disparan a la vez. Ahora, cuando mantenían fijo uno de los detectores y movían el otro a lo largo de la pantalla, veían que el contador de coincidencias registraba un claro patrón de interferencia similar al que se muestra en el experimento de Young de la doble rendija.

La razón de este sorprendente hallazgo es que, mientras que en la teoría cuántica se muestra que un fotón viaja a lo largo de las dos trayectorias e interfiere consigo mismo, como puede verse en el experimento de Young, con fotones entrelazados la situación es diferente. Un par de fotones entrelazados constituye una *sola entidad* incluso aunque estén separados entre sí. Lo que ocurre en este caso es que la entidad dos fotones entrelazados es una superposición de dos estados producto, y entonces es la entidad la que interfiere consigo misma. A eso se debe que el patrón de interferencia aparezca sólo cuando sabemos lo que sucede simultáneamente en *dos* lugares de la pantalla (es decir, cuando seguimos el rastro de los dos fotones entrelazados como una sola entidad) y sólo dentro de este contexto encontramos realmente los

picos y valles familiares de las interferencias en la intensidad, para un par de fotones vistos como un solo elemento. Aquí, dos observadores distantes, cada uno de ellos situado en un detector, deben comparar sus datos para ver que algo ocurre; cada observador ve por sí mismo sólo una llegada aleatoria de fotones, sin patrón alguno, y con una tasa media de cuentas constante. Este hallazgo demuestra una importante idea acerca del entrelazamiento: que no es correcto considerar las partículas entrelazadas como entidades separadas. De alguna manera, las partículas entrelazadas no poseen propiedades individuales, sino que se comportan como una entidad única.

Un experimento de otro tipo fue propuesto en 1989 por James Franson, de la Universidad Johns Hopkins, quien señaló que pueden aparecer franjas de interferencia de dos partículas si no sabemos *cuándo* se produjeron las partículas. Raymond Chiao, de la Universidad de California, en Berkeley, y sus colegas han realizado un experimento basado en el diseño de Franson, como han hecho asimismo Mandel y sus colaboradores. Este tipo de dispositivo experimental utiliza un camino corto y otro largo en cada uno de los dos brazos, separados por espejos semitransparentes. ¿Qué ruta tomó cada fotón? Los fotones entrelazados en la conversión a la baja son producidos a la vez y llegan juntos. Pero como no sabemos cuándo fueron producidos, tenemos una superposición del camino largo para ambos fotones *y* el camino corto para ambos fotones. Esto produce un dispositivo de doble rendija *temporal*.

Otro físico que hizo uso extenso de la técnica SPDC para producir fotones entrelazados fue Yanhua Shih, de la Universidad de Maryland (EE.UU.), quien en 1983 comenzó una serie de experimentos dirigidos a poner a prueba la desigualdad de Bell. Sus experimentos eran muy precisos y condujeron a resultados que violaban la desigualdad de Bell y eran consecuentes con la mecánica cuántica. Shih y sus colegas fueron capaces de demostrar una violación de la desigualdad de Bell hasta un límite de varios *centenares* de desviaciones estándar. Estos resultados eran muy significativos estadísticamente. El equipo de Shih llevó también a cabo experimentos con montajes de elección retardada, y en este caso, asimismo, se confirmó el acuerdo con la mecánica cuántica.

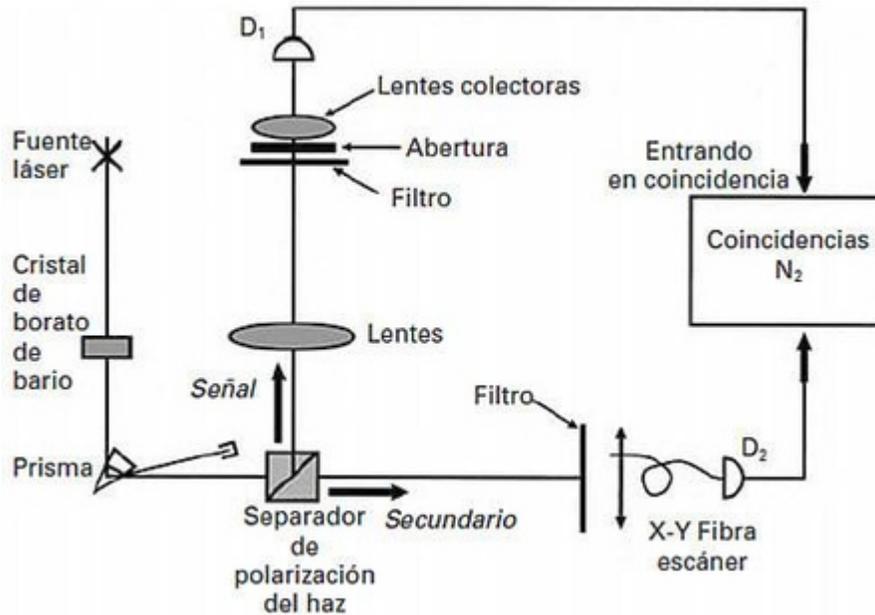
Shih estudió seguidamente los efectos de un asombroso fenómeno llamado el «borrador cuántico» (*quantum eraser*). Cuando podemos decir en un experimento, usando detectores, cuál de los dos caminos tomó el fotón, no aparece ningún patrón de interferencias. Así pues, en un diseño tipo «qué camino» observamos la naturaleza corpuscular de la luz. Si el diseño experimental es tal que el experimentador no puede decir cuál de los dos caminos tomó el fotón, nos encontramos en el diseño tipo «ambos caminos». En este caso, se considera que el fotón ha seguido simultáneamente los dos caminos, pudiendo aparecer un patrón de interferencias, lo cual muestra la naturaleza ondulatoria de la luz. Recuérdese que el principio de complementariedad de Bohr afirma que es imposible observar a la vez (es decir, en el mismo experimento) la naturaleza corpuscular y la naturaleza ondulatoria de la luz.

Shih y sus colegas realizaron unos extraños experimentos que pueden «borrar» información. Más sorprendentemente incluso, usaron un borrador de elección retardada.

En él, se producía un par de fotones entrelazados que se inyectaba en un complejo sistema de separadores de haz (espejos semiplateados que reflejan o transmiten un fotón con la misma probabilidad de $1/2$). Tras haber registrado la llegada de un fotón, a partir de su posición en una pantalla, se conmutaba aleatoriamente el montaje de modo que durante parte del tiempo el experimentador podía decir qué camino seguía y durante parte del tiempo no era capaz de decirlo. Podía entonces determinarse después de que el primer fotón llegara a la pantalla si éste *tenía* naturaleza ondulatoria o corpuscular a su llegada en función de lo que encontraría una fracción de segundo después su gemelo que aún estaba en vuelo.

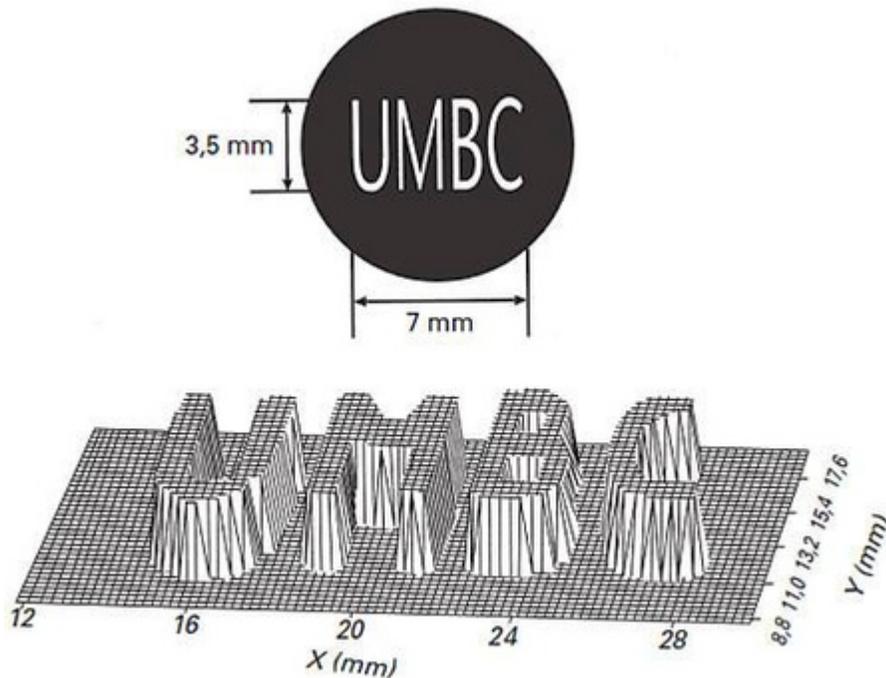
Pero el experimento más interesante realizado por Shih y sus colaboradores, en lo que concierne a lo tratado en este libro y también en vista de posibles aplicaciones tecnológicas, fue el *experimento de imagen fantasma*. Este experimento utilizaba un miembro de cada par de fotones entrelazados para hacer que el otro (distante) miembro del mismo par creara una imagen «fantasma» en el lugar distante.³⁷ El diagrama de este experimento se muestra en la figura siguiente.

³⁷ El experimento de la imagen fantasma fue presentado en Y. H. Shih, «Quantum entanglement and quantum teleportation», *Annalen der Physik*, 10 (2001), 1-2, pp. 45-61.



Como se ve en la figura, un láser ilumina un cristal no-lineal (borato de bario), produciendo fotones entrelazados por el mecanismo SPDC, que atraviesan un prisma y un separador de haz que los separa según su dirección de polarización. Así pues, de cada par de fotones entrelazados uno va hacia arriba, a través de una lente, y encuentra un filtro con una abertura. La abertura tiene la forma de las letras UMBC (por University of Maryland, Baltimore County, la universidad de Shih). Algunos de los fotones son detenidos, pero los que atraviesan las aberturas-letra se recogen mediante una lente y son detectados por un detector. El primer detector está unido a un contador de coincidencias junto con el segundo, que recoge los fotones gemelos que atraviesan el filtro. Estos gemelos (secundarios), que atraviesan directamente el separador de haz, encuentran un filtro y una fibra «escáner» que registra su posición en la pantalla. Sólo se registran aquellos en coincidencia con los

gemelos que atravesaron las aberturas UMBC, y ellos forman la imagen UMBC en la pantalla. Esta imagen fantasma se muestra en la figura siguiente.



Así pues, usando fotones entrelazados, la imagen UMBC se transportó a un lugar distante mediante los gemelos de los fotones que atravesaron las letras, ofreciendo una demostración espectacular de un aspecto interesante del entrelazamiento. La imagen se transforma para crear el fantasma usando dos elementos. Primero, tenemos los fotones que llegan a la pantalla con la fibra escáner: pero no todos los fotones que llegan se cuentan. Nos comunicamos con quienquiera esté observando los gemelos, los fotones entrelazados con fotones que llegan a la pantalla mediante el contador de coincidencias. Contamos sólo los fotones de la

pantalla que «disparan» el detector a la vez que un gemelo que ha atravesado la abertura-letra. Es esta combinación de entrelazamiento con información vía un «canal clásico» lo que nos permite crear la imagen fantasma.

La siguiente etapa de la carrera de Yanhua Shih le llevó al proyecto más apasionante de todos: la teleportación cuántica. Algunas de las ideas básicas sobre teleportación tienen sus ideas gemelas en el experimento fantasma. En particular, la teleportación cuántica comporta el uso simultáneo de dos canales: un «canal EPR», es decir, un canal de «acción a distancia» del entrelazamiento (que es instantáneo), y un «canal clásico» de información (cuya velocidad está limitada por la de la luz). Volveremos a la teleportación más adelante.

Capítulo 17

Entrelazamiento triple

Einstein dijo que si la mecánica cuántica fuera cierta el mundo estaría loco. Einstein tenía razón: el mundo está loco.

DANIEL GREENBERGER

Los «elementos de realidad» de Einstein no existen. No es posible dar ninguna explicación de la hermosa danza de las tres partículas en función de un mundo objetivamente real. Simplemente, las partículas no hacen lo que hacen por lo que son; hacen lo que hacen por la magia cuántica.

MICHAEL HORNE

La mecánica cuántica es el invento más extraño de la humanidad, pero asimismo uno de los más bellos. Y la belleza de las matemáticas que están en la base de la teoría cuántica implica que

hemos hallado algo muy significativo.

ANTON ZEILINGER

En un capítulo anterior, dejamos a Michael Horne disfrutando del éxito de su trabajo con Abner Shimony, John Clauser y Richard Holt (CHSH) y de la prueba real del entrelazamiento mediante un test experimental de la desigualdad de Bell, con resultados a favor de la mecánica cuántica, llevado a cabo por Clauser y Freedman. El éxito de CHSH y sus demostraciones experimentales consiguientes recibió amplia atención en la literatura física y fue una novedad científica. Hubo artículos que informaban sobre los nuevos descubrimientos y hubo asimismo nuevos experimentos y un renovado entusiasmo hacia los fundamentos del extraño mundo del cuanto.

Poco después, Clauser, Horne y Shimony entraron en contacto con el hombre que lo había empezado todo: John Bell. Se entabló una comunicación frecuente entre los cuatro, que en parte apareció como artículos científicos, con la intención de responder cuestiones y discutir ideas propuestas por uno u otro lado. Esta fructífera comunicación dio como resultado una demostración del teorema de Bell con menos hipótesis restrictivas, y también mejoró nuestra comprensión del asombroso fenómeno del entrelazamiento.

En 1975, Mike Horne entró en un grupo de investigación dirigido por Cliff Shull del MIT, que realizaba experimentos en neutrones producidos en el reactor nuclear del MIT en Cambridge

(Massachusetts). Mike pasó diez años en el reactor, realizando experimentos de interferencia con neutrones. También conoció allí a dos físicos que cambiarían el curso de su carrera, y cuyo trabajo en colaboración con él daría lugar a un salto gigantesco en nuestra comprensión del entrelazamiento. Los dos científicos eran Daniel Greenberger y Anton Zeilinger. Los tres escribirían un artículo fundamental en el que probarían que *tres* partículas podían estar correlacionadas, y pasarían años estudiando las propiedades de tales tríos entrelazados. Cuando, años después, les pregunté si ellos tres estaban de alguna manera «entrelazados», como los tríos de partículas que habían estudiado, Anton Zeilinger respondió rápidamente: «Sí, estábamos tan compenetrados que cuando uno abría la boca para decir algo, los otros acababan la frase por él...». La trayectoria de Michael Horne, desde los estudios de interferencia de dos partículas a la investigación sobre interferencias de una simple partícula, tenía detrás una buena razón. Después de hacer el trabajo CHSH que ayudaba a establecer el entrelazamiento como un principio clave en los fundamentos de la mecánica cuántica, Mike decidió estudiar otros problemas relacionados con esos fundamentos. Conocía muy bien la historia del desarrollo de las ideas en teoría cuántica a medida que esta disciplina evolucionaba. Sabía que cuando Young realizó su famoso experimento con la luz en los primeros años de 1800 y descubrió el patrón de interferencias que todavía nos intriga hoy, la luz (y otras radiaciones electromagnéticas) era la única «onda» microscópica conocida. Después, en 1905, Einstein propuso el fotón como una explicación

del efecto fotoeléctrico, mostrando que la luz no era sólo una onda, sino también una corriente de partículas. Sabía asimismo que en 1924 De Broglie «conjeturó que incluso las partículas son ondas», en palabras de Mike, pero que «nadie por entonces era capaz de realizar un experimento del tipo doble rendija con electrones, aunque una confirmación directa de las ondas de De Broglie llegó enseguida de la difracción de electrones por sólidos cristalinos». Un cuarto de siglo después, en la década de 1950, el físico alemán Möllenstedt y sus colaboradores llevaron a cabo el experimento. Probaron que esas partículas, los electrones, muestran la misma naturaleza ondulatoria expuesta por un patrón de interferencia en una pantalla tras emerger del viejo dispositivo de doble rendija de Young.

Después, a mediados de los años setenta, primero Helmut Rauch en Viena y posteriormente Sam Werner en Missouri realizaron de forma independiente lo que esencialmente era un experimento de doble rendija con neutrones. Estos objetos cuánticos con masa muestran el mismo patrón de interferencia que asociamos con ondas en el dispositivo experimental de la doble rendija. Ambos grupos experimentales, de Viena y Missouri, usaron neutrones térmicos: neutrones producidos en reacciones que tenían lugar en un reactor nuclear. Esos neutrones viajaban a velocidades bajas (comparadas con la de la luz), de unos mil metros por segundo, y por tanto, según la fórmula de De Broglie, su longitud de onda asociada era de unos pocos amstrongs. Estos muy atrevidos experimentos eran ahora posibles por las nuevas tecnologías de superconductores, que

permitían disponer de grandes y perfectos cristales de silicio. Los científicos usaban cristales de silicio de un tamaño del orden del decímetro para construir interferómetros para los neutrones térmicos provenientes del reactor. Como los neutrones interactuaban con la red cristalina, primero el haz de neutrones se dividió mediante difracción en una porción del cristal y después las otras porciones se usaron para redirigir y recombinar los haces a fin de producir finalmente el patrón de interferencia.

Mike estaba muy interesado en esos experimentos, que se llevaban a cabo por entonces. Sabía que Cliff Shull, uno de los pioneros del trabajo con neutrones en los años cuarenta (que recibiría el premio Nobel en 1994), tenía un laboratorio en el reactor del MIT y realizaba allí experimentos con neutrones térmicos. Mike tenía ya una plaza para enseñar física en el Stonehill College, pero allí no había un reactor ni ningún físico conocido que realizara experimentos interesantes. De manera que, un día de 1975, Mike se dirigió al laboratorio de Cliff Shull en el MIT para presentarse. Mencionó a Shull su trabajo sobre el entrelazamiento con Shimony y Clauser y le comentó su interés en los experimentos de interferometría de neutrones. Después le preguntó si podía participar.

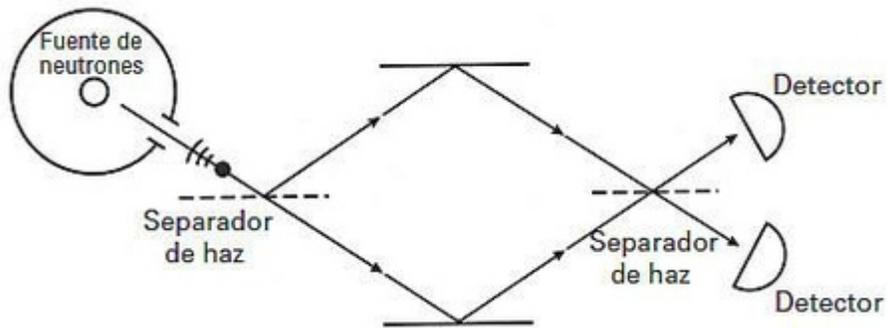
«Ocupa esa mesa de la derecha», fue la respuesta de Shull, señalando una mesa a la derecha del laboratorio. Desde ese día, durante diez años, de 1975 a 1985, todos los veranos, todas las vacaciones de Navidad y todos los martes (el día que no daba clase) Mike Horne estaba en el laboratorio de Shull en el MIT trabajando

en difracción de neutrones. Encontró particularmente atractivos dos experimentos con neutrones que se habían realizado en Viena y Missouri. El grupo de Shull realizaría otros muchos experimentos en el MIT.

El experimento realizado por Sam Werner y colaboradores en la Universidad de Missouri en 1975 demostraba directamente la influencia de la gravedad sobre los neutrones en un experimento de interferencia tipo doble rendija, lo que no había sido demostrado anteriormente. El experimento de Missouri era elegante y conceptualmente simple, de modo que manifestaba lo esencial de tales experimentos cuánticos.

Las dos trayectorias a través del interferómetro se dispusieron en forma de diamante (de la baraja). La onda cuántica de un neutrón que penetraba en el diamante se dividía a la entrada, yendo la mitad de la onda hacia la derecha y la otra mitad hacia la izquierda. En el otro lado del diamante, cuando las dos ondas se recombinaban y salían, se encontraba un pico o un valle en la intensidad; igual que ocurría en la pantalla en el experimento clásico de Young, sólo que ahora esto sucedía en un punto y no en un continuo de puntos en la pantalla. Los científicos registraban si habían encontrado un pico o una depresión. Después, dándole la vuelta al cristal de silicio, giraban el diamante noventa grados, de manera que ahora estaba vertical y no horizontal. Notaron entonces que había cambiado el patrón. La razón de ello era que las dos ondas de neutrones se veían afectadas por la gravedad de manera distinta porque una de ellas estaba ahora más alta que la otra y un neutrón a un nivel más alto

viajaba a menor velocidad, lo que cambiaba la longitud de onda de De Broglie a lo largo de una trayectoria respecto a la otra y, por consiguiente, desplazaba el patrón de interferencia. El experimento se muestra en la figura siguiente.



Otro experimento que efectuaron Helmut Rauch y sus colaboradores en Viena en 1975, así como un grupo de Missouri ese mismo año, fue el experimento 2π - 4π con neutrones. El equipo de Rauch demostró utilizando interferometría una fascinante propiedad de los neutrones. Se usaba un campo magnético para girar 360 grados (2π) el neutrón en una trayectoria del interferómetro. Las partículas de espín entero (los llamados bosones) vuelven a su estado original cuando experimentan una rotación de ese tipo (han ido pues alrededor de un círculo completo), pero esto no sucede con el neutrón. Después de girar un ángulo de 360 grados, es decir, de dar una vuelta completa, se vio que los neutrones mostraban un cambio de signo, que podía observarse mediante la interferencia. Sólo cuando el campo magnético giraba los neutrones *otra* vez alrededor del círculo (esto es, una rotación de 4π), volvían éstos a su estado original.

Por esa misma época, en Boston, Abner Shimony y Mike Horne hablaban de realizar un experimento de ese tipo, con el fin de probar la propiedad $2\pi-4\pi$ del neutrón teóricamente conocida, sin saber que Rauch y sus estudiantes lo habían hecho ya en Viena. Mike y Abner escribieron su artículo y lo enviaron a una revista de física. Pero pronto descubrieron que el grupo de Viena había hecho lo mismo y había realizado el experimento. Uno de los estudiantes de Rauch en Viena era Anton Zeilinger.

Anton Zeilinger nació en mayo de 1945 en Ried/Innkreis, Austria. De 1963 a 1971 estudió física y matemáticas en la Universidad de Viena, obteniendo su doctorado en física por dicha universidad en 1971, con una tesis sobre *despolarización de neutrones en cristales simples de disprosio*, escrita bajo la supervisión del profesor H. Rauch. En 1979, realizó su trabajo de habilitación, sobre neutrones y física del estado sólido, en la Universidad Técnica de Viena. Entre 1972 y 1981, Zeilinger fue ayudante de universidad en el Instituto de Investigación Atómica de Viena, y trabajó de nuevo con Rauch.

Erice es una pintoresca ciudad medieval de Sicilia. Los físicos, no indiferentes a la belleza y a la naturaleza, se han enamorado de esa pequeña ciudad en el severo y montañoso entorno de Sicilia y han organizado allí congresos que atraen a físicos de todo el mundo. En 1976, el congreso de Erice estuvo dedicado a los fundamentos de la mecánica cuántica, incluyendo las desigualdades de Bell y el entrelazamiento. Cuando recibió el anuncio de la reunión, Rauch le dijo a Anton Zeilinger: «¿Por qué no vas a la reunión? No sabemos demasiado sobre el trabajo de Bell, pero podemos aprender y tal vez

algún día realizar aquí en Viena unos experimentos tan apasionantes como se dice que son los que tratan del entrelazamiento... Ve y aprende lo que puedas». Anton, contento de obedecer, hizo la maleta y se fue a Sicilia.

Al mismo tiempo, en Boston, Abner, Mike y Frank Pipkin, de Harvard, hacían sus maletas y se disponían a partir hacia Sicilia con comunicaciones acerca de sus trabajos sobre el entrelazamiento que iban a presentar en la reunión. La de Mike Horne era sobre el trabajo que había hecho con Shimony durante años, una extensión del teorema de Bell a montajes de tipo probabilístico. En Sicilia, los físicos de Boston conocieron a Anton Zeilinger. «Enseguida hicimos buenas migas —dijo Mike Horne—. Anton estaba muy interesado e intentaba aprender de mí todo lo que pudiera sobre el teorema de Bell. Le fascinaba el entrelazamiento».

Un día, de vuelta en el laboratorio de Cliff Shull en el reactor nuclear del MIT, Cliff le preguntó a Mike con cierto desdén, mientras le mostraba la carta que tenía en la mano: «¿Conoces a una persona llamada Anton Zeilinger? Ha solicitado venir a trabajar aquí y menciona tu nombre en su carta». «¡Oh, por supuesto! ¡Fantástico! —contestó Mike—. Es un físico estupendo..., muy interesado en los fundamentos de la mecánica cuántica».

Anton Zeilinger se incorporó al equipo del MIT en el curso académico 1977-1978 como investigador posdoctoral, con la financiación de una beca Fulbright, y durante los diez años siguientes, siendo ya profesor en Viena, realizó estancias de varios meses en ese Instituto. Trabajó duramente haciendo el mismo tipo

de experimento con neutrones que había hecho como estudiante de Rauch en Viena, y él y Mike Horne fueron coautores de docenas de trabajos a lo largo de esos años, junto con Cliff Shull y los estudiantes que por entonces trabajaban con ellos en el laboratorio, que cambiaban de un año para otro. Esto duró hasta la jubilación de Cliff Shull en 1987.

Mientras comían unos sándwiches, en los descansos del trabajo en el laboratorio, Anton y Mike discutían la interferencia de dos partículas, el viejo trabajo de Mike con Abner y John y Dick Holt. Pero su trabajo por entonces tenía que ver con la realización de estudios de interferencia de neutrones individuales. Las ideas del teorema de Bell para dos partículas eran por el momento solamente un apasionado *hobby*, un interés ajeno a su trabajo cotidiano. «Nos sentábamos allí, mientras comíamos, y yo le informaba detalladamente acerca del teorema de Bell y las teorías de variables ocultas locales y cómo son incompatibles con la mecánica cuántica —recordaba Mike Horne—, y él siempre escuchaba y quería que le siguiera explicando más y más cosas».

Daniel Greenberger nació en el Bronx (Nueva York) en 1933. Asistió al Instituto de Enseñanza Media de Ciencias del Bronx y fue compañero de clase de Myriam Sarachik (actual presidenta de la Sociedad Americana de Física y ahora compañera de Daniel en el City College of New York, CCNY) y de los premios Nobel Sheldon (Shelly) Glashow y Steven Weinberg. Estudió física en el MIT, graduándose en 1954. Fue después a la Universidad de Illinois para hacer la tesis doctoral en física de altas energías con Francis Low.

Cuando Low se marchó para incorporarse al MIT, Greenberger lo siguió allí donde escribió la tesis doctoral y obtuvo el grado de doctor. En el MIT estudió física matemática, en particular métodos algebraicos para explorar las simetrías, tan populares ahora en física teórica. A principios de los años sesenta, se unió al grupo de Jeffrey Chew en la Universidad de California en Berkeley, y disfrutó de una beca posdoctoral para trabajar en física de altas energías. Estando en Berkeley, se enteró de que el CCNY había abierto una escuela de graduados con un programa en física, de manera que se marchó allí en 1963; desde entonces, es profesor en ese centro.

Danny se ha sentido siempre fascinado por la teoría cuántica. Él sostiene que la mecánica cuántica no es simplemente una teoría que converge en la física clásica cuando aumenta el tamaño de los objetos en cuestión, sino que, más bien, es una teoría independiente con una riqueza inmensa que no se nos muestra de forma inmediata. Le parece que la mecánica cuántica se asemeja a las islas Hawai. Cuando nos acercamos a las islas sólo vemos la parte por encima de la superficie del mar: las costas y las montañas. Pero por debajo de la superficie del mar existe una inmensa dimensión oculta que se extiende hasta el fondo del océano Pacífico. Y para demostrar que la mecánica cuántica no es una extensión de la física clásica sino que posee esta dimensión oculta, pone como ejemplo la rotación de los objetos físicos. El momento angular, nos recuerda, es un elemento de la física clásica y tiene su análogo en la mecánica cuántica, pero el espín es algo peculiar de los objetos que habitan el mundo cuántico y no tiene análogo en la física clásica.

Greenberger estaba interesado en la relación entre la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. En particular, le interesaba verificar si el importante principio einsteniano de la equivalencia de la masa inercial y la masa gravitatoria era cierto desde el punto de vista cuántico. Se dio cuenta de que para verificarlo necesitaba estudiar objetos cuánticos afectados también por la gravedad. Conocía uno de esos objetos: el neutrón. Los físicos habían buscado desde siempre la conexión entre la relatividad general, que es la teoría moderna de la gravedad, y el mundo cuántico. Los neutrones son objetos cuánticos porque son pequeños, pero también les afecta la gravedad. De manera que la conexión entre ambas teorías podría tal vez encontrarse mediante el estudio de los neutrones.

Greenberger se puso en contacto con los científicos que investigaban sobre neutrones en el reactor del Brookhaven National Laboratory en Long Island, pero le dijeron que ellos no realizaban estudios de interferencia con neutrones. Descubrió, sin embargo, que Cliff Shull hacía esa investigación en el MIT, y en 1970 viajó a Cambridge (Massachusetts) para entrar en contacto con él. Cinco años después, leyó un artículo de Colella, Overhauser y Werner sobre el efecto Aharonov-Bohm, y se puso en contacto con Overhauser e intercambió con él ideas acerca de tal efecto. Danny se dio cuenta de que había algún aspecto que precisaba ser investigado en detalle. Más tarde publicó un artículo sobre dicho efecto en *Reviews of Modern Physics*. En 1978 hubo un congreso sobre estos temas en el gran reactor nuclear de Grenoble, Francia.

Overhauser, que no podía asistir al congreso, le pidió a Greenberger que fuera en su lugar.

En Grenoble, Danny conoció a Anton Zeilinger, quien por entonces trabajaba a tiempo parcial en el reactor del Instituto Laue-Langevin como investigador invitado. Y también conoció a Mike Horne, que asistía asimismo al congreso. Como los tres se interesaban por el mismo tema, se estableció una ligazón entre ellos. «Ese congreso cambió mi vida —recordaba Zeilinger—. Nosotros tres hicimos realmente buenas migas». Desde Grenoble Antón regresó a Austria para continuar allí su trabajo de investigación, y al ir de nuevo al MIT le encantó ver que Danny Greenberger se había incorporado al equipo del Instituto para una breve estancia. Pero la visita se repetiría numerosas veces durante muchos años —hasta el retiro de Cliff Shull en 1987—, posibilitando que los tres científicos trabajasen en común. Incluso después de dicho retiro, una ayuda concedida por la NSF (National Science Foundation) junto con Herbert Bernstein del Hampshire College les permitió continuar sus investigaciones.

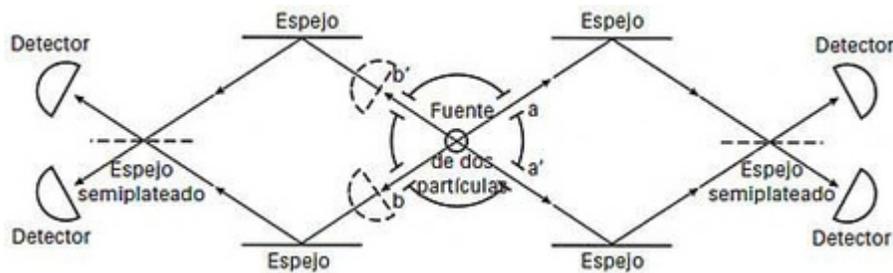
Anton realizó después estancias en el MIT de varios meses, alguna incluso de un año; Danny fue allí para visitas cortas de algunas semanas cada una. La excepción fue la estancia larga de Danny en 1980, cuando disfrutó de un año sabático. Los tres físicos pronto se convirtieron en un grupo fuertemente unido dentro de la más extensa comunidad de científicos que trabajaban en el reactor del MIT, y pasaban además muchas horas hablando fuera del laboratorio acerca del entrelazamiento, un tema que revestía gran

interés para los tres. Aunque en el laboratorio trabajaban únicamente en interferencias de una partícula (neutrón), muchas de sus discusiones fuera del laboratorio se centraban en interferencias de dos partículas y el teorema mágico de Bell.

El entrelazamiento entre los tres físicos fue completo. Danny y Mike se dieron cuenta simultáneamente de algunos problemas teóricos en relación con el famoso efecto Bohm-Aharonov de los años cincuenta y trabajaron independientemente en este tema. Danny Greenberger publicó sus hallazgos en una revista. Anton y Danny propondrían ideas estrechamente relacionadas sobre física, y lo mismo sucedería entre Mike y Anton, quienes durante diez años escribirían artículos en colaboración sobre su investigación en interferometría de una partícula basados en su trabajo en el laboratorio de Shull. En 1985, Mike y Anton publicaron entre los dos un artículo sobre entrelazamiento que proponía un experimento para probar que el fenómeno existe también para las posiciones (además de para el espín o la polarización) de las dos partículas, y que el teorema de Bell se aplicaría asimismo en este caso.

Un día de 1985, Anton y Mike vieron un anuncio de un congreso en Finlandia organizado para celebrar el quincuagésimo aniversario del artículo de Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) y de la revolución en la ciencia por él engendrada, y decidieron que sería formidable asistir. Pero necesitaban poder presentar en el congreso una comunicación sobre interferencia de dos partículas, puesto que su investigación sobre una partícula no parecía adecuada a tal fin. Unos días más tarde tenían un diseño de «doble diamante» para un nuevo tipo de

experimento de tests de las desigualdades de Bell, lo cual constituyó su contribución al congreso. La idea era producir fotones entrelazados y después realizar un experimento de interferencia con estos fotones, usando el doble diamante. Su diseño se muestra a continuación.



En este diseño experimental, una fuente especial emite simultáneamente dos partículas, A y B, que viajan en direcciones opuestas. Así pues, las partículas del par pueden pasar a través de los agujeros a y b o de los agujeros a' y b' . Supongamos que la partícula B es capturada en uno de los detectores que «vigilan» los agujeros b y b' . Si la partícula B pasa por b , sabemos que la partícula A atraviesa el agujero a . Igualmente, si la partícula B pasa por b' , la partícula A lo hará por a' . Entonces, por cada cien partículas producidas por esta fuente, cada uno de los detectores de la derecha registrará cincuenta partículas «A»; es decir, *no* hay interferencias simples (de una sola partícula) en este caso, porque el acceso a la partícula B puede revelar *qué camino* toma la partícula A. De hecho, ni siquiera es necesario poner detectores junto a los agujeros b y b' ; el simple hecho de que *pudiéramos* determinar el

agujero por el que pasa la partícula B basta para destruir las interferencias (tipo una partícula) para la partícula A.

Así pues, imaginemos que se quitan los detectores junto a b y b' y que los dos detectores de la derecha («A») y los dos de la izquierda («B») se controlan mientras la fuente emite cien pares. La mecánica cuántica predice que cada detector contará cincuenta partículas; es decir, no hay interferencia de una partícula para A ni para B porque *podríamos* determinar la ruta de cada partícula «atrapando» la otra cerca de la fuente. Pero la mecánica cuántica *sí* predice una asombrosa correlación entre las cuentas registradas. Si B «cae» en el detector inferior izquierdo, entonces A caerá ciertamente en el superior derecho; y si B se detecta en el superior izquierdo, A se detectará en el inferior derecho. Los detectores superior derecho y superior izquierdo *nunca* se disparan al unísono, como tampoco lo hacen el inferior derecho y el inferior izquierdo. Sin embargo, si movemos uno de los separadores de haz una distancia apropiada hacia uno u otro lado, las correlaciones cambiarán completamente. Los dos detectores de arriba (y de abajo) se disparan ahora en coincidencia, mientras que los detectores en diagonal *nunca* lo hacen (en coincidencia). No obstante, la tasa de cuentas de cada uno de los detectores sigue siendo cincuenta, con independencia de las posiciones de los separadores de haz. Este comportamiento se explica en mecánica cuántica diciendo que cada par de partículas se emite a través de *ambos* agujeros a y b , y a través de *ambos*

agujeros a' y b' . Este misterioso estado cuántico es un ejemplo de entrelazamiento de dos partículas.³⁸

Un día, mientras estaban sentados en la cocina de Mike Horne, Danny Greenberger le preguntó: «¿Qué crees que pasaría en el caso de entrelazamiento de *tres* partículas?». En primer lugar, la pregunta era: ¿cuáles son los detalles del entrelazamiento de tres partículas? Pero también era: ¿cómo podrían las hipótesis de EPR tratar el caso de tres partículas? ¿Existiría alguna dificultad especial al tratar de dar cuenta de manera realista y local del entrelazamiento, o el conflicto entre la mecánica cuántica y la localidad einsteniana sería esencialmente el mismo que en el caso de dos partículas? Danny se convenció de que ésa era una línea de investigación muy apropiada para desarrollar durante su año sabático, a punto de empezar. Y, previendo posibles experimentos, recordó que en el montaje de Wu-Shaknov de emisión del positronio, cuando las dos partículas (electrón y positrón) se aniquilaban mutuamente, se emitían normalmente dos fotones, pero, según las leyes de la probabilidad de la mecánica cuántica, con cierta frecuencia tendrían que emitirse *tres* fotones. Éste era un posible montaje experimental que considerar durante el proyecto de investigación. Mike Horne meditó sobre la pregunta de Danny y contestó: «Creo que sería un buen proyecto para desarrollar». Greenberger se fue a casa y reflexionó sobre el problema. Unos meses después volvió a ver a Mike y le dijo: «Estoy obteniendo

³⁸ La discusión precedente ha sido adaptada, con permiso de Michael Horne, «Quantum mechanics for every one», *Third Stonehill College Distinguished Scholar Lecture*, 1 de mayo de 2001, p. 4.

grandes resultados sobre el entrelazamiento de tres partículas. Tengo desigualdades que surgen de todas partes. Creo que el entrelazamiento de tres partículas puede ser un desafío a EPR mayor que el de dos partículas». Mike se interesó por ello, pero también sabía que el teorema de Bell y los experimentos habían probado que EPR estaban equivocados y, por tanto, no existía una necesidad acuciante de otra prueba. No obstante, estaba lo bastante interesado en la física del entrelazamiento de tres partículas como para discutir la situación con Danny, así que le animó a continuar. En 1986, cuando Anton estaba de regreso en Viena trabajando con Rauch, Danny obtuvo una beca Fulbright, lo que le permitió viajar a Europa en su año sabático. Decidió aprovechar la oportunidad para encontrarse con Anton en Austria y trabajar con él. Mientras viajaba a través del Atlántico tenía en la cabeza permanentemente el asunto del entrelazamiento de tres partículas. Cuando llegó a Viena, ya tenía algunas buenas ideas. Sentía que se hallaba cerca del teorema de Bell sin desigualdades. En Viena, Anton y Danny compartieron despacho, y Danny siempre le mostraba a Anton el desarrollo de sus resultados teóricos, que los dos discutían extensamente. Por fin, Danny Greenberger tuvo frente a sí una situación en la que una correlación perfecta entre tres partículas bastaba para probar el teorema de Bell. Ya no había necesidad de trabajar con una correlación parcial entre dos fotones, como habían hecho experimentalmente Clauser y Freedman, Aspect y otros. Ahí tenía una prueba tremendamente poderosa —y no obstante, conceptualmente más simple— del teorema de Bell.

«Publiquémoslo», dijo Danny, y Anton repuso que Mike y él habían hecho cierto trabajo relacionado con ello que debería incluirse en el mismo artículo. Ambos hablaron por teléfono con Mike Horne, que estaba en Boston, y decidieron poner a punto un artículo sobre el tema.

En 1988, mientras ojeaba un volumen de la revista *Physical Review Letters* en el laboratorio de Shull, Mike vio un artículo de Leonard Mandel. El artículo contenía un diseño experimental casi idéntico al que habían propuesto Anton y él en su colaboración para el congreso de Finlandia. La única diferencia es que el diseño de interferencia de dos partículas de Mandel era un «diamante» plegado, no extendido como en la figura de Horne-Zeilinger. Pero Mandel, que no había visto las actas del congreso de Finlandia, había llevado a cabo el experimento; utilizó el método de conversión a la baja para producir fotones entrelazados. De manera que la interferencia de dos partículas no sólo era un experimento ideal, sino también algo real. Y, además, los experimentos tipo Bell podían ahora hacerse con entrelazamiento del haz y sin espín o polarización.

Como Anton y Mike habían presentado sólo en congresos su propuesta de experimentos de interferencia de dos partículas y desigualdades de Bell sin polarización, y puesto que su concepción del entrelazamiento como base de la interferencia era diferente y más simple que la de Mandel, decidieron publicar un artículo en *Physical Review Letters* presentando sus resultados. Abner colaboró con ellos en la redacción. Como el artículo era esencialmente un

comentario sobre el importante artículo de Mandel, éste fue designado árbitro (*referee*) para su publicación. Siguió entonces un largo período de actividad y cooperación, en el que se prosiguió el trabajo de interferometría de dos partículas por parte del equipo de Boston, Mandel en Rochester, Shih en Maryland y otros.

Tras haber decidido en 1986 trabajar juntos en un artículo sobre entrelazamiento de tres partículas, Anton, Mike y Danny dejaron de alguna manera en suspenso el proyecto de escribir y continuaron su trabajo habitual. Danny Greenberger dejó Viena y viajó por Europa. Cuando acabó su año sabático, volvió a Nueva York y a su trabajo regular de enseñanza. Durante los dos años siguientes, no se hizo nada con los emocionantes nuevos resultados acerca del entrelazamiento de tres partículas. Entonces, en 1988, a Danny le concedieron una beca Alexander von Humboldt para trabajar como investigador en el Instituto Max Planck de Garching, Alemania, donde pasaría ocho meses como investigador visitante. Cuando estaba allí, llamó a Anton a Viena. «Ahora tengo tiempo para escribir —le dijo—. Tengo ya setenta páginas, y apenas he comenzado». Pero la redacción formal no progresaba. Danny viajó por Europa, dando charlas acerca de su trabajo con Anton y Mike sobre las propiedades de las tres partículas entrelazadas y cómo estaban relacionadas con el teorema de Bell y con el trabajo de EPR. Al final del verano de 1988, Danny Greenberger fue al congreso de ese año en Erice, Sicilia, y dio una charla sobre el entrelazamiento de tres partículas. David Mermin, de la Universidad de Cornell —otro físico

cuántico— estaba entre el público. Según Danny, su sensación fue que el trabajo no atraía realmente la atención de Mermin.

Pero cuando regresó a Nueva York, Danny empezó a recibir artículos de diversos grupos de físicos que hacían referencia a su propio trabajo con Mike y Anton. Uno de esos grupos estaba dirigido por Michael Redhead, de la Universidad de Cambridge. El grupo de Redhead aseguraba haber mejorado el trabajo de Greenberger-Horne-Zeilinger sobre el entrelazamiento de tres partículas, que Danny había presentado en Erice y otros lugares de Europa. Danny llamó a Anton y a Mike. «Debemos hacer algo enseguida —les dijo—. La gente cita nuestro trabajo sin haberse publicado».

En 1988, Danny presentó una comunicación en un congreso de la Universidad George Mason (EE.UU.), que fue publicada en las actas correspondientes. Mientras tanto, David Mermin recibió el artículo de Redhead, que citaba el trabajo de Greenberger, Horne y Zeilinger, y escribió un artículo para su columna «Reference Frame» (Sistema de Referencia) en *Physics Today* titulado «¿Qué pasa con estos elementos de realidad?». *Physics Today* es el boletín de la Sociedad Americana de Física y, por tanto, el artículo tuvo una gran distribución. La comunidad de físicos se enteró perfectamente de los nuevos descubrimientos, refiriéndose a ellos como el «entrelazamiento GHZ», a pesar incluso de que el artículo anticipado de Greenberger, Horne y Zeilinger todavía no se había publicado (en muchas ramas de la ciencia, un artículo incluido en las actas de un congreso cuenta menos que un artículo publicado en una revista con *referee*). De hecho, dos de los autores ni siquiera sabían que se

había presentado en un congreso y publicado en sus actas una comunicación que llevaba sus nombres, porque Danny había olvidado mencionárselo.

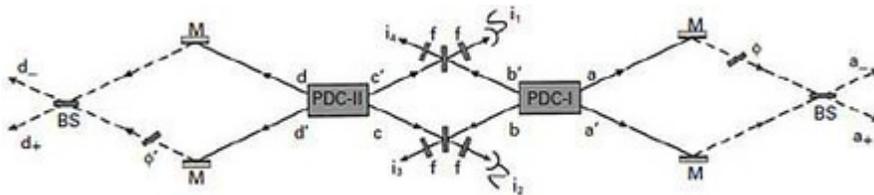
Un día Abner le preguntó a Mike: «¿Qué es eso que has probado con Danny y Anton?». «¿A qué te refieres?», le preguntó a su vez Mike Horne. Abner le entregó el artículo de David Mermin, donde se atribuía con toda claridad a Greenberger, Horne y Zeilinger la prueba que en él se describía de que la mecánica cuántica era incompatible con las variables ocultas en un sentido fuerte en el caso de tres partículas entrelazadas. Antes de saberlo, Mike estuvo recibiendo correspondencia de la comunidad científica felicitándolo por el éxito de GHZ. El 25 de noviembre de 1990, John Clauser le envió una postal desde Berkeley:

Querido Mike:

¡Viejo zorro! Envíame un «(p)reprint» de GHZ. A Mermin le parece que es «de fábula».

Entre las felicitaciones había algunas de personas que estaban en la cima de la profesión, incluyendo premios Nobel. Los tres físicos se dieron cuenta enseguida de que sería mejor publicar su investigación en una revista adecuada. Para hacerlo, invitaron a Abner Shimony a unirse a ellos, ya que había estado trabajando en las desigualdades de Bell desde el principio. En 1990, el artículo «El teorema de Bell sin desigualdades», de Greenberger, Horne, Shimony y Zeilinger, se publicó en el American Journal of Physics, aunque la idea del entrelazamiento de tres partículas y el teorema

de Bell perfeccionado se sigue llamando GHZ.³⁹ El dispositivo de tres partículas para presentar el teorema de GHZ puede ser o bien una versión de espín o polarización del experimento, o bien una versión tipo entrelazamiento del haz. La versión de polarización del dispositivo experimental de GHZ se muestra en la figura siguiente.



Lo más sorprendente del entrelazamiento de tres partículas, y la razón principal del interés que despertó la propuesta de GHZ, es que puede emplearse para probar el teorema de Bell sin el pesado uso de desigualdades.

Quedaba en pie la pregunta: ¿cómo crear *tres* fotones entrelazados en el laboratorio? Esto puede lograrse mediante una verdaderamente extraña propiedad cuántica, como se explica en la propuesta de Zeilinger y colaboradores de 1997. El diseño se muestra en la figura siguiente. Si dos pares de fotones entrelazados se introducen en un cierto dispositivo experimental que hace que un miembro de un par sea indistinguible de un miembro del otro par, y se captura uno de los dos fotones indistinguibles, entonces los tres fotones restantes quedan entrelazados. Lo que resulta aquí increíble es que los fotones *quedan entrelazados porque un observador*

³⁹ «Bell's theorem without inequalities», por Greenberger, Horne, Shimony y Zeilinger, *American Journal of Physics*, 58 (12), diciembre de 1990, pp. 1.131-1.143.

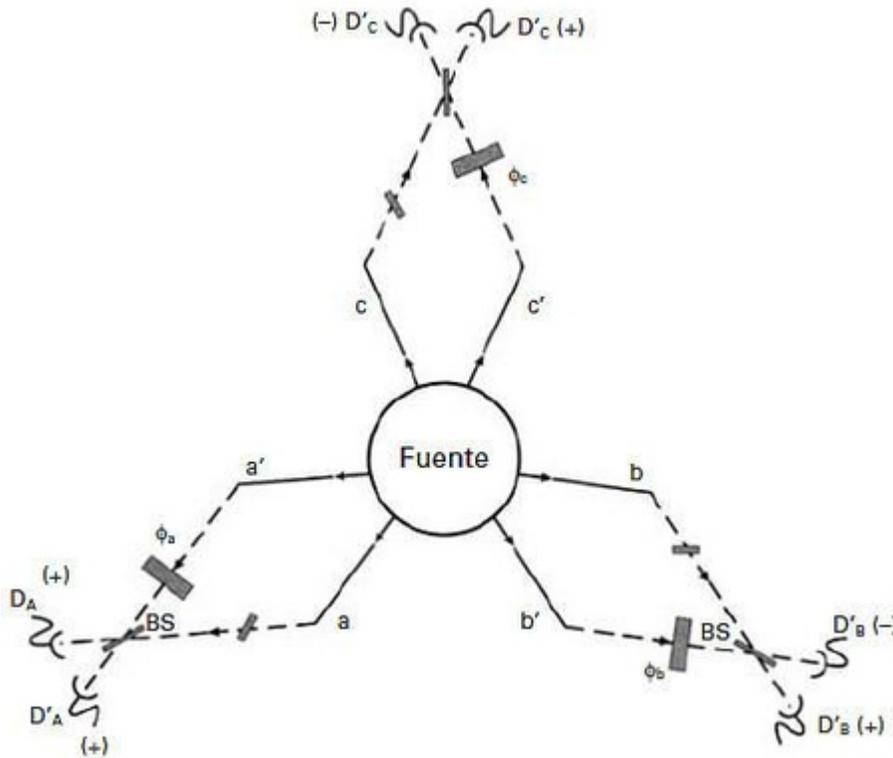
externo no puede ya decir a cuál de los dos pares pertenecía el fotón capturado. Entonces, dejando aparte el fotón capturado, los otros tres están entrelazados. Zeilinger y colaboradores construyeron realmente un dispositivo así en 1999.

Hay versiones accesibles de la prueba de GHZ del teorema de Bell usando tres fotones entrelazados. David Mermin, los mismos GHZ y, recientemente, un libro de texto de Daniel Styer han presentado la argumentación de forma comprensible para lectores no especializados.

Estas tres argumentaciones son comprensibles por dos razones que tienen en común: primera, las predicciones cuánticas no se deducen, sino que simplemente se exponen, ahorrándose por tanto al lector las deducciones matemáticas; segunda, no se detallan todas las predicciones cuánticas, sino sólo las necesarias para la argumentación. La siguiente versión es de Mike Horne, quien la utilizó en mayo de 2001 en su «Distinguished Scholar Lecture» dada para el claustro y estudiantes del Stonehill College (Massachusetts). Se basa bastante en argumentos anteriores, con la simplificación adicional de que hace uso de la versión de entrelazamiento del haz de GHZ, evitando así utilizar espín o polarización. La argumentación expuesta aquí ha sido adaptada de la presentación de Mike con la amable autorización y ayuda de éste.

La figura inferior muestra el montaje de GHZ con haz entrelazado, el cual es claramente una generalización directa de la interferometría de dos partículas al caso de tres partículas. Un espejo semiplateado (BS) colocado en cada una de las tres posiciones puede disponerse

en una de las dos posiciones, la izquierda (I) o la derecha (D). Los resultados experimentales dependen de estas disposiciones.



La figura presenta un montaje en el que una fuente muy especializada en el centro emite simultáneamente tres partículas entrelazadas. Puesto que estas partículas (o fotones) son objetos cuánticos, *y están entrelazados*, cada trío de partículas pasa *a la vez* a través de los agujeros a , b , c y de los agujeros a' , b' , c' . Mientras viajan a lo largo del diseño de «triple-diamante», cada partícula encuentra un separador de haz (un espejo semiplatado), que puede estar en la posición I o en la D.

La mecánica cuántica predice que, para cada partícula, los resultados (+) y (-) (que son los análogos a espín «arriba» o «abajo»

para una partícula, o polarización vertical u horizontal para un fotón) se darán con la misma frecuencia: la mitad de las veces (+) y la otra mitad (-), independientemente de las posiciones de los separadores de haz. Si observamos pares de partículas, no veremos ningún patrón interesante: todos los pares de resultados (+,+), (-,-), (+,-) y (-,+) aparecerán con la misma frecuencia (una cuarta parte de las veces cada uno) para las partículas A y B (e igualmente para los otros pares B y C, y A y C), independientemente de las posiciones de los separadores de haz. Sin embargo, la mecánica cuántica predice que un observador vería una danza verdaderamente mágica si mirara lo que les sucede a *las tres* partículas. Por ejemplo, la mecánica cuántica predice que, si los separadores de haz para las partículas B y C se colocan ambos en la posición I, y las dos partículas acaban en, digamos, los detectores (-), y además el separador de haz para la partícula A se coloca en la posición D, entonces la partícula A acabará en el detector (+) con certeza. Ésta es una predicción notablemente fuerte, y existen otras similares para otros montajes. En la tabla siguiente se resumen los diversos montajes y las predicciones correspondientes de la mecánica cuántica:

	<i>Para las posiciones de los separadores de haz:</i>			<i>Las predicciones de la mecánica cuántica son:</i>
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	
1.	D	I	I	• 0 o 2 partículas irán a (–)
2.	I	D	I	• 0 o 2 partículas irán a (–)
3.	I	I	D	• 0 o 2 partículas irán a (–)
4.	D	D	D	• 1 o 3 partículas irán a (–)

Otras combinaciones (por ejemplo, I I I) no se necesitan en nuestra discusión.

Las predicciones de la derecha para las combinaciones particulares de la izquierda fueron obtenidas por Greenberger, Horne, Shimony y Zeilinger por medio de las matemáticas de la mecánica cuántica, aplicadas desde el principio al estado entrelazado de tres partículas. Como sabemos, el entrelazamiento es una superposición de estados, y para tres partículas, cada una de ellas pasando por *dos* aberturas, dicha superposición de estados puede escribirse, de una forma algo simplificada, como:

$$(abc + a'b'c')$$

Esta ecuación es la expresión matemática del entrelazamiento de tres partículas, en donde el signo «+» encierra la propiedad «*ambas-y*» antes mencionada.

A partir de esta ecuación, que describe la superposición de estados —esto es, describe de forma matemática lo que significa el hecho de que tres partículas estén entrelazadas en el contexto específico de este experimento con seis aberturas—, los físicos desarrollan el

aparato matemático y deducen las predicciones que se muestran en la tabla anterior. Los detalles precisos pueden encontrarse en el apéndice del artículo «Bell's theorem without inequalities» (El teorema de Bell sin desigualdades), de Greenberger, Horne, Shimony y Zeilinger (*American Journal of Physics*, 58 [12], diciembre de 1990). Nótese que incluso en su artículo científico, los autores relegan su deducción algebraica basada en la ecuación del estado a un apéndice; era demasiado larga y es mecánica cuántica elemental. El lector interesado y amante de las matemáticas puede buscar esos detalles allí. Lo que es importante que comprenda el lector es que las predicciones de la tabla anterior son exactamente lo que la mecánica cuántica nos dice que sucederá en cada una de las situaciones. Tales predicciones se obtienen simplemente mediante la aplicación de las reglas de la mecánica cuántica a un montaje particular y al estado entrelazado de las tres partículas. Consideraremos, pues, válidas esas predicciones, consecuencia directa del entrelazamiento de las tres partículas.

Volviendo a la mencionada tabla, podemos observar que: *dadas las posiciones de los separadores de haz (I o D) y los resultados específicos para B y C, el resultado para la partícula A puede predecirse con absoluta certeza*. Por ejemplo, supongamos que los separadores de haz para las partículas B y C están ambos en la posición I y que la partícula B llega al detector (-), entonces, si el separador de haz de la partícula A está en la posición D, la partícula A irá con certeza al detector (+). Existen correlaciones perfectas análogas, como puede deducirse de la tabla, para otras elecciones

para los separadores de haz y otros resultados para dos partículas. *Dicho en pocas palabras: dadas las posiciones de los separadores de haz (I o D) y los resultados específicos para B y C, el resultado para la partícula A puede predecirse con absoluta certeza.*

Ahora viene la parte importante del trabajo de GHZ. Para entender qué es ello y por qué el estado de GHZ proporciona una demostración tan convincente del teorema de Bell, así como una extensión del mismo, hemos de volver a lo que dijeron Einstein y sus colegas cincuenta y cinco años atrás, en el artículo de EPR de 1935.

Einstein y sus colaboradores observaron las correlaciones asombrosamente perfectas presentes en el entrelazamiento de dos partículas. Sostuvieron que esas correlaciones perfectas causan perplejidad, a no ser que revelen simplemente propiedades preexistentes, objetivamente reales de los objetos entrelazados. Afirmaron su adhesión a la existencia de una realidad objetiva como sigue (en el artículo de EPR de 1935): «Si, sin perturbar en modo alguno un sistema, podemos predecir con certeza el valor de una cantidad física, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a esa cantidad física».

Ahora bien, la llegada de la partícula A en su detector (+) es un «elemento de realidad» de acuerdo con la definición de Einstein, porque podemos *predecir que esto sucederá con certeza, y claramente no perturbamos la partícula A por nuestra elección de los montajes de los separadores de haz en lugares distantes B y C*. El resultado de A puede como mucho depender del montaje del

separador de haz en la «estación» A, no en B o C. De modo que la llegada de la partícula A al detector (+) es un «elemento de realidad», llamémoslo A(D). Por consiguiente, A(D) es un elemento de realidad en la localización A, el cual muestra el resultado en la estación A cuando el separador de haz que controla la partícula A se ha dispuesto en la posición derecha (D). Para el resultado específico de que la partícula A llega al detector (+), decimos que el elemento de realidad es +1 y lo escribimos como: $A(D) = +1$. Análogamente para otras localizaciones y combinaciones de posiciones de los separadores de haz, tenemos, siguiendo a Einstein, finalmente seis elementos de realidad: A(D), B(D), C(D), A(I), B(I) y C(I). Cada uno de ellos puede valer +1 o -1.

Veamos ahora el teorema de GHZ.

Supongamos que los elementos de realidad de Einstein *verdaderamente existen* y son capaces de explicar las de otra manera desconcertantes predicciones mecánico-cuánticas dadas en la tabla anterior (las cuales han sido ya verificadas mediante un experimento de entrelazamiento de tres partículas realizado por Zeilinger en 1999). El acuerdo con las predicciones 1, 2, 3 y 4 de dicha tabla impone las siguientes restricciones sobre los elementos de realidad

1. $A(D) B(I) C(I) = +1$
2. $A(I) B(D) C(I) = +1$
3. $A(I) B(I) C(D) = +1$
4. $A(D) B(D) C(D) = -1$

Estas igualdades son ciertas por lo siguiente. En el caso (1) las posiciones de los separadores de haz son DII y, según la mecánica cuántica, como se ve en la tabla, «o 0 o 2 partículas van a (-)». Entonces, o bien ninguno o dos elementos de realidad A(D), B(I) y C(I) son iguales a -1. Y cuando se multiplican los tres, se obtiene: $1 \times 1 \times 1 = 1$ (en el caso de que ninguna de las partículas va a (-1) y $1 \times (-1) \times (-1) = 1$ (para el caso en que dos partículas vayan a (-1), sin importar el orden). Análogamente, para los casos (2) y (3) se obtiene que el producto de los elementos de realidad es igual a 1, bien porque todos ellos sean iguales a 1 (ninguna partícula va a (-1)) o porque dos de ellos valen (-1) (el caso en que dos partículas van a (-1) y el tercero es +1).

En el caso (4) la predicción cuántica es que o 1 o 3 partículas van a -1. Entonces los productos posibles de los tres elementos de realidad A(D), B(D) y C(D) son: $-1 \times 1 \times 1$, o bien $-1 \times (-1) \times (-1)$, y en ambos casos el resultado es -1.

Ahora llega el gran truco: *multiplicar (todas) las tres primeras ecuaciones*. La multiplicación de los miembros de la izquierda da:

$$A(D) A(I) A(I) B(I) B(D) B(I) C(I) C(I) C(D) = A(D) B(D) C(D)$$

La razón de que esta última igualdad sea cierta es que cada uno de los términos de la izquierda que no están en la derecha aparecen en la izquierda *dos veces*, y, por lo tanto, su producto es siempre +1 porque $(+1 \times +1 = +1; -1 \times -1 = +1)$.

Ahora, multiplicando los miembros de la derecha de las ecuaciones (1), (2) y (3) se obtiene $+1 \times +1 \times +1 = +1$, así que tenemos: $A(D) B(D) C(D) = +1$.

Pero la predicción mecánico-cuántica, ecuación (4), dice que $A(D) B(D) C(D) = -1$.

Hemos llegado entonces a una contradicción. Por tanto, los «elementos de realidad» y la localidad de Einstein no pueden existir si la mecánica cuántica es correcta. Las variables ocultas son imposibles en el marco de la mecánica cuántica. Las partículas entrelazadas no actúan del modo en que lo hacen porque estén «preprogramadas» de alguna manera. Tal programación es imposible si las partículas se comportan según las reglas de la teoría cuántica. El teorema hace ver que cualesquiera conjuntos de instrucciones que pudieran poseer las partículas deben ser internamente inconsistentes y, por lo tanto, son imposibles. Las partículas responden *instantáneamente* a través de cualquier distancia que las separe a fin de proporcionarnos los resultados que la teoría cuántica afirma que se obtendrán. Ésa es la magia del entrelazamiento.

Además, los experimentos han probado que la teoría cuántica es cierta, y por tanto el realismo local de Einstein no lo es. El teorema de GHZ muestra la contradicción de una manera más directa y más fácil de entender (y sin carácter estadístico) en comparación con el teorema original de Bell.

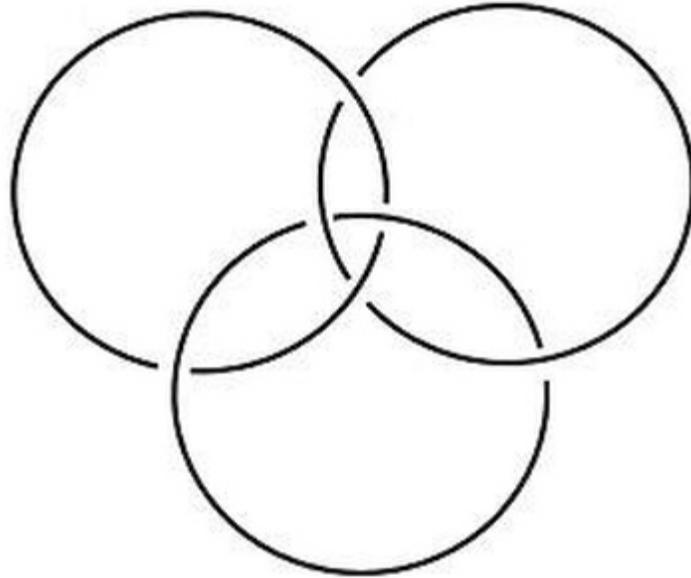
«En todo nuestro trabajo nunca ha habido competición alguna. Ha sido maravilloso», recordaba Mike Horne al describirme su trabajo

con sus colegas hasta llegar al diseño de GHZ y el descubrimiento del estado entrelazado de tres partículas de GHZ. «Tuvimos la suerte de trabajar en un campo en el que estaba trabajando muy poca gente, y entonces todo el mundo daba la bienvenida a quienes estaban interesados en los mismos problemas de los fundamentos de la mecánica cuántica», dijo.

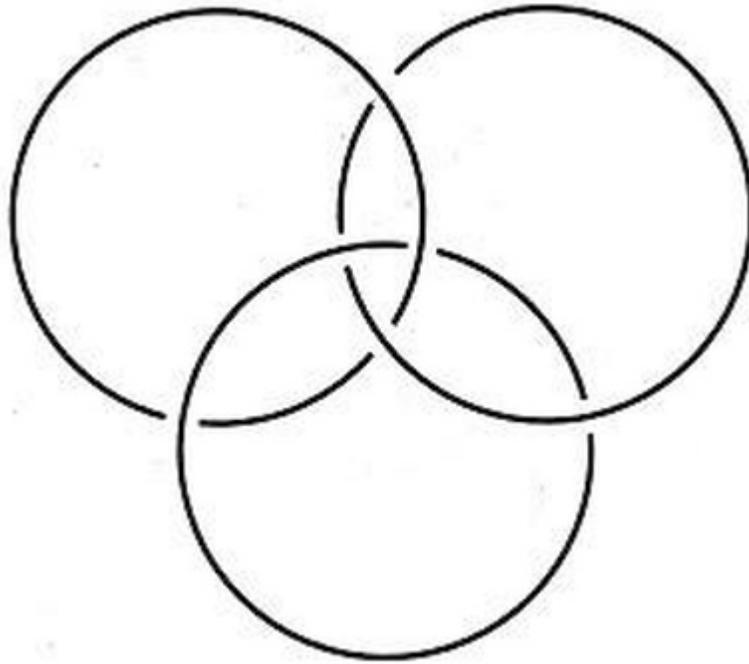
Estos físicos, trabajando en armonía, hicieron una contribución muy importante a la física moderna. Su trabajo se desarrollaría y extendería en los años siguientes, y ayudaría a crear nuevas tecnologías que únicamente algunos escritores de ciencia ficción podrían haber imaginado tan sólo unos años antes.

Los anillos de Borromeo se llaman así a causa de la familia Borromeo, cuyos miembros pertenecen a la nobleza italiana. Esta familia es dueña de las bellas islas de Borromeo en el lago Maggiore, en el norte de Italia. El escudo de armas de la familia consta de tres anillos entrelazados de un modo interesante: si uno se rompe, los otros dos ya no siguen enlazados. Estos anillos tal vez representan la idea de «unidos, nos mantenemos de pie; divididos, nos derrumbamos». El físico P. K. Aravind, que ha estudiado el entrelazamiento, ha descubierto ciertas conexiones entre estados cuánticos entrelazados y diversas clases de nudos topológicos. En particular, Aravind ha sostenido que existe una correspondencia biunívoca entre el estado entrelazado de GHZ y los anillos de Borromeo, los cuales se muestran a continuación.⁴⁰

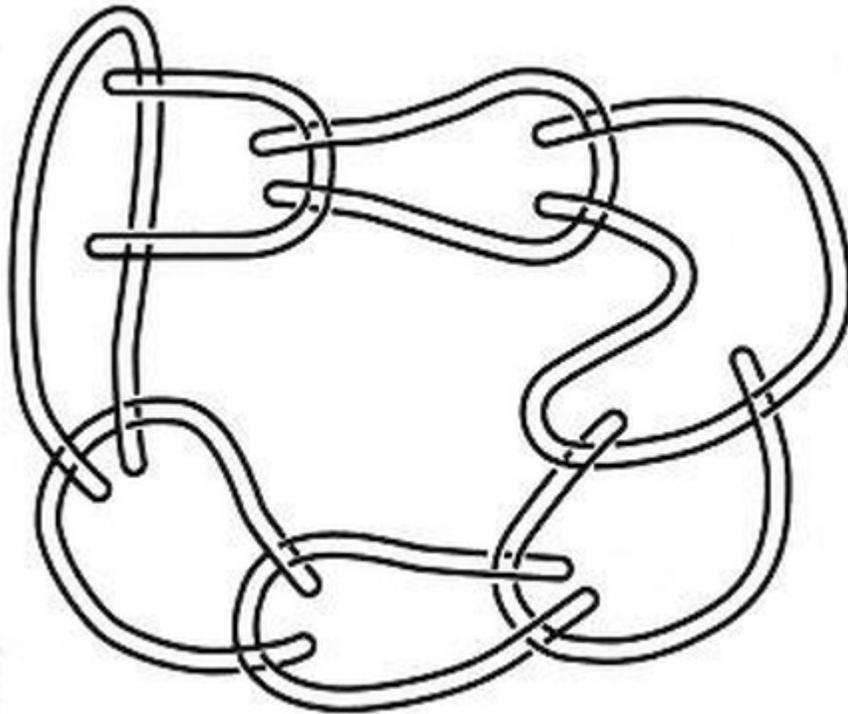
⁴⁰ Reproducido de P. K. Aravind, «Borromean entanglement of the GHZ state», en *Potentiality, entanglement and passion-at-a-distance*, Kluwer Academic Publisher, UK, 1997, pp. 53-59.



La prueba de Aravind tiene que ver con el entrelazamiento según una dirección particular del espín (la dirección z). También ha demostrado que si se mide el espín de las partículas entrelazadas según otra dirección, la dirección x , el estado entrelazado es diferente. Ahora ya no es análogo a los anillos de Borromeo, sino a los anillos de Hopf. Los tres anillos de Hopf están trabados entre sí de tal manera, que si se corta uno de ellos, los otros dos permanecen trabados. Los tres anillos de Hopf se muestran en la figura siguiente.



Aravind también ha probado que un estado de GHZ general de n partículas entrelazadas puede verse como una generalización de los tres anillos de Borromeo. Un enlazamiento así de varias partículas es análogo a una cadena enlazada con un aspecto como el de los anillos en la figura siguiente.



Danny Greenberger todavía visita en ocasiones a Mike Horne en Boston y en ocasiones a Anton Zeilinger en Viena, manteniendo así vivo el entrelazamiento entre estos tres buenos amigos. En Austria, Danny pasa algún tiempo con el grupo de investigación de Anton en la Universidad de Viena, un grupo importante que lleva a cabo trabajos punteros en muy diversos aspectos del comportamiento cuántico y del entrelazamiento, incluida la teleportación. Recientemente, Danny asistió a una fiesta del grupo de investigación, y en ella conoció a la hija y al nieto (de otra madre) de Schrödinger. El joven, miembro del grupo de investigación, no había descubierto que el gran físico era su abuelo hasta que fue adulto y se hizo él mismo físico.

Capítulo 18

El experimento de los diez kilómetros

Si dos cuerpos separados, de los cuales se posee el máximo conocimiento, entran en una situación en la que se influyen entre sí, y luego se separan de nuevo, entonces sucede regularmente lo que he llamado entrelazamiento de nuestro conocimiento de los dos cuerpos.

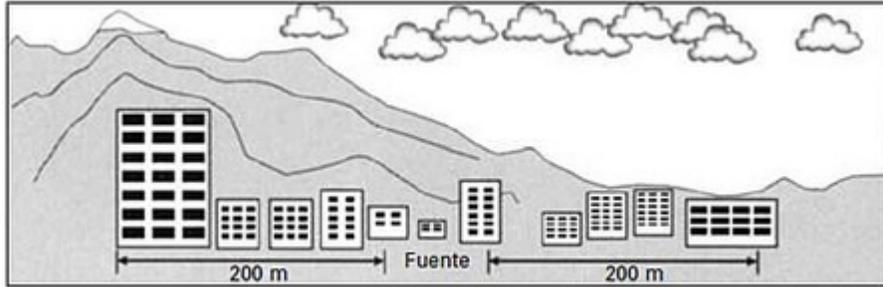
ERWIN SCHRÖDINGER

El capítulo siguiente en la historia del misterioso fenómeno del entrelazamiento lo escribió Nicolas Gisin, de la Universidad de Ginebra. Gisin nació en Ginebra en 1952 y estudió física teórica en la universidad de su ciudad natal, obteniendo el título de doctor en esta especialidad. Siempre estuvo interesado en el misterio del entrelazamiento. Conoció a John Bell en el CERN en los años sesenta, y se sintió muy impresionado por su personalidad, que después describió como perspicaz y brillante. Gisin reconoció en el trabajo de Bell un logro fundamental en física teórica. Escribió unos cuantos artículos teóricos en torno al teorema de Bell, probando resultados interesantes sobre los estados cuánticos. Después pasó algún tiempo en la Universidad de Rochester (EE.UU.), donde

conoció a dos de los pioneros de la investigación en óptica: Leonard Mandel, cuyo trabajo lo convirtió en una leyenda en este campo, y Emil Wolf.

Nicolas regresó a Ginebra y trabajó durante cuatro años en la industria. Esto fue una jugada de suerte, porque le permitió combinar su pasión por la mecánica cuántica con el trabajo práctico con fibras ópticas. El eslabón que forjó entre la tecnología de fibras ópticas y la teoría cuántica resultaría crucial para el nuevo trabajo sobre entrelazamiento. Igualmente importantes serían las conexiones que estableció con compañías telefónicas. Al retornar a la Universidad de Ginebra, Gisin empezó a diseñar experimentos para poner a prueba las desigualdades de Bell.

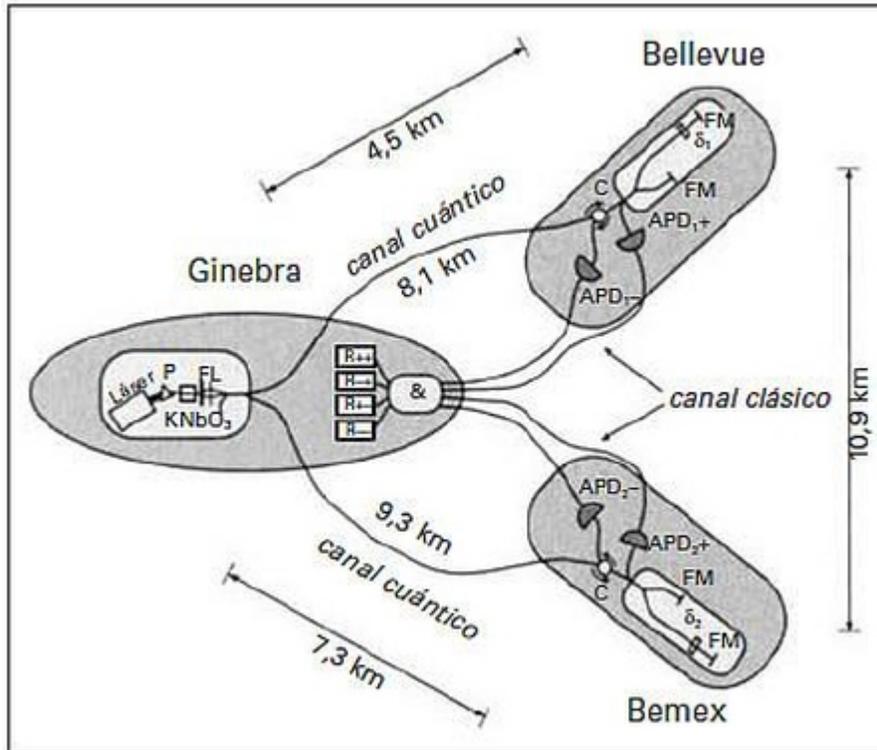
En esos años, los noventa, Clauser y Freedman y otros ya habían demostrado por primera vez experimentalmente la violación de la desigualdad de Bell, y Alain Aspect había avanzado en este trabajo más que nadie al demostrar que cualquier señal desde un punto a otro del montaje experimental tendría que haber viajado a mayor velocidad que la luz, probando entonces que no podía haberse recibido ninguna señal. El experimento de Aspect fue realizado dentro del espacio de un laboratorio. Siguiendo ese experimento, Anton Zeilinger y sus colaboradores habían extendido hasta centenares de metros el alcance al cual se ponía a prueba el entrelazamiento, a lo largo de varios edificios alrededor de su laboratorio en Austria. Este montaje se muestra a continuación.



Pero Gisin deseaba llegar mucho más lejos. Primero diseñó un experimento en el que fotones entrelazados viajaban una distancia de 35 metros, en el interior de su laboratorio.

Sus conexiones con las compañías telefónicas le permitieron obtener el apoyo entusiasta de éstas para un ambicioso experimento, a una escala sin precedentes: Gisin no llevó a cabo su experimento con fotones en el aire, sino dentro de un cable de fibra óptica. Y el cable se tendió de un punto a otro que se hallaba a una distancia en línea recta de 10,9 kilómetros. Contando la distancia real recorrida, incluyendo las dobladuras y la curvatura del cable, se alcanzaba un total de 16 kilómetros. Gisin se enfrentó al experimento con una mente abierta. Habría encontrado fascinante cualquier resultado: una confirmación de la mecánica cuántica o un resultado que apoyara a Einstein y sus colegas. El resultado fue una abrumadora confirmación del entrelazamiento, de la «acción fantasmal a distancia», que tanto desagradaba a Einstein. La desigualdad de Bell se empleó de nuevo para proporcionar un fuerte apoyo a la no-localidad. Debido al montaje experimental, una señal de uno a otro extremo del cable, diciéndole a un fotón el montaje que encontró el otro, tendría que haber viajado a *diez millones de*

veces la velocidad de la luz. El mapa de ese experimento se muestra a continuación.



Como algunos otros físicos, Gisin cree que aunque el entrelazamiento no nos permite enviar mensajes supralumínicos (a velocidad mayor que la luz) este fenómeno viola el *espíritu* de la teoría de la relatividad. Él deseaba entonces comprobar el fenómeno del entrelazamiento en un marco relativista. En uno de sus experimentos usó una superficie negra absorbente, colocada en uno de los extremos del cable de fibra óptica, para producir el colapso de la función de onda. Los dos extremos del cable a través de los cuales aparecerían los fotones entrelazados estaban de nuevo separados varios kilómetros, pero la superficie absorbente rotaba a

una velocidad extremadamente alta. Manipulando esas condiciones experimentales, se podía estudiar el fenómeno del entrelazamiento usando diferentes sistemas de referencia relativistas. Así pues, podía manipularse el tiempo mismo de acuerdo con la teoría especial de la relatividad: cada fotón podía medirse al llegar a su destino (detector) en tiempos diferentes. En el primer experimento uno de los fotones del par fue el primero en llegar y en el segundo experimento su gemelo llegó antes. Este complejo experimento usando sistemas de referencia móviles dio como resultado una fuerte confirmación del entrelazamiento no-local y de las predicciones de la mecánica cuántica.

En los años ochenta, la gran novedad en tecnología cuántica fue la criptografía. La idea de usar el entrelazamiento en la criptografía cuántica fue propuesta por Arthur Ekert, de la Universidad de Oxford, en 1991. El término se presta a cierta confusión, puesto que la criptografía es el arte de «encriptar» (cifrar) mensajes. Criptografía cuántica, sin embargo, significa usualmente técnicas para evitar y detectar intromisiones. El entrelazamiento desempeña un papel importante en esta nueva tecnología. Los socios de Gisin de las compañías telefónicas suizas estaban muy interesados en este tipo de investigación, ya que podía permitir el desarrollo de redes de comunicación seguras. Se puso entonces a investigar en criptografía cuántica, y en uno de sus experimentos más recientes fue capaz de transmitir mensajes seguros a una distancia de 25 kilómetros bajo la superficie del lago de Ginebra. Gisin está entusiasmado con sus logros en criptografía, usando entrelazamiento y también otros

métodos. Cree que este campo ha madurado y que la criptografía cuántica podría usarse comercialmente para distancias del orden de las de sus experimentos. Ha pasado también cierto tiempo en Los Álamos, donde un equipo de científicos estadounidenses viene realizando progresos en computación cuántica, otra nueva tecnología propuesta que, de tener éxito, utilizaría entes entrelazados.

Capítulo 19

Teleportación: «proyéctame, Scotty»

El entrelazamiento —junto con la superposición de estados— es lo más extraño de la mecánica cuántica.

WILLIAM D. PHILLIPS

La teleportación cuántica ha sido un experimento mental hasta hace bastante poco, una idea que nunca había sido verificada en el mundo real. Pero en 1997, dos equipos de científicos tuvieron éxito al realizar el sueño de teleportar un estado cuántico de una partícula.

La teleportación cuántica es un modo de transferir el estado de una partícula a una segunda partícula, que puede encontrarse muy lejos, «teleportando» efectivamente la partícula a otro lugar. En principio, es la misma idea, de momento sólo existente en el reino de la ciencia ficción, por la que el capitán Kirk puede ser «teledevuelto» a la nave espacial *Enterprise* por Scotty, que se halla a bordo de dicha nave.

La teleportación es la aplicación más espectacular que podemos imaginar del fenómeno del entrelazamiento. Recientemente, dos equipos internacionales, uno de ellos dirigido por Anton Zeilinger en Viena y el otro por Francesco de Martini en Roma, han traído la idea de la teleportación cuántica de la imaginación a la realidad,

siguiendo una sugerencia hecha en 1993 por Charles Bennet en un artículo en una revista de física. Bennet mostró que existía la posibilidad física de teleportar el estado cuántico de una partícula.

La razón por la que los físicos empezaron a reflexionar sobre la teleportación fue que en los años ochenta William Wootters y Wojciech Zurek demostraron que una partícula cuántica no puede «clonarse». El teorema de «no-clonación» de Wootters y Zurek afirma que si tenemos una partícula, su estado no puede *copiarse* en otra partícula, *mientras que la partícula original permanece igual*. Por consiguiente, es imposible crear una especie de máquina copiadora que tome una partícula y grave su información en otra, dejando intacta la original. Así pues, la única forma de grabar información de una partícula en la otra comportaba la desaparición en la partícula original de esa misma información. A este hipotético proceso se le llamó después teleportación.

El artículo que describe el espectacular experimento de teleportación del equipo de Zeilinger, «Experimental quantum teleportation», de D. Boumeester, J. W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter y A. Zeilinger, apareció en la prestigiosa revista *Nature* en diciembre de 1997. En él se dice:

El sueño de la teleportación es ser capaz de viajar mediante la simple reaparición en un lugar distante. Un objeto que teleportar puede ser completamente caracterizado por sus propiedades, que en física clásica pueden determinarse mediante la medición. Para hacer una copia de ese objeto en un lugar distante no se necesitan las partes y piezas

originales; todo lo que se necesita es enviar la información «escaneada» de modo que pueda usarse para reconstruir el objeto. ¿Pero hasta qué grado de precisión puede ser ésta una copia fidedigna del original? ¿Qué ocurre si esas partes y piezas son electrones, átomos y moléculas?

Los autores analizan el hecho de que, debido a que estos elementos microscópicos que constituyen los cuerpos se rigen por las leyes de la mecánica cuántica, el principio de incertidumbre de Heisenberg dicta que no pueden medirse con precisión arbitraria. Bennet y sus colaboradores sugerían la idea de teleportación en un artículo de *Physical Review Letters* de 1993, proponiendo que puede ser posible transferir el estado cuántico de una partícula a otra —una teleportación *cuántica*— siempre que la persona que realiza la teleportación *no obtenga ninguna información acerca de dicho estado en el proceso*.

Parece absurdo que cualquier información obtenida por un observador externo pueda influir sobre lo que sucede en una partícula, pero según la mecánica cuántica el mero proceso de *observar* una partícula destruye («colapsa») la función de onda de la misma. El momento y la posición, por ejemplo, no pueden conocerse con cualquier precisión dada. Una vez medido (o actualizado de alguna otra manera), un objeto cuántico ya no está en ese estado borroso en el que se hallan los sistemas cuánticos, y la información se destruye entonces en el proceso de su obtención.

No obstante, Bennet y sus colaboradores tuvieron una brillante idea acerca de cómo podría transferirse la información presente en un objeto cuántico sin medirlo, esto es, sin colapsar su función de onda. La idea era usar el entrelazamiento. He aquí cómo funciona la teleportación.

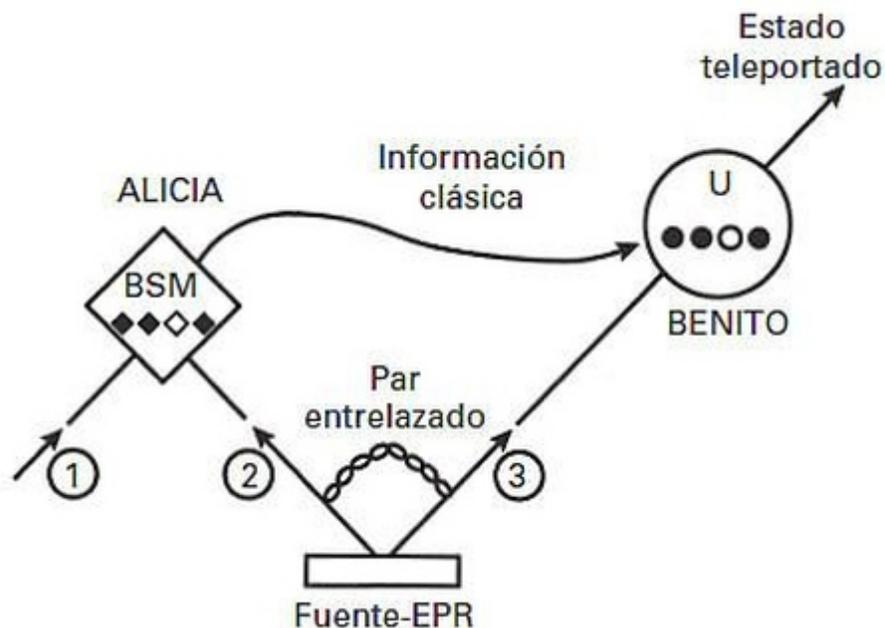
Alicia tiene una partícula cuyo estado cuántico, que ella no conoce, es Q , y desea que Benito que se encuentra en un lugar distante, tenga una partícula en el mismo estado que la suya; esto es, Alicia desea que Benito tenga una partícula cuyo estado sea también Q . No bastaría con que Alicia midiera su partícula porque Q no puede determinarse completamente mediante una medida. Una razón es el principio de incertidumbre, y otra es que las partículas cuánticas se encuentran en una superposición de varios estados a la vez. Cuando se toma una medida, se fuerza a que la partícula pase a uno de los estados de la superposición. Esto se llama el postulado de proyección: la partícula se proyecta sobre uno de los estados de la superposición. El postulado de proyección de la mecánica cuántica hace imposible que Alicia mida el estado, Q , de su partícula de modo que obtenga *toda* la información presente en Q , que es lo que Benito necesitaría a fin de reconstruir el estado de la partícula de ella en su propia partícula. Como es habitual en la mecánica cuántica, al observar una partícula se destruye parte de su contenido de información.

Sin embargo, esta dificultad puede superarse mediante una manipulación astuta, como comprendieron Bennet y sus colegas. Estos investigadores cayeron en la cuenta de que precisamente el

postulado de proyección permite a Alicia teleportar el estado de su partícula, Q , a Benito. El acto de teleportación cuántica envía a Benito el estado de la partícula de Alicia, Q , al tiempo que destruye el estado cuántico de la partícula que ella posee. Este proceso se logra mediante el uso de un par de partículas entrelazadas, una poseída por Alicia (que no es su partícula original con el estado Q) y la otra por Benito. Bennet y sus colegas han demostrado que la información total requerida para que pueda reconstruirse un objeto se divide en dos partes: una parte cuántica y una parte clásica. La información cuántica puede transmitirse instantáneamente (mediante entrelazamiento), pero esta información no puede ser utilizada sin la parte clásica correspondiente, que debe enviarse mediante un canal clásico (habitual), limitado por la velocidad de la luz.

Existen, por tanto, dos canales para el acto de teleportación: uno cuántico y el otro clásico. El canal cuántico consiste en un par de partículas entrelazadas: una está en manos de Alicia y la otra en las de Benito. El entrelazamiento es una conexión invisible entre Alicia y Benito. Dicha conexión es delicada, y debe preservarse manteniendo las partículas aisladas de su entorno. Un tercer compañero, Carlos, proporciona a Alicia otra partícula. El estado de esta nueva partícula es el mensaje que Alicia ha de enviar a Benito. Alicia no puede leer la información y se la envía a Benito, porque, debido a las reglas de la mecánica cuántica, el acto de leer (medida) altera la información de modo impredecible, y no puede obtenerse la totalidad de la misma. Alicia mide una propiedad conjunta de la

partícula que le ha dado Carlos y su partícula entrelazada con la de Benito. A causa de este entrelazamiento, la partícula de Benito responde de modo inmediato, proporcionándole esa información; Alicia comunica el resto de ésta a Benito midiendo la partícula y enviándole la información parcial a través de un canal clásico. Esta información indica a Benito lo que tiene que hacer con su partícula entrelazada para obtener una perfecta transformación de la partícula de Carlos en la suya propia, completándose así la teleportación de la partícula de Carlos. Es digno de tener en cuenta que ni Alicia ni Benito conocen el estado que la primera ha enviado y el segundo recibido, solamente saben que dicho estado se ha transmitido. El proceso se muestra en la figura siguiente.



¿Puede extenderse la teleportación a objetos mayores, como las personas? Los físicos se muestran generalmente reticentes a

responder esta pregunta, considerándola fuera del alcance de la física actual y quizás más propia de la ciencia ficción. Pero muchos desarrollos científicos y tecnológicos se habían considerado fantasías hasta que se hicieron realidad. El entrelazamiento mismo se consideraba algo puramente imaginario, hasta que la ciencia ha probado que es un fenómeno real, a pesar de su extraña naturaleza. En caso de que la teleportación de personas y otros objetos macroscópicos fuera posible, ¿podemos imaginar cómo podría hacerse? Esta pregunta, y la anterior, tocan uno de los mayores problemas no resueltos de la física: ¿dónde se halla la frontera que separa el mundo macroscópico de la experiencia cotidiana y el mundo microscópico de fotones, electrones, protones, átomos y moléculas?

Sabemos por el trabajo de Louis de Broglie que las partículas poseen un aspecto ondulatorio, y que la longitud de onda asociada a una partícula puede calcularse. En consecuencia, incluso una persona puede tener, en principio, una función de onda asociada. (Hay otro punto técnico aquí que no puede discutirse en este libro, y es que una persona o un objeto macroscópico no estaría en un estado puro, sino más bien en una «mezcla» de estados). La respuesta a la pregunta de cómo podría llevarse a cabo la teleportación de una persona puede reformularse como la pregunta: ¿es una persona la suma de muchas partículas elementales, cada una con su función de onda propia, o un objeto macroscópico individual con una única función de onda (de una longitud de onda muy corta)? En el momento presente, nadie tiene una respuesta

clara a esta cuestión, y la teleportación es desde luego un fenómeno real sólo en el dominio de lo muy pequeño.

Capítulo 20

La magia cuántica, ¿qué significa?

Las conclusiones del teorema de Bell son filosóficamente sorprendentes; o se abandona completamente la filosofía realista de la mayoría de los científicos en activo o se revisa drásticamente nuestro concepto de espacio-tiempo.

ABNER SHIMONY y JOHN CLAUSER

Así pues, ¡adiós, elementos de realidad!

DAVID MERMIN

¿Qué significa el entrelazamiento? ¿Qué nos dice acerca del mundo y acerca de la naturaleza del espacio y del tiempo? Éstas son probablemente las preguntas más difíciles de responder de toda la física.

El entrelazamiento destroza todas nuestras concepciones acerca del mundo desarrolladas a través de nuestra experiencia sensorial. Tales nociones de la realidad están tan arraigadas en nuestra psique que incluso el mayor físico del siglo XX, Albert Einstein, fue

inducido por esas nociones cotidianas al error de creer que la mecánica cuántica era «incompleta» porque no incluía elementos que él estaba seguro de que habían de ser reales. Einstein creía que lo que sucede en un lugar no podía estar ligado directamente e instantáneamente con lo que sucede en un lugar diferente. Para entender el entrelazamiento y otros fenómenos cuánticos (o incluso simplemente para aceptar su validez), debemos primero admitir que nuestras concepciones de la realidad en el universo son inadecuadas.

El entrelazamiento nos enseña que la experiencia cotidiana no nos equipa con la capacidad de comprender lo que sucede a escala microscópica, de la cual no tenemos experiencia directa. Greenstein y Zajonc, en *The quantum challenge* (El desafío cuántico), proporcionan un ejemplo que demuestra esta idea. Una pelota de tenis lanzada contra una pared con dos ventanas no puede salir de la habitación pasando por *ambas* ventanas a la vez. Eso es algo que cualquier niño sabe intuitivamente. Y, sin embargo, un electrón, un neutrón e incluso un átomo, cuando encuentran una barrera con dos rendijas en ella pasarán por ambas a la vez. La teoría cuántica destruye la noción de causalidad así como la de imposibilidad de estar en varios sitios al mismo tiempo. La idea de superposición, de «hallarse en dos lugares al mismo tiempo», está relacionada con el fenómeno del entrelazamiento. Pero el entrelazamiento es incluso más espectacular, pues destruye nuestra noción de que la separación espacial tiene sentido. El entrelazamiento puede describirse como un principio de superposición que involucra a dos

o más partículas; es una superposición de los estados de dos o más partículas, consideradas como un sistema. La separación espacial tal como la conocemos parece evaporarse ante un sistema así. Dos partículas que pueden estar separadas kilómetros, o años luz, pueden comportarse de manera coordinada: lo que le sucede a una de ellas le sucede instantáneamente a la otra, sin importar la distancia entre ambas.

¿Por qué no podemos usar el entrelazamiento para enviar un mensaje más rápido que la luz?

El entrelazamiento puede violar el espíritu de la relatividad, pero no de manera que nos permita enviar un mensaje más rápido que la luz. Ésta constituye una distinción importante, que refleja la mismísima naturaleza de los fenómenos cuánticos. El mundo cuántico es aleatorio por naturaleza. Cuando medimos, obligamos a algún sistema cuántico a «escoger» un valor real, saltando de la «borrosidad» cuántica hasta un punto específico. Así, cuando Alicia mide el espín de su partícula a lo largo de una dirección que ella escoge (o, de manera equivalente, mide la polarización de un fotón a lo largo de una dirección que ella escoge), no puede escoger el resultado. El resultado será «arriba» o «abajo», pero Alicia no puede predecir cuál de ellos será. Una vez que Alicia toma la medida, la partícula o el fotón de Benito pasa forzosamente a un estado determinado (espín opuesto a lo largo de esa dirección, para una partícula; la misma dirección de polarización para un fotón). Pero, como Alicia no tiene control alguno sobre los resultados que

obtiene, no le es posible enviar ninguna información con sentido a Benito. La razón de que todo esto pueda suceder es la siguiente: Alicia puede escoger realizar una cualquiera entre muchas medidas, y sea cual sea la que escoja, obtendrá un resultado. Pero ella no sabe anticipadamente cuál de los dos resultados obtendrá. Análogamente, Benito puede escoger la medida que va a tomar y no puede anticipar qué resultado va a obtener. Pero, debido al entrelazamiento, si da la casualidad de que escogen hacer la misma medida, sus resultados impredecibles serán opuestos (suponiendo una medida de espín).

Sólo después de comparar sus resultados (utilizando un método convencional de información, que no puede transmitir ésta a mayor velocidad que la de la luz), pueden Alicia y Benito ver la coincidencia de los resultados.

En apariencia, no hay nada problemático acerca de las correlaciones fuertes; para explicarlas simplemente se introducen «elementos de realidad», como deseaba hacer Einstein. Pero el teorema de Bell nos lleva a la conclusión de que ese tratamiento no funciona.

Abner Shimony se ha referido al entrelazamiento como «pasión a distancia», en un esfuerzo por evadir la trampa de suponer que el entrelazamiento puede usarse de alguna manera para enviar mensajes «supralumínicos» (más rápidos que la luz). Shimony cree que el entrelazamiento aún permite que la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad especial gocen de una «coexistencia pacífica»,

en el sentido de que el entrelazamiento no viola estrictamente la teoría de la relatividad especial (no pueden enviarse mensajes supralumínicos). Sin embargo, otros físicos creen que el «espíritu de la teoría de la relatividad» sí es violado por el entrelazamiento, porque «algo» (sea lo que sea) en efecto «viaja» entre dos partículas entrelazadas más rápidamente que la luz (de hecho, a velocidad infinita). El difunto John Bell era de esa opinión.

Un posible modo de entender el entrelazamiento es evitar completamente contemplar la teoría de la relatividad, y no considerar los dos entes entrelazados como partículas «enviándose mensajes» entre sí. En un artículo titulado «Entrelazamiento cuántico», Yanhua Shih argumenta que, como las dos partículas son (de alguna manera) entes no separados, no se da ninguna violación del principio de incertidumbre, contrariamente a lo sugerido por EPR.

Las partículas entrelazadas trascienden el espacio. Los dos o más entes entrelazados son realmente partes de un sistema, y éste no es afectado por la distancia física entre sus componentes. El sistema actúa como un ente único.

Lo que resulta fascinante en la búsqueda del entrelazamiento es que una propiedad de un sistema cuántico llegara a detectarse por vez primera gracias a consideraciones matemáticas. Es sorprendente que una propiedad tan extraña y ajena al mundo cotidiano se encontrara matemáticamente, lo cual refuerza la creencia en el poder trascendente de las matemáticas. Tras el descubrimiento matemático del entrelazamiento, físicos muy inteligentes usaron

métodos y dispositivos ingeniosos para verificar la existencia real de este sorprendente fenómeno. Pero entender verdaderamente lo que es el entrelazamiento, y cómo opera, está por ahora fuera del alcance de la ciencia. Pues para entenderlo, nosotros, criaturas reales, dependemos de «elementos de realidad», como demandaba Einstein, pero, como el teorema de Bell y los experimentos nos han enseñado, tales elementos de realidad sencillamente no existen. La alternativa a esos elementos de realidad es la *mecánica cuántica*. Pero la teoría cuántica no nos dice por qué las cosas suceden de la forma en que suceden: *por qué* están las partículas entrelazadas. De manera que sólo llegaremos a entender verdaderamente el entrelazamiento cuando podamos responder la pregunta de John Archibald Wheeler: «¿por qué el cuanto?».

Agradecimientos

Estoy muy agradecido a Abner Shimony, profesor emérito de física y filosofía de la Universidad de Boston, por sus muchas horas de ayuda, ánimo y apoyo mientras estaba preparando este libro. Con gran generosidad, Abner me permitió tomar prestados de su colección personal muchos artículos, libros y actas de congresos relevantes para la teoría cuántica y el entrelazamiento. Además no ahorró ningún esfuerzo en responder mis numerosas preguntas sobre el entrelazamiento y la magia de la mecánica cuántica, explicándome muchos hechos oscuros físicos y matemáticos sobre el misterioso mundo cuántico, y contándome la historia de su propio papel en la investigación sobre el entrelazamiento, así como muchas anécdotas relacionadas con la búsqueda de la comprensión de este sorprendente fenómeno. Abner y yo conversamos durante muchas horas en su casa, en el coche, tomando café en algún restaurante, paseando juntos, o ya tarde, de noche, por teléfono, y aprecio enormemente su cariñoso esfuerzo por ayudarme a sacar esta historia adelante, así como en revisar el manuscrito y hacerme muchas sugerencias para su mejora y mayor claridad.

Deseo expresar mi profundo aprecio a Michael Horne, profesor de física en el Stonehill College de Massachusetts, por hacerme partícipe de los detalles de su trabajo con Abner Shimony en el diseño de un experimento para hacer un test de la desigualdad de Bell, su importante trabajo en interferometría de dos y tres partículas y su iluminador trabajo sobre el entrelazamiento de tres partículas con Daniel Greenberger y Anton Zeilinger, conocido

ampliamente como el diseño de GHZ. Le estoy extremadamente agradecido por sus muchas horas de ayuda cuando preparaba este libro, por responder a mis preguntas y por facilitarme el acceso a muchos artículos y resultados importantes. Mike revisó cuidadosamente el manuscrito, corrigió muchos de mis errores y me hizo numerosas sugerencias para mejorarlo. También le agradezco su amabilidad al permitirme adaptar material sobre el entrelazamiento de tres partículas de su «Conferencia de académico distinguido» en el Stonehill College para usarlo en el libro. ¡Gracias, Mike!

Estoy muy agradecido a Alain Aspect, del Centro de Investigaciones Ópticas de la Universidad de París en Orsay, por explicarme su importante trabajo y por enseñarme algunos detalles finos de la teoría de estados entrelazados. Alain me abrió amablemente su laboratorio y me mostró cómo diseñó sus históricos experimentos y construyó su propio equipo, y cómo obtuvo sus impresionantes resultados con fotones entrelazados. Merci, AA.

John Clauser y su colega Stuart Freedman llevaron realmente a cabo el primer experimento diseñado para poner a prueba la desigualdad de Bell en Berkeley en 1972, basado en el trabajo en colaboración con Mike Horne, Abner Shimony y Richard Holt (el famoso artículo de CHSH). Agradezco a John Clauser el haberme hecho partícipe de los resultados de sus experimentos y el haberme facilitado muchos artículos importantes acerca del entrelazamiento, así como varias iluminadoras entrevistas.

En los años siguientes a los experimentos de Clauser y Aspect, varios físicos de todo el mundo obtuvieron nuevos resultados que demostraban la existencia de partículas y ondas de luz entrelazadas. Nicolas Gisin, de la Universidad de Ginebra, produjo fotones entrelazados a gran distancia. Gisin ha demostrado la existencia de fotones entrelazados situados a más de diez kilómetros de distancia entre sí y ha estudiado propiedades muy diversas de los estados entrelazados, así como el uso de éstos en criptografía cuántica y áreas relacionadas. También ha realizado una importante labor teórica sobre el teorema de Bell. Nicolas Gisin tuvo la generosidad de comunicarme los resultados de sus experimentos, y le agradezco efusivamente que me facilitase muchos artículos de su grupo de la Universidad de Ginebra, así como varias esclarecedoras entrevistas.

El entrelazamiento tiene implicaciones de largo alcance, y en la actualidad existen científicos que exploran sus implicaciones en computación cuántica y teleportación. Anton Zeilinger, de la Universidad de Viena, es uno de los líderes científicos en esa área. Él y sus colegas han demostrado que la teleportación es posible, al menos para fotones. La obra de Zeilinger cubre varias décadas e incluye el trabajo pionero en entrelazamiento de tres partículas, realizado junto con Greenberger y Horne (GHZ), así como el intercambio de entrelazamiento y otros proyectos que muestran el extraño mundo de las partículas microscópicas. Estoy muy agradecido a Anton por haberme facilitado amplia información sobre su trabajo y sus logros. También en Viena, estoy agradecido a

Andrea Aglibut, del grupo de investigación de Zeilinger, por haberme proporcionado muchos artículos y documentos relevantes en relación con el trabajo del grupo.

Le doy las gracias al profesor John Archibald Wheeler, de la Universidad de Princeton, por recibirme en su casa en Maine y por discutir conmigo muchos aspectos importantes de la teoría cuántica. El profesor Wheeler tuvo la generosidad de hacerme participe de sus ideas sobre la mecánica cuántica y su papel en nuestra comprensión del funcionamiento del universo. Su visión de la mecánica cuántica en el contexto más amplio de la física y de la cosmología clarificó de manera importante las cuestiones planteadas por Einstein, Bohr y otros acerca del significado de la física y su lugar en las investigaciones humanas sobre la naturaleza.

Agradezco al profesor Yanhua Shih, de la Universidad de Maryland, una interesante entrevista sobre sus proyectos de investigación relevantes para el entrelazamiento, la teleportación y el método de conversión paramétrica a la baja. El profesor Shih y sus colegas tuvieron una importancia decisiva al sacar a la luz algunas de las pruebas más impresionantes de los efectos del entrelazamiento. Le doy las gracias a Yanhua por hacerme partícipe de sus muchos trabajos de investigación.

Agradezco al profesor Daniel Greenberger, de la City University of New York, su información sobre el asombroso diseño experimental de GHZ y la demostración teórica que dio, junto con Horne y Zeilinger, del teorema de Bell de modo espectacularmente simple.

Estoy agradecido a Danny por una amplia información sobre su trabajo.

Doy las gracias al profesor William Wootters, del Williams College, Massachusetts, por una interesante entrevista acerca de su trabajo sobre el teorema de «no-clonación». El teorema de Wootters-Zurek, que prueba que no puede existir una máquina copiadora cuántica que preserve los originales, tiene importantes implicaciones en teoría cuántica, en particular en teleportación.

Estoy agradecido al profesor Emil Wolf, de la Universidad de Rochester, por una discusión sobre los misterios de la luz, y por importantes detalles acerca de su trabajo y el de su difunto colega Leonard Mandel, cuyo trabajo pionero mostró muchas propiedades intrigantes de los fotones entrelazados.

Estoy muy agradecido al profesor P. K. Aravind, del Worcester Polytechnic Institute de Massachusetts, por hacerme partícipe de su trabajo sobre el entrelazamiento. El profesor Aravind ha demostrado algunas consecuencias sorprendentes del teorema de Bell y de los estados entrelazados en varios artículos teóricos. Gracias, P. K., por informarme de tu trabajo y por explicarme algunos aspectos de la teoría cuántica.

Agradezco al profesor Herbert Bernstein, del Hampshire College de Massachusetts, una interesante entrevista acerca del significado del entrelazamiento. Estoy también agradecido a Herb por señalarme el origen alemán y el significado del término original empleado por Schrödinger para describir el fenómeno.

Estoy agradecido al doctor William D. Phillips, del National Institute of Standards and Technology, premio Nobel de física, por una interesante discusión sobre los misterios de la física cuántica y el fenómeno del entrelazamiento, así como por proporcionarme importantes detalles acerca de su trabajo en mecánica cuántica.

El doctor Claude Cohen-Tannoudji⁴¹ se encontró conmigo en París y fue muy generoso con su tiempo y muy esclarecedor. Cohen-Tannoudji es coautor de uno de los manuales clásicos del área, *Mécanique Quantique*, que él y sus colegas estuvieron «ajustando» durante cinco años. Le agradezco su gentileza por hacerme partícipe de su experiencia.

Agradezco a Mary Bell, doctora en física, viuda de John Bell, su cooperación en la preparación del material relacionado con la vida y la obra de su difunto esposo.

Estoy agradecido a Felicity Pors, del Instituto Niels Bohr de Copenhague, por facilitarme el uso de fotografías históricas de Niels Bohr y otros físicos.

No debe culparse a ninguno de los expertos mencionados de cualquier error o punto oscuro que pueda presentar este libro.

Doy las gracias a mi editor y amigo, John Oakes, por su estímulo y apoyo mientras estaba escribiendo el libro, así como al personal de Four Walls Eight Windows: Kathryn Belden, Jofie Ferrari-Adler y John Bae, por su ayuda y dedicación en la edición del mismo. Agradezco a mi esposa, Debra, su ayuda y estímulo.

⁴¹ Asimismo premio Nobel de física. (*N. del t*)

Bibliografía

Gran parte de los trabajos acerca del entrelazamiento y fenómenos físicos relacionados se ha publicado en revistas técnicas y en actas de congresos. A lo largo del texto se ha hecho referencia a los artículos importantes en esas áreas. A continuación se presenta una lista de referencias más accesibles y más apropiadas para el lector medio; en ella se incluyen solamente libros que el lector puede obtener en una buena biblioteca científica o encargarse en una librería especializada. A los lectores con un interés más profundo, y más técnico, en el tema les puede interesar consultar también algunos de los artículos citados en el texto, en particular los publicados en *Nature*, *Physics Today* y algunas otras revistas de carácter expositivo.

Libros relacionados con el entrelazamiento y la mecánica cuántica

Bell, J. S., *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Nueva York, 1989. (Hay traducción castellana: *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, traducción y prólogo de José L. Sánchez Gómez, Alianza Editorial, Madrid, 1990.) Este libro contiene gran parte de los trabajos de Bell sobre mecánica cuántica.

Bohm, D., *Causality and chance in modern physics*, Filadelfia, University of Pennsylvania Press, 1957.

— *Quantum theory*, Dover, Nueva York, 1951.

Cohen, R. S., M. Horne y J. Stachel, eds., *Experimental metaphysics: quantum mechanical studies for Abner Shimony*, vols. I y II, Kluwer Academic Publishing, Boston, 1999. Estos volúmenes, un homenaje a Abner Shimony, contienen muchos artículos sobre el entrelazamiento.

Cornwell, J. F., *Group theory in physics*, Academic Press, San Diego, 1997.

Dirac, P. A. M., *The principles of quantum mechanics*, Clarendon Press, Oxford, 1967. (Hay traducción castellana: *Principios de mecánica cuántica*, traducción de Antonio Montes, Ariel, Barcelona, 1968.)

Fölsing, A., *Albert Einstein*, Penguin, Nueva York, 1997.

French, A. P. y G. Taylor, *An introduction to quantum physics*, Norton, Nueva York, 1978.

Gamow, G., *Thirty years that shook physics*, Dover, Nueva York, 1966.

Gell-Mann, M., *The quark and the jaguar*, Freeman, Nueva York, 1994. (Hay traducción castellana: *El quark y el jaguar*, traducción de A. García y R. Pastor, Tusquets, Barcelona, 1995.)

Greenberger, D., L. Reiter y A. Zeilinger, eds., *Epistemological and experimental perspective in quantum mechanics*, Kluwer Academic Publishing, Boston, 1999. Este libro contiene muchos artículos sobre el entrelazamiento.

Greenstein, G. y A. G. Zajonc, *The quantum challenge: modern research on the foundations of quantum mechanics*, Jones and Bartlett, Sudbury, MA, 1997.

Heilbron, J. L., *The dilemmas of an upright man: Max Planck and the fortunes of German science*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1996.

Hermann, A., *Werner Heisenberg 1901-1976*, Inter-Nations, Bonn, 1976.

Ludwig, G., *Wave Mechanics*, Pergamon, Nueva York, 1968.

Macrae, N., *John von Neumann: the scientist genius who pioneered the modern computer, game theory, nuclear deterrence and much more*, American Mathematical Society, Providence, RI, 1992.

Messiah, A., *Mécanique Quantique*, Masson, París, 1959. (Hay traducción castellana: *Mecánica Cuántica*, traducción de Carmen de Azcárate y Jaime Tortella, Paraninfo, Madrid, 1983a).

Moore, W., *Schrödinger: life and thought*, Cambridge University Press, Nueva York, 1989.

Pais, A., *Niels Bohr's times in physics, philosophy and politics*, Clarendon Press, Oxford, 1991.

Penrose, R., *The large, the small and the human mind*, Cambridge University Press, Nueva York, 1997. (Hay traducción castellana: *Lo grande, lo pequeño y la mente humana*, traducción de Javier García Sanz, Cambridge University Press, Madrid, 1999.) Interesante discusión de temas de relatividad y mecánica cuántica, que incluye comentarios de Abner Shimony, Nancy Cartwright y Stephen Hawking.

Schilpp, P. A., ed., *Albert Einstein, philosopher scientist*, Library of Living Philosophers, Evanston, IL, 1949.

Spielberg, N. y B. D. Anderson, Seven ideas that shook the universe, Wiley, Nueva York, 1987.

Styer, D., The strange world of quantum mechanics, Cambridge University Press, Nueva York, 2000.

Tomonaga, S. I., Quantum mechanics, vols I y II, North-Holland, Amsterdam, 1966.

Waerden, B. L. van der, ed., Sources of quantum mechanics, Dover, Nueva York, 1967.

Wheeler, J. A. y W. H. Zurek, eds., Quantum theory and measurement, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1983. Una soberbia colección de artículos de mecánica cuántica.

Wick, D., The infamous boundary: seven decades of heresy in quantum physics, Copernicus, Nueva York, 1996.

Fotografías



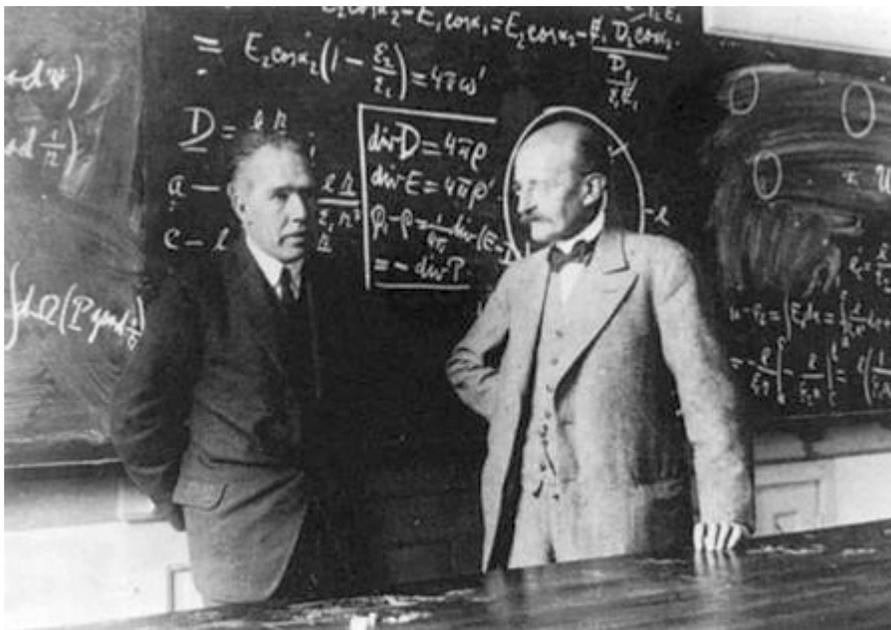
Niels Bohr y Albert Einstein en el congreso Solvay de 1930. Cortesía del archivo de Niels Bohr, Copenhague.



Niels Bohr y Werner Heisenberg en el Tirolo, 1932. Cortesía del archivo de Niels Bohr, Copenhague.



Heisenberg y Bohr en el congreso de Copenhague de 1936. Cortesía del archivo de Niels Bohr, Copenhague



Niels Bohr con Max Planck en Copenhague, 1930. Cortesía del archivo de Niels Bohr, Copenhague, 1921



Max Planck en 1921. Cortesía del archivo de Niels Bohr, Copenhague



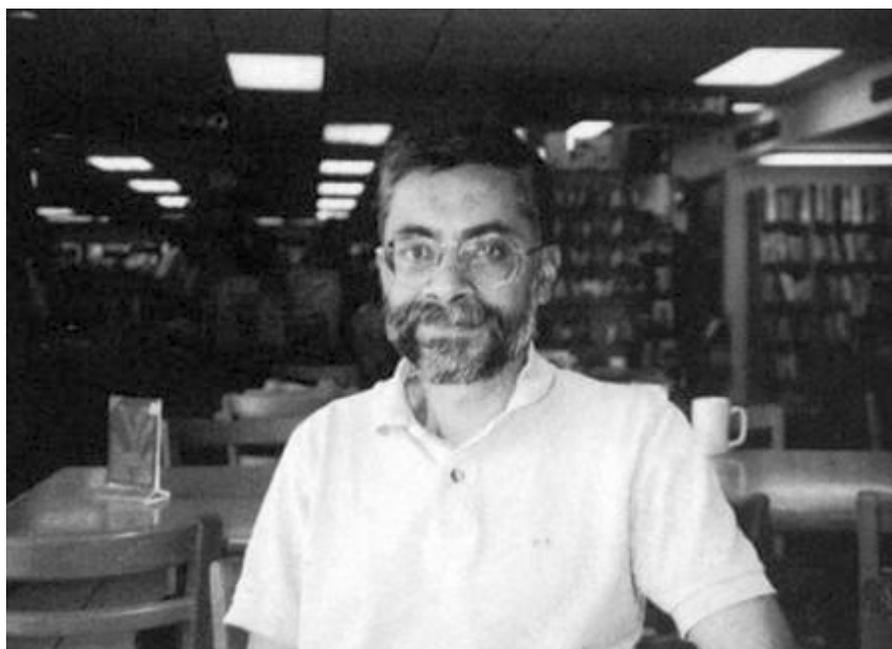
Erwin Schrödinger. Cortesía del archivo de Niels Bohr, Copenhague



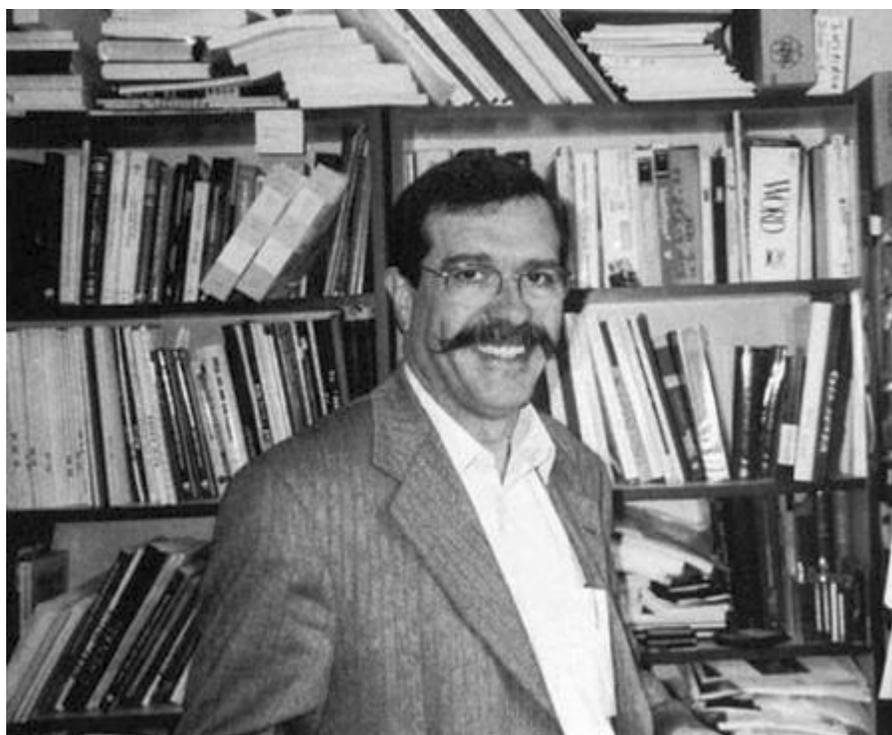
John Bell. Cortesía de Mary Ross Bell



Zeilinger, Horne y Greenberger. Cortesía de Amir Aczel



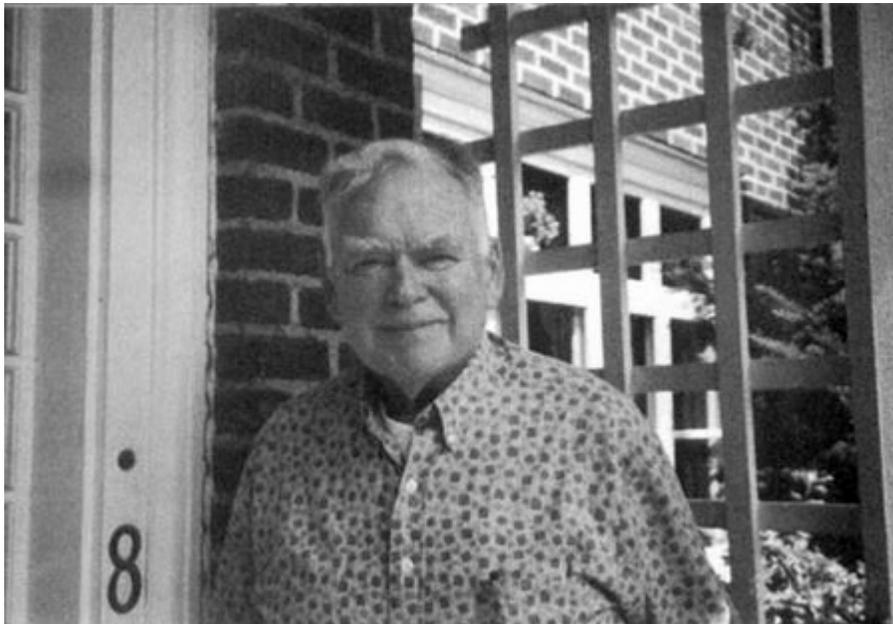
P. K. Aravind. Cortesía de Amir Aczel



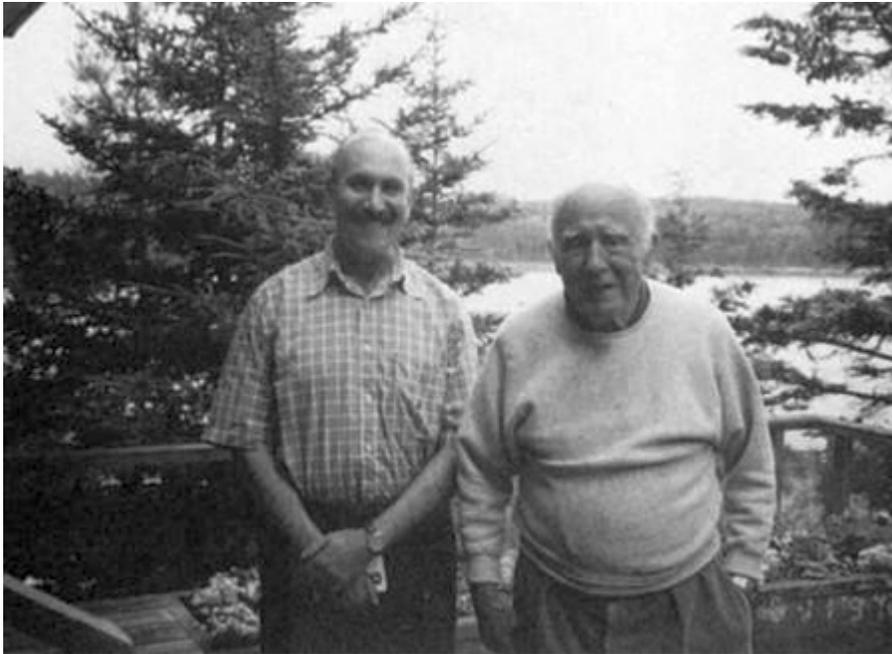
Alain Aspect en su despacho en Orsay, Francia. Cortesía de Amir Aczel



Carol y Michael Horne, Anton y Elisabeth Zeilinger, en Cambridge, Massachusetts, en 2001. Cortesía de Amir Aczel



Abner Shimony. Cortesía de Amir Aczel



John Archibald Wheeler (derecha) con el autor, en la terraza de la casa de Wheeler en Maine. Cortesía de Debra Gross Aczel