

# DE MEDICIONES, INCERTIDUMBRE Y REALIDAD: EL PREMIO NOBEL DE FÍSICA DE 2022

DE MEDICIONES, INCERTIDUMBRE Y REALIDAD: EL PREMIO NOBEL DE FÍSICA DE 2022

O. DE MELO<sup>a,b†</sup>

a) Facultad de Física, Universidad de La Habana, Habana, CP. 10400, Cuba; odemelo@gmail.com<sup>†</sup>

b) Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, A.P. 70-360, Coyoacán 04510, México D. F.

† autor para la correspondencia

Recibido 28/4/2022; Aceptado 20/11/2022

Con motivo del Premio Nobel de Física de 2022, en este trabajo se hace un recuento de los hitos fundamentales relacionados con algunos problemas en los fundamentos de la Física Cuántica. Luego de un breve esbozo histórico, se discuten la superposición de estados, el carácter aleatorio de las mediciones, la encriptación y entrelazamiento cuánticos, y el fenómeno de la teletransportación cuántica. Además, se analiza el significado de la paradoja Einstein-Podolski-Rosen y del teorema de Bell. Se describen algunos de los experimentos realizados por los premiados de 2022 para analizar el cumplimiento o la violación de la desigualdad de Bell y, por tanto, la resolución del conflicto entre las teorías de las variables ocultas locales y la Física Cuántica. Finalmente, se comenta sobre algunas de las más relevantes interpretaciones de la Física Cuántica como la de los universos múltiples, la mecánica de Bohn, y, desde luego, la interpretación de Copenhague.

In the wake of the 2022 Nobel Prize in Physics, this paper recounts the fundamental milestones related to some problems in the foundations of Quantum Physics. After a brief historical journey, the superposition of states, the random character of measurements, quantum encryption and entanglement and the phenomenon of quantum teleportation are discussed. The meaning of the Einstein-Podolski-Rosen paradox and Bell's theorem are also analyzed. Some of the experiments carried out by the 2022 laureates aimed at analyzing the fulfillment or violation of Bell's inequality and the resolution of the conflict between local hidden variables theory and Quantum Physics are described. Finally, some of the most relevant interpretations of Quantum Physics are discussed, such as those of multiple universes, Bohn's mechanics and, of course, the Copenhagen interpretation.

PACS: Quantum entanglement (entrelazamiento cuántico), 03.65.Ud; Bell inequalities (desigualdades de Bell), 03.65.Ud; Philosophy of science (filosofía de la ciencia), 01.70.+w

## I. INTRODUCCIÓN

En el pasado, algunos temas exóticos de la Física Cuántica (FC) han sido relegados a un segundo plano. Durante mucho tiempo fueron circunscritos más bien al campo de la metafísica o la filosofía y su estudio pareció a veces, en opinión de muchos físicos (y también de no físicos), una especie de entretenimiento, en gran medida inútil. Sin embargo, ingentes esfuerzos científicos han hecho que estos temas hayan renacido, no sólo en la física (donde surgieron), sino también en la tecnología avanzada. La criptografía cuántica, por ejemplo, es hoy una aplicación vigente de esos problemas exóticos. Por su parte, la computación cuántica, si bien aún en sus inicios como tecnología, ofrece potencialidades que, de confirmarse, pudieran dar lugar a cambios decisivos en las más diversas prácticas humanas. El premio Nobel de Física de 2022 ha sido adjudicado a Alain Aspect (Francia), John F. Clauser (Estados Unidos) y Anton Zeilinger (Austria), tres científicos que han contribuido a que esos temas exóticos hayan pasado a ser parte importantísima de la ciencia constituida.

Luego de un brevísimo esbozo histórico, aquí se expondrá la evolución de temas tales como la incertidumbre de las mediciones, la superposición, el entrelazamiento y la teletransportación cuánticas. Siempre que se pueda, se tomará como ejemplo la polarización de los fotones, con lo

que se pretende mostrar que contenidos de este tipo pudieran ser introducidos en los cursos de física general o incluso en la enseñanza media. De hecho, un objetivo de este trabajo es generar entusiasmo hacia el estudio y la difusión de estos temas y, en particular, a su introducción en la enseñanza de la física en los diferentes niveles y en las diferentes carreras universitarias: desde las ingenierías hasta la filosofía. Se describirán los principales hitos en los debates que a lo largo de la historia se han generado en el tema: desde las paradojas de Einstein-Podolski-Rosen-Bohn y del gato de Schrödinger, hasta la desigualdad de Bell, y se describirán los principales experimentos protagonizados por los laureados con el Nobel de Física de 2022. Finalmente, se comentará sobre algunas de las más relevantes interpretaciones de la Física Cuántica como la de los universos múltiples, la mecánica bohmiana, y la interpretación de Copenhague. Se incluye un anexo con las direcciones de algunos recursos educativos en-línea relacionados con estos temas, de muy reciente aparición en la red de redes, que incluyen "juegos cuánticos," y demostraciones virtuales.

## II. ESBOZO HISTÓRICO

Los trabajos de Max Planck presentados entre octubre y diciembre de 1900 en la Sociedad Alemana de Física dieron comienzo a una nueva era dentro de la Física. Para encontrar una ley de la radiación del cuerpo negro, Planck había seguido

el algoritmo de la estadística de Boltzmann según el cual se consideraba que la energía de los osciladores armónicos era un múltiplo de una cierta cantidad finita,  $\epsilon$ . Sólo que, al contrario de Boltzmann, Planck se abstuvo de tomar el límite  $\epsilon \rightarrow 0$  al final del cálculo para que la teoría pudiera ajustarse a los resultados experimentales, o sea, para que la densidad de energía radiante no tendiera a infinito a altas frecuencias [1]. Esto fue catalogado por el propio Planck años después como un “acto de desesperación” y considerado como un error por algunos de sus ilustres contemporáneos (incluyendo aquellos pocos que en el continente europeo aceptaban la teoría cinético-molecular en la que se basaba la estadística de Boltzmann). Cuatro largos años transcurrieron en los que la teoría que iría a revolucionar la ciencia se mantuvo prácticamente desconocida. Fue Albert Einstein en uno de sus famosos artículos de 1905 que la llevó un paso adelante con la suposición de que no sólo los osciladores, sino la radiación misma se componía de paquetes discretos de energía [2] con lo cual dio explicación al efecto fotoeléctrico y a la fotoluminiscencia, que no se ajustaban a las predicciones de la física clásica. El próximo paso importante en la teoría cuántica fue el modelo del átomo, publicado por Niels Bohr en 1913, que incluía la hipótesis de la cuantización de la energía de los átomos [3] para resolver las contradicciones del modelo previo de Ernest Rutherford [4], con la teoría del electromagnetismo. Este período inicial de la historia de la FC se considera completado con la introducción del espín del electrón por Wolfgang Pauli [5]. Una colección de los trabajos más importantes de este período inicial de desarrollo de la teoría puede encontrarse en la ref. [6]. El próximo avance de la teoría fue la formalización matemática, debida a Werner Heisenberg [7] y Erwin Schrödinger [8] entre 1925 y 1926. Este último basó su formulación en una propuesta previa de Louis de Broglie [9] en la que asociaba ondas (de Broglie las llamó “ondas de phase”) al movimiento de las partículas. Schrödinger también demostró más adelante la equivalencia de su formulación ondulatoria con la de Heisenberg. Por esa época empezaron los debates sobre los fundamentos de la FC.

### III. LA POLARIZACIÓN DE LA LUZ Y LA FÍSICA CUÁNTICA

Según la ley de Malus, si  $I_0$  es la intensidad de la luz cuya dirección de polarización forma un ángulo  $\theta$  con el eje de un material polarizador (analizador), la intensidad que atraviesa el analizador se puede calcular como  $I = I_0 \cos^2 \theta$ . Si en vez de un analizador común tenemos un analizador de dos canales, por ejemplo, un cristal de calcita, la luz incidente se dividirá en dos haces: uno con dirección de polarización a lo largo del eje óptico del cristal (rayo ordinario) y otra con dirección perpendicular. Las intensidades de los haces serán  $I = I_0 \cos^2 \theta$  e  $I = I_0 \sin^2 \theta$ , respectivamente, de modo que la intensidad total será igual a la intensidad de la luz antes de pasar el polarizador. Asimismo, si es luz natural lo que llega al analizador (o sea luz con componentes de polarización distribuidas aleatoriamente en cualquier dirección perpendicular a la de propagación), la intensidad luego del paso por el analizador será  $I_0/2$ . En el caso de un polarizador de dos canales, será esa misma intensidad en cada

canal, o sea en cada dirección de polarización. Esto es tema de estudio de cualquier curso universitario de Física General, incluso en la enseñanza media superior.

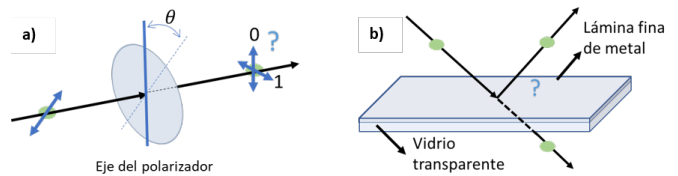


Figura 1. a) Si un fotón tiene una polarización que forma un ángulo  $\theta$  con el eje de un polarizador, emergerá del mismo o bien con polarización vertical o bien no emergerá, pero no es posible predecir a-priori cuál de las dos opciones ocurrirá. Sólo se puede conocer la probabilidad de cada caso. La probabilidad del resultado que hemos llamado “0” o polarización vertical es  $\cos^2 \theta$  mientras que la posibilidad del resultado “1” o polarización horizontal es  $1 - \cos^2 \theta$  (en este caso el fotón no emerge del polarizador). Se dice que la polarización del fotón no está definida: el fotón está en un estado de superposición de las polarizaciones vertical y horizontal. b) Un haz de luz se divide por medio de una lámina semitransparente, una parte se refleja y otra se transmite. Para un determinado ángulo las intensidades de los dos haces son iguales. Cada fotón que llega “elige” transmitirse o reflejarse; no se puede predecir a-priori cuál de las dos opciones “elegirá”. En este caso lo que se indefin en el fotón incidente es la dirección con la que emergerá de la lámina; el fotón está en un estado de superposición entre las dos direcciones.

Para introducir la FC en este asunto y empezar a encarar los tópicos extraños que contiene, podemos suponer que disminuimos mucho la intensidad de la luz incidente en el analizador hasta que los fotones que componen el haz de luz vayan llegando de uno en uno (en la actualidad existen fuentes de fotones individuales, esto ha dejado de ser una suposición teórica) y que, para simplificar nuestra explicación, el eje óptico del analizador es vertical, como se muestra en la Fig. 1 a). ¿Qué ocurre con un fotón polarizado en una dirección que forma un ángulo  $\theta$  con el eje del analizador? ¿Emerge del polarizador con polarización vertical, o no emerge? Esta es una pregunta clave para introducir de manera natural la incertidumbre involucrada en una medición de un objeto cuántico: no hay forma de saber con certeza con qué polarización va a emerger el fotón del analizador. Para cumplir con la ley de Malus, tendremos que suponer que, de un gran número  $N$  de fotones incidentes, una fracción igual a  $\frac{N_v}{N} = \cos^2 \theta$  emergerá con polarización vertical y otra fracción,  $\frac{N_H}{N} = \sin^2 \theta$  no emergerá. Pero, para un número grande de fotones,  $N_H/N$  y  $N_v/N$  son, respectivamente, las probabilidades de que un fotón no emerja del analizador, o que emerja con polarización vertical. Esto es lo más que podemos saber de un fotón que incide en un polarizador: la probabilidad de que su polarización a la salida sea vertical y atraviese el analizador, o sea horizontal y no lo atraviese. Lógicamente, si el ángulo es  $45^\circ$ , estas probabilidades son iguales a  $1/2$ : como promedio, la mitad de las veces el fotón saldrá con polarización vertical y la mitad de las veces con no emergerá del analizador. Una pregunta sobre la dirección que tendrá la polarización del fotón al salir del analizador no tiene respuesta. Esa información no existe a priori: la FC no es determinista en ese sentido (al menos según su interpretación más extendida). De hecho, midiendo la polarización de una colección de fotones que emergen del polarizador en las condiciones antes descritas, se obtendrá una lista perfecta de número aleatorios.

Cualquier divisor de haz permite hacer un análisis semejante al anterior. Por ejemplo, una placa semitransparente, como puede ser un portaobjetos de vidrio sobre el que se ha depositado una fina capa de metal, divide el haz incidente en uno transmitido y uno reflejado (Fig. 1b). En este caso, la magnitud incierta es la dirección en la que va a emerger el fotón, que puede ser reflejado o transmitido. Un análisis similar se puede llevar a cabo también con el famoso experimento de la doble rendija (del cual comentaremos más adelante) o con el llamado espín de iones (en este caso la magnitud incierta será el espín y las veces del divisor de haz las haría un detector de Stern/Gerlach que divide el haz de partículas en dos direcciones diferentes una para cada valor del espín).

Una partícula de este tipo constituye lo que se conoce como un q-bit (abreviatura de bit cuántico). Por ejemplo, si nombramos como 0 la polarización vertical (a lo largo del eje del analizador) y como 1 la horizontal, podemos escribir, utilizando la notación de Dirac, la componente de polarización de la función de onda del fotón como:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son las amplitudes de probabilidad para los estados  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ , respectivamente. Según vimos arriba, las probabilidades correspondientes son:  $\alpha^2 = \cos^2\theta$ ;  $\beta^2 = 1 - \cos^2\theta$ <sup>1</sup>. Obsérvese que la dirección del eje del polarizador define lo que se conoce como base en la que se realiza la medición. En este caso la base, que llamaremos “base vertical” está compuesta por los vectores  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  y, desde luego, los valores de las amplitudes de probabilidad dependerán de la base que se emplee. Por ejemplo, si utilizamos una base que llamaremos “diagonal” (polarizador girado 45° respecto de la vertical) las amplitudes de probabilidad serán ahora diferentes. Una vez que se realiza una medición de la polarización se dice que la función de onda se proyecta sobre uno de los vectores base, o que colapsa en uno de los vectores base.

Esta aleatoriedad, que ha sido el gran motivo de debate entre físicos -como veremos a continuación- permite la realización de lo que se conoce como encriptación cuántica.

#### IV. ENCRIPCIÓN CUÁNTICA

Definamos que un fotón polarizado en la dirección vertical que corresponde con un 1, como se ilustra en la Fig. 2a (la dirección de polarización del fotón se indica por la flecha roja). Podremos detectarlo colocando un polarizador o vertical u horizontalmente, como se indica por las flechas negras, o sea midiendo con una base vertical. En este caso se dice que el estado de polarización del fotón es una auto-función en la base vertical. Si colocamos el eje del polarizador verticalmente y pasa la luz, sabemos que tenemos un 1 o si lo colocamos horizontalmente y no pasa también sabremos que tenemos un 1. (estamos suponiendo un polarizador de un solo canal, por simplicidad). O sea, si conocemos la dirección inicial y utilizamos la base adecuada, no existe incertidumbre

<sup>1</sup>En realidad, las amplitudes de probabilidad se presentan con mayor generalidad multiplicadas por una exponencial compleja que es el llamado término de fase. Por simplicidad, y porque no afecta el valor de la probabilidad, hemos omitido este factor aquí.

en la medición. Lo mismo pasa con un fotón polarizado horizontalmente y medido con una base vertical (Fig. 2b). Una explicación similar existe si tenemos fotones polarizados formando ángulos de 45° con la vertical y utilizamos una base diagonal para medirlos, como se muestra en la Fig. 2c,d). Supongamos que los fotones en a) y c) representan UNOS y en b) y d) representan CEROS. En el caso de Fig. 2e), el fotón tiene polarización vertical, pero está medido con una base diagonal, por lo que en este caso la función de onda no es una auto-función de la base, y la medición es incierta: el fotón se proyectará aleatoriamente como un UNO o un CERO. Como promedio, la mitad de las veces se obtendrá un UNO y la mitad un CERO. Veamos cómo funciona la encriptación cuántica. Supongamos una situación hipotética donde Alicia debe enviar una clave a Basilio.

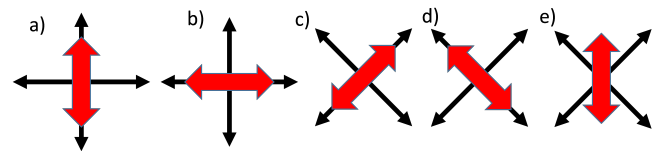


Figura 2. Se muestran fotones con diferentes direcciones de polarización medidos con diferentes bases. En (a-d), las polarizaciones son auto-funciones de las bases correspondientes, y la medición no presenta incertidumbre. En e), el fotón está polarizado verticalmente y es medido con una base diagonal, por lo que el resultado es incierto en el sentido que se explica en el texto.

PASO I. Alicia envía una cadena de CEROS y UNOS (de aquí saldrá la clave de la encriptación), para ello usa arbitrariamente una base u otra (rectilínea o diagonal) alternativamente. Por ejemplo, envía la lista que se muestra en el panel superior de la Fig. 3, en las bases que se indican en la línea de abajo, en amarillo, por lo que las polarizaciones son las que se muestran en rojo en la tercera línea. Por ejemplo, el primero de la lista es un CERO en una base diagonal y corresponde con un fotón polarizado diagonalmente, el segundo es un UNO en una base vertical, y así.

Esos mismos fotones los recibe Basilio, pero como él no sabe qué base usó Alicia, puede medirlos bien, o puede medirlos mal. Por ejemplo, los resultados de Basilio se muestran en la Fig. 3b). Él ha medido el primer fotón que tenían polarización diagonal, con un base diagonal y ha acertado en encontrar un CERO. Sin embargo, el segundo fotón que venía con polarización vertical lo ha medido con una base diagonal, y ha fallado, pues ha medido un 1 y en realidad era un CERO. No siempre erra cuando mide con la base equivocada porque el resultado es aleatorio, por ejemplo, en el fotón 12 él ha medido con una base vertical un fotón con polarización diagonal, y ha acertado (de “chiripa”) (para una lista grande, acertará la mitad de estos casos).

PASO II. Alicia y Basilio intercambian la lista de bases (no los resultados) a través de un canal público. Entonces desechan los bits medidos con bases distintas y se quedan con lo que se conoce como clave en bruto. Si todo estuvo bien, y los bits no se cambiaron en el camino (no ruido) y si no hubo ningún ataque de intruso, las dos cadenas de bits de Alicia y Basilio

deben coincidir. Si no hubo ruido, pero hubo un ataque de intruso, que leyó la información y obtuvo los bits mediante bases aleatorias (como Basilio) y luego los reenvió a Basilio, entonces los bits que deberían coincidir no coinciden todos.

PASO III. Para saber si hubo intervención del espía, Alicia y Basilio intercambian públicamente una parte de los bits (los cuales después serán desechados). Si resultan iguales o muy parecidos, entonces continúan, si resultan diferentes abortan el proceso, pues perciben que hubo un ataque. Esto se conoce como autenticación. Esta clave podrán usarla entonces usar para cifrar los mensajes. Este protocolo fue creado por Bennett y Brassard en 1984 y se conoce como protocolo BB84.



Figura 3. Se representa el proceso de encriptación cuántica según el protocolo BB84. En el panel superior se muestra el primer paso: Alicia envía un grupo de bits codificados en la polarización de los fotones. Ella ha utilizado las bases que se indican en amarillo en la segunda línea y los fotones tienen la dirección de polarización que se indica en rojo en la tercera línea. En el panel central se muestra la recepción de Basilio. También aquí se pueden apreciar en amarillo las bases que utilizó. Los errores y los aciertos están marcados. Por último, luego de intercambiar las bases, eliminan las medidas con diferentes bases y se quedan con lo que se conoce como clave en bruto. Para saber si hubo alguna intrusión, intercambian algunos bits que luego se desecharán. Finalmente, tienen la clave para cifrar los mensajes.

Nótese que el protocolo se basa en el hecho de que los bits no pueden ser interceptados sin que el destinatario y el remitente se enteren. Esto es porque en el proceso de medición que pueda realizar el intruso, el bit puede modificarse. O sea, tratándose de encriptación cuántica, el intruso no puede suponer que va a espiar los datos que intercepta y que, luego de verlos, los enviará intactos al destinatario para que no se dé cuenta. En esto consiste la seguridad de la encriptación cuántica que a la larga se base en la aleatoriedad del resultado de las mediciones: extraño pero útil, se pudiera decir.

Otra de las ventajas de la superposición se aprecia en los actuales avances de la computación cuántica. Como tecnología está todavía en pañales, pero se está desarrollando muy rápidamente y parece ser muy prometedora para resolver problemas extremadamente difíciles con mucha rapidez. La computación cuántica también saca provecho de la

incertidumbre en los resultados de las mediciones. El llamado q-bit o bit cuántico, que es el elemento básico de este tipo de computación (como lo es el bit en la computación clásica), es simplemente una partícula, un fotón de luz, por ejemplo, que tiene alguna propiedad que no está definida, que es incierta. En el caso del fotón, como describimos arriba, esta propiedad suele ser la polarización que puede tener dos valores, horizontal o vertical, pero que en general está en una superposición de los dos valores de polarización diferentes. En un algoritmo cuántico, un conjunto de estos q-bits con propiedades inciertas sufre una serie de transformaciones hasta que, al final del cálculo, se realiza una medición y, si todo funcionó bien, se obtiene el resultado deseado. También se usan actualmente como q-bits, entre otros, circuitos superconductores o puntos cuánticos. Una de las ventajas de utilizar la FC en la computación es que permite, naturalmente, un cierto paralelismo, pues, al contrario de los algoritmos clásicos de computación, los algoritmos cuánticos procesan a la vez los dos estados del q-bit (en el caso de sistemas de varios q-bits, todos los estados en superposición).

El problema actual con la computación cuántica es que los q-bits son muy frágiles y la menor interacción no deseada hace que se produzca una medición antes de tiempo y se pierda el estado de superposición que los caracteriza y ya no sirven para continuar el cálculo. Por ello, es necesario evitar las interferencias externas y mantenerlos a muy bajas temperaturas. Como las primeras computadoras clásicas, las computadoras cuánticas de hoy ocupan espacios grandes y necesitan condiciones especiales mucho más de las que puede ofrecer una oficina cualquiera. Entre otras compañías, IBM, Intel y Google compiten con computadoras cuánticas que ya están rondando los 100 q-bits y que prometen en el futuro revolucionar muchas cosas, incluso de nuestra vida cotidiana. ¿Quién iba a decir que pudiera ser tan útil la incertidumbre?<sup>2</sup>

#### V. FOTONES ENTRELAZADOS. PARADOJA EPR Y GATO DE SCHRÖDINGER

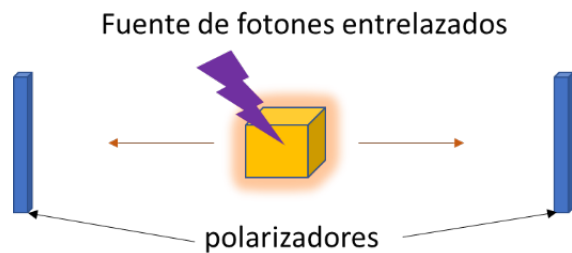


Figura 4. Un cristal no lineal es excitado con un láser muy intenso. En su interior, cada fotón del láser genera dos fotones entrelazados que tienen sus polarizaciones cruzadas.

Para obtener fotones entrelazados lo más común actualmente es usar lo que se conoce como conversión paramétrica espontánea a la baja (SPDC, del inglés spontaneous parametric down conversion) en la que un láser muy intenso se hace incidir sobre un cristal no lineal; dentro de este cristal ocurre que, de un fotón del láser incidente se pueden obtener

<sup>2</sup>Está avanzando tan rápido la computación cuántica que probablemente este último párrafo va a estar ya obsoleto cuando se publique este trabajo.

dos fotones con polarizaciones cruzadas<sup>3</sup>. Un esquema simplificado del proceso se muestra en la Fig. 4. Se dice que estos fotones están entrelazados (entangled es el término usado en inglés). De esta forma si los dos polarizadores están en la misma base (con los ejes verticales u horizontales) y uno mide 0 el otro mide 1 aunque los dos polarizadores estén en los extremos de la galaxia (siempre y cuando los fotones no hayan perdido la exclusividad del entrelazamiento entre ellos debido a la interacción con otros objetos). Nótese que el hecho de que los fotones tengan polarizaciones cruzadas, o sea, que sus polarizaciones estén relacionadas, no tiene nada de particular en sí mismo. Dos fragmentos de igual masa de una granada que ha explotado poseen velocidades contrarias, y eso no causa ningún estupor, es simplemente el resultado de una ley de conservación. La diferencia crucial entre un caso y el otro consiste en que cada uno de los fragmentos de la granada tenía bien definida su velocidad desde el momento de la explosión, independiente de que se le midiera o no. En cambio, los fotones entrelazados solo adquieren un estado de polarización una vez que se miden. Sólo cuando medimos la partícula A que se mueve hacia la izquierda, ella elige por la polarización en una dirección o en la otra aleatoriamente, pero entonces, instantáneamente, se define también la de la otra entrelazada que escogerá la dirección opuesta. Este es el misterio contenido en el entrelazamiento.

La función de onda de dos fotones cualesquiera se puede escribir como:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle)$$

El significado de esta expresión es el siguiente. Una vez que se realiza una medición, el sistema va a colapsar en uno de los cuatro estados  $|00\rangle$ ,  $|01\rangle$ ,  $|10\rangle$  o  $|11\rangle$  con probabilidad  $1/4$ . Esto quiere decir que si medimos el primer fotón y encontramos 0, el segundo fotón podrá resultar como 0 o 1, dependiendo de que el estado combinado sea el primero o el segundo de los cuatro anteriores. Evidentemente estos dos fotones no están entrelazados porque midiendo la polarización de uno, no se puede saber la del otro con exactitud. Consideremos entonces la función de onda siguiente:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$$

Este sistema de dos fotones solo puede colapsar en dos estados combinados:  $|01\rangle$  o  $|10\rangle$ . Si midiéramos el primer fotón y obtuviéramos un 0, esto indicaría que el sistema ha colapsado en el estado  $|01\rangle$  por lo que el segundo fotón resultaría como un 1. Esta representa entonces la función de onda de dos fotones entrelazados como los que describimos arriba. Una función de onda como la siguiente, representaría dos fotones entrelazados de modo que ambos tienen la misma polarización.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle + |11\rangle)$$

Estas propiedades de entrelazamiento, así como el principio de superposición, fueron rechazados en su momento por

<sup>3</sup>En algunos cristales el entrelazamiento consiste en que las polarizaciones son paralelas. Pero esto no cambia el sentido de los argumentos que se darán a continuación.

<sup>4</sup>En este artículo, Einstein mostró la paradoja usando las variables continuas posición y momento de dos partículas entrelazadas, no las polarizaciones de los fotones. La forma más simple de la paradoja que usamos aquí, expresada usando la polarización de los fotones fue introducida más tarde por David Bohm y se conoce a veces como la paradoja EPRB.

Einstein (y otros científicos de la época) que sostenía que la realidad física no podía ser descrita de esa manera. Es curioso, porque como vimos anteriormente, el propio Einstein había sido uno de los iniciadores de la teoría cuántica, 30 años antes de que se introdujera el concepto de entrelazamiento. En 1935, junto a B. Podolsky y N. Rosen, llamó la atención sobre este problema y expresó su desacuerdo en un famoso artículo titulado “¿Puede ser considerada completa la descripción mecano-cuántica de la realidad física?”<sup>4</sup> [10]. Ellos sostenían que la interpretación cuántica suponía una paradoja que luego se conoció con el nombre de paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen (EPR). Esta paradoja consistía precisamente en que, una vez de que se midiera una de dos partículas entrelazadas, la otra respondería instantáneamente y esto violaba el principio de relatividad pues, según este, nada podía propagarse a mayor velocidad que la luz. De hecho, Einstein llamó a este fenómeno “acción fantasmal a distancia”. También exponía la siguiente contradicción (llevada al ejemplo de la polarización de los fotones): si medíamos uno de los fotones con la base, digamos, vertical, este definía su polarización y el de su pareja entrelazada en esa base. Pero si al mismo tiempo medíamos el otro con una base diagonal, estaríamos definiendo la del otro y también la del primero en esa base. Entonces: tendríamos definidas las polarizaciones de cada fotón en las dos bases, lo que está prohibido por las mismas leyes de la FC. En este artículo se concluía que, debido a esto, la FC era incompleta y no podía describir adecuadamente la realidad. Apenas unos meses después Niels Bohr publicaba otro artículo con el mismo título refutando la suposición de Einstein [11]. Los debates entre Einstein y Bohr se prolongaron durante mucho tiempo, y Einstein no llegó a aceptar nunca el carácter probabilístico del resultado de las mediciones en la FC 5. Él solía plantearle a Bohr experimentos mentales (gedankenexperiment) que cuestionaban los fundamentos epistemológicos de la FC. Una descripción detallada de estos interesantes debates entre los dos grandes genios puede encontrarse en la ref. [12]. Una famosa paradoja en relación con el mismo tema fue propuesta en el mismo año 1935 por otro de los fundadores de la FC: Erwin Schrödinger. Se conoce como “la paradoja del gato de Schrödinger” y la describimos a continuación.

Un gato se encuentra encerrado en una cámara de acero junto con un dispositivo que contiene una cantidad muy pequeña de sustancia radiactiva. El estado de la sustancia radiactiva es tal que de acuerdo con los principios de la mecánica cuántica tiene una cierta probabilidad de desintegrarse emitiendo partículas radiactivas o de no desintegrarse. El dispositivo está hecho de manera tal que, si en la sustancia ocurre una desintegración y se produce una partícula radiactiva, un detector de partículas lo descubre y acciona un mecanismo que hace caer un martillo. Este martillo, al caer, rompe un frasco de ácido cianhídrico, que es un gas letal. Del experimento se puede inferir que si la sustancia radiactiva se desintegrara el gato morirá, pero si no,

seguirá vivo. Se considera un tiempo tal que la posibilidad de que hubiera una emisión radiactiva de una partícula sería del 50%. Como, de acuerdo con las propiedades de la mecánica cuántica, la sustancia radiactiva está a la vez desintegrada y no desintegrada mientras no se le mida, entonces el gato estará ¡al mismo tiempo vivo y muerto! en tanto no se abriera la cámara para observarlo (Schrödinger pedía perdón en su artículo por el experimento “anti-gatuno”). Pero uno supone que el gato no puede estar a la misma vez vivo o muerto, que el gato sabrá bien la condición que tiene. Esta paradoja del gato es habitualmente citada en las más importantes publicaciones sobre el tema. Schrödinger la construyó precisamente para demostrar lo absurdo que le resultaba el asunto.



Figura 5. Bohr y Einstein. Probablemente en alguna de sus famosas discusiones acerca de los fundamentos de la FC.

Einstein suponía que la FC estaba incompleta, y que no describía correctamente la realidad. El carácter probabilístico del resultado de la medición para una partícula en superposición entraba en contradicción con la teoría de la relatividad. Faltaba algo, un elemento de realidad, le llamó él, luego se utilizó el nombre de variables ocultas<sup>5</sup>. Las partículas debían tener la información que les “indicaba” que resultado tendría la medición, no se sabría cuáles eran esas variables, pero deberían existir. Aplicado a los fotones, un fotón debía saber que polarización adquirir luego de ser medido por un analizador con el eje en cualquier posición.

## VI. EL TEOREMA DE BELL

A partir de ese año 1935, la situación estaba así: de una parte, la teoría de las variables ocultas locales soportada por Einstein y otros científicos que no aceptaban el carácter probabilístico del resultado de la medición. Por otra parte, estaba la FC tal y como era, sin ningún añadido. De esa otra parte estaban Bohr y Heisenberg (que había sido supervisado por Bohr en su tesis doctoral) que sostenían lo que se ha llamado “interpretación de Copenhague”, haciendo alusión a la ciudad donde radicaba Bohr. Y pasaron los años y el

<sup>5</sup>Hoy se denominan variables ocultas locales. Son aquellas que justificarían que no puede haber una respuesta instantánea entre las parejas de fotones entrelazados.

<sup>6</sup>Existen varias formulaciones del teorema de Bell. En particular, John F. Clauser, uno de los premiados con el Nobel realizó, junto con otros investigadores, modificaciones en la formulación del teorema que hicieron posible su realización experimental. Aquí he escogido una variante simplificada, que no es en realidad la que se ha utilizado en los experimentos pero que contiene el sentido de la propuesta de Bell.

problema parecía no tener solución. La FC, aun cuando era muy extraña, funcionaba perfectamente. Gracias a ella se desarrollaron, por ejemplo, los estudios de Física del Estado Sólido que culminaron con el desarrollo vertiginoso de la electrónica y la informática. Utilizando la FC Einstein predijo la existencia del láser que más adelante fue fabricado y que constituye uno de los grandes éxitos tecnológicos del siglo XX, y de toda la historia. Y aquel problema sobre los fundamentos pareció perder fuerza, e incluso importancia. Tal parecía que los resultados de los experimentos serían idénticos con una teoría de variables ocultas o sin ella, por lo que tal teoría no hacía ninguna falta. Algunos decían que era un asunto para tratar por los filósofos, no por los físicos, que era un tema inútil, hasta frívolo, etc. Se puso de moda la frase “cállate y calcula” que refleja en gran medida el sentimiento de esa época.

Pero la llama encendida con el artículo de Einstein de 1935 quedó en algunos y, 29 años después, en 1964, apareció otro artículo en una revista de poca categoría que ya no existe, llamada “Physics”, escrito por un irlandés de nombre John Stewart Bell, para el que las investigaciones en los fundamentos de la FC eran más bien una afición. En este artículo Bell proponía una forma experimental para probar si existían las variables ocultas o si, al contrario, la FC estaba completa [13]. Era eso que ocurre tan pocas veces en que un problema de la metafísica se traslada a la Física. Es el teorema o desigualdad de Bell. Hay quien dice que es el teorema más profundo de la ciencia.

El experimento en cuestión, ilustrado con polarización de fotones, y simplificado lo más posible, sería algo así como lo siguiente<sup>6</sup>. Tenemos una fuente de fotones entrelazados y dos observadores que tienen analizadores de polarización, preferiblemente de dos canales (en el que dos fotones con polarizaciones cruzadas emergen en direcciones diferentes). Para cada par de fotones los observadores harán una medición de la polarización de cada uno. Sólo que, aleatoriamente, cambiarán la dirección del eje de su analizador utilizando tres direcciones diferentes. Digamos que ellos van a poner indistintamente el eje del analizador vertical, o girado 60° o 120° con respecto a la dirección vertical. Los observadores no se han puesto de acuerdo, por lo que puede ser que uno coloque su analizador vertical y el otro a 60°, o bien que los dos los pongan verticales, y así. Lógicamente, si los dos colocan sus analizadores con el eje en la misma dirección, y los fotones están entrelazados como describimos arriba, encontrarán que las polarizaciones son cruzadas. Pero si los colocan con ángulos diferentes (o sea, miden con diferentes bases) uno del otro, podrán encontrar, eventualmente, en dependencia de los ángulos que elijan, que ambos tienen la misma polarización. Ellos van a anotar para cada fotón, si determinan la polarización paralela al eje o perpendicular (si el analizador es de un solo canal, el fotón que tiene polarización perpendicular no se detecta). Después de muchas medidas sobre las parejas de fotones, van a comparar los

resultados y calcular qué fracción del total de medidas resultó con mediciones de polarizaciones cruzadas, o sea, en qué fracción de las mediciones uno de los observadores encontró “paralelo” y el otro “perpendicular”.

El teorema demuestra que si los fotones tienen de antemano determinada la polarización que mostrarán para un dado ángulo del eje del polarizador (tienen variables ocultas locales), esto impone una restricción y la tal fracción tiene que ser mayor que un cierto valor. Sin embargo, para determinado rango de ángulos, se puede encontrar que, si, por el contrario, los fotones no tienen variables ocultas locales y responden de manera completamente aleatoria a la medición, la fracción resulta en un valor menor. En resumen, en el experimento hay que medir muchas parejas de fotones entrelazados y calcular la fracción del total de mediciones en que se encuentran polarizaciones cruzadas. Si este valor es menor que un cierto número (que se determina en función de los ángulos empleados) entonces no existen las variables ocultas y gana la FC. Esta es la desigualdad de Bell que si se cumple “ganan” las variables ocultas y si se viola “gana” la FC. O sea, en este experimento, la teoría de las variables ocultas locales y la FC producirían resultados diferentes, luego, el asunto perdía su matiz filosófico y se convertía en un problema de la Física práctica.

Esto que he tratado de describir en un párrafo, llevó mucho tiempo para concretarse. La realización de estos experimentos y otros relacionados es lo que ha sido premiado con el Nobel de Física de 2022 que se adjudicó el martes 4 de octubre de 2022 a Aspect, Clauser y Zeilinger.

Clauser fue el primero en realizar un experimento, en 1972, para probar la desigualdad de Bell [14]. Lo hizo usando fotones entrelazados emitidos en cascada por átomos de calcio. Ya en las conclusiones de este primer experimento se puede leer: “... no observamos evidencia de una desviación de la mecánica cuántica... Nosotros consideramos estos resultados como una fuerte evidencia en contra de las teorías de variables ocultas locales”. Ellos habían utilizado polarizadores de un solo canal, que quiere decir que sólo detectaban los fotones cuya polarización era paralela al eje del polarizador. Esto fue criticado como una fuente de error ya que la no detección de los fotones con polarización perpendicular al eje podía también ser debida a la baja eficiencia de los detectores.

Tocó a Aspect, 10 años después, realizar el experimento con analizadores de polarización de dos canales que detectaban tanto el fotón con polarización paralela como perpendicular al eje considerado [15]. Nuevamente el resultado fue a favor de la FC con mucha mejor precisión. Sin embargo, todavía quedaban escapatorias para la teoría de variables ocultas locales. La fuente y los detectores estaban posicionados desde antes de que se emitieran los fotones, esto quería decir que, en principio, pudiera ocurrir alguna comunicación sub-lumínica entre los detectores o entre los detectores y la fuente que permitiera “dar a conocer a los fotones” la información necesaria para ajustar sus polarizaciones al salir de la fuente. De esta forma se pudiera salvar la teoría de variables ocultas. Esta hipótesis era bastante extraña pero no tan extraña como

el resultado mismo que ofrecían los experimentos en relación con la aleatoriedad de los resultados de las mediciones. Fue el mismo Aspect quien, unos meses después, publicara los resultados de un experimento con analizadores que variaban en el tiempo [16]. En este caso utilizó un interruptor óptico que intercambiaba la dirección del haz muy rápidamente entre dos analizadores con lo que lograba que la dirección de los analizadores cambiara mientras los fotones ya estaban volando. De hecho, el tiempo de recorrido de los fotones en la instalación era de 40 ns, mientras que el cambio de los polarizadores se efectuaba en unos 10 ns. Aun así, todavía el experimento dejaba escapatorias, pues el cambio del eje de polarización de los analizadores, si bien realizado mientras las partículas entrelazadas estaban ya en vuelo, ocurría de manera periódica, lo cual lo hacía en cierto modo predecible. Era necesario que la dirección del eje de los analizadores cambiara estrictamente de modo aleatorio, para asegurar que no podía haber ninguna transmisión de información entre los fotones.

Este tipo de experimento tuvo que esperar los avances de la tecnología y fue realizado por el grupo de Anton Zeilinger 15 años después [17]; el esquema de la instalación usada se muestra en la Fig. 5. En este caso, usaron la conversión paramétrica a la baja para obtener los fotones entrelazados en vez de la cascada utilizada en experimentos anteriores. Los detectores fueron situados a 400 m uno de otro en las instalaciones de la Universidad de Innsbruck y el cambio de la dirección de los polarizadores se realizó a través de un modulador electro-óptico rápido controlado por una fuente de número aleatorios. Nuevamente el resultado favoreció a la FC.

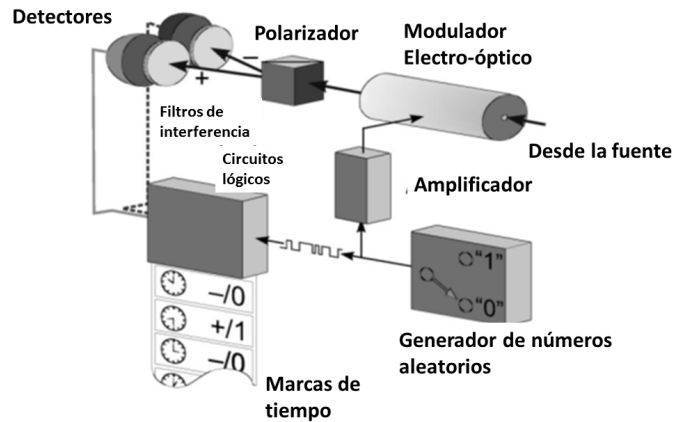


Figura 6. Una de las dos estaciones de detección en el experimento de Zeilinger de 1998. Nótese que un generador de números aleatorios dirige el modulador electro-óptico que cambia rápidamente el plano de polarización de la luz incidente. (La imagen está reproducida con permiso de [17]. Copyright 1998, American Physical Society).

No es ocioso comentar, en el sentido de ilustrar cómo funciona la ciencia, que incluyendo a Bell y a Clauser, muchos de los investigadores que trabajaron en experimentos relacionados con el teorema de Bell partían de la hipótesis de que Einstein estaba en lo cierto, y la FC estaba incompleta. Sin embargo, los obstinados resultados experimentales que obtuvieron, los llevaron a rechazar este supuesto inicial. De hecho, Clauser,

luego de la noticia del Nobel, ante la pregunta de qué le diría a Einstein en vista de sus resultados, expresó algo así como: "lo siento Albert, estabas equivocado, pero yo hice fuerza por ti".

## VII. TELETRANSPORTACIÓN

Se pudiera pensar que el entrelazamiento cuántico permitiría enviar información instantáneamente. Por ejemplo, supongamos que Alicia y Basilio se ponen de acuerdo y van a compartir una sucesión de partículas entrelazadas. Cada vez que Alicia mida su partícula, Basilio podrá medir la suya y encontrará, instantáneamente, un resultado que depende de lo que midió Alicia. Sin embargo, el resultado de la medida realizada por Alicia es completamente aleatorio, por lo que el valor obtenido por Basilio en la otra partícula, también lo será. Así, Alicia enviará (y Basilio recibirá) una lista de ceros y unos completamente aleatoria; y ocurre que una lista aleatoria de números no contiene información. En otras palabras, Alicia no puede decidir que va a enviar un uno, o un cero; lo que envíe serán aleatoriamente UNOS y CEROS. Por esto, la relatividad de Einstein queda a salvo. No hay transmisión de información instantáneamente.

Pero el entrelazamiento puede usarse para enviar información, si bien no a velocidades superiores a la de la luz. El procedimiento que se utiliza es llamado teletransportación cuántica. Obviando los detalles matemáticos, el método consiste en lo siguiente. Supongamos que cada uno de los dos personajes, tienen uno de los fotones de una pareja de fotones entrelazados a los cuales podemos llamar "2" y "3", respectivamente. "2" está en poder de Alicia y "3" en poder de Basilio. Están entrelazados de forma tal que si uno tiene polarización vertical el otro debe tener polarización horizontal, y viceversa, por ejemplo. Hay un tercer fotón que es el que Alicia quiere teletransportar a Basilio al que llamaremos "1." Lo primero que debe hacer Alicia es entrelazar el fotón "2" (que es el que está a su vez entrelazado con el de Basilio) con el fotón "1". Luego debe hacer una medición sobre sus fotones ("1" y "2") y mandarle a decir a Basilio el resultado, o sea, los tipos de polarización (vertical u horizontal) que obtuvo para sus dos fotones. Esta información la manda clásicamente (no se puede mandar de otra manera, pues ninguna información se puede enviar a mayor velocidad que la luz). Digamos que le manda un mensaje de whatsapp o un correo electrónico. Con esta información, Basilio sabrá qué operaciones debe hacer sobre su fotón para que se convierta en una copia idéntica de "1." Luego de estas operaciones el fotón "1" ya no está en su estado inicial; ese estado lo tiene ahora el fotón de Basilio ("3"). Por eso se dice que se ha teletransportado el fotón "1" que estaba inicialmente en manos de Alicia hacia Basilio, que ahora no tiene precisamente el mismo fotón "1", pero tiene uno exactamente igual. Es interesante en este proceso, que ni Alicia ni Basilio, saben cuál es el estado del fotón objeto de la teletransportación. También hay que notar que el estado del fotón "1" no se ha clonado, cosa que no permite hacer la FC. El fotón de Basilio es, luego de la teletransportación, una copia exacta del fotón "1" que tenía Alicia, pero este

ya no tiene las propiedades que tenía antes. La posibilidad de la teletransportación cuántica fue prevista teóricamente en 1993 y el primer reporte de su realización práctica ocurrió en diciembre de 1997 por el grupo de Zeilinger [18]. Teletransportaron la polarización de un único fotón usando el método descrito en el párrafo anterior. Como se describe en este artículo, el proceso de teletransportación se plantea matemáticamente de la siguiente manera. Supongamos que Alicia quiere teletransportar a Basilio el fotón con función de onda:

$$|\psi_1\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Para ello, debe estar en posesión de otro fotón que a su vez está entrelazado con un fotón de Basilio, como explicamos antes, de modo que sus polarizaciones son contrarias. La función de onda de ellos será:

$$|\psi_{23}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + \beta|10\rangle)$$

Para teletransportar el primer fotón, Alicia debe entrelazar los dos fotones que posee (el que quiere teletransportar y el que tiene entrelazado con Basilio). Si el entrelazamiento que obtiene esta caracterizado por la función de onda:

$$|\psi_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + \beta|10\rangle) \quad (1)$$

eso quiere decir que sus dos fotones también tienen polarizaciones contrarias. Pero como la polarización del fotón de Basilio debe ser, a su vez, contraria a la del fotón de Alicia, entonces, su fotón (el "3") adquirirá la misma polarización (o sea, tendrá la misma función de onda) que el fotón inicial de Alicia:

$$|\psi_3\rangle = (|0\rangle + \beta|1\rangle)$$

De modo que se ha efectuado la teletransportación. En este caso particular, no haría falta ninguna comunicación de Alicia hacia Bob, sino que el fotón de Bob se convertiría en uno idéntico al fotón inicial de Alicia, automáticamente. Sin embargo, la comunicación es necesaria por lo siguiente. El entrelazamiento entre los fotones de Alicia, no tiene que responder a la función expresada en la ecuación (1), en realidad existen otras tres posibilidades (las cuatro funciones se conocen como estados de Bell):

$$|\psi_{12}\rangle = \frac{1}{2}(|01\rangle + \beta|10\rangle) \quad (2)$$

$$|\psi_{12}\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle - \beta|11\rangle) \quad (3)$$

$$|\psi_{12}\rangle = \frac{1}{2}(|01\rangle + \beta|10\rangle) \quad (4)$$

por lo que el entrelazamiento mostrado en la ecuación (1) ocurre sólo la cuarta parte de las veces. Alicia, entonces debe avisar que este tipo de entrelazamiento ocurrió, para que Bob esté seguro de que su fotón ahora es igual al que tenía Alicia. Si, en vez de esto, el entrelazamiento obtenido para los fotones de Alicia es del tipo indicado por alguna de las funciones (2-4), el fotón de Basilio no quedará automáticamente en el estado del fotón inicial. Aún en este caso, si Alicia envía la información (clásicamente) sobre el tipo de estado de Bell que encontró, Basilio sabrá qué operaciones realizar sobre su fotón, para que resulte en el estado deseado.



Otro capítulo de esta saga de teletransportaciones fue publicado en 2013 [19] por un grupo internacional de científicos de Dinamarca, España y Gran Bretaña. En este caso la teletransportación se produjo entre dos conjuntos A y B de miles de millones de átomos de cesio. Estos dos conjuntos se encuentran separados a una distancia de unos cincuenta centímetros. Para lograrlo utilizaron un haz de luz que primero se entrelazó con el sistema B y luego con el A con lo que se logró teletransportar las propiedades de A hacia B. O sea, el conjunto A de átomos dejó de tener sus propiedades iniciales y al mismo tiempo, propiedades exactamente iguales aparecieron en el conjunto B. En otras palabras, el conjunto B, distante, pasó a ser una copia exacta de A, al tiempo que A dejó de tener las propiedades que tenía. La distancia a la cual se ha podido obtener teletransportación cuántica ha ido escalando con el tiempo. En 2017 un grupo de investigadores chinos reportaron haber teletransportado la polarización de fotones entre un observatorio en el Tíbet y una estación orbital, a distancias que variaron entre 500 y 1400 km, dependiendo de la posición del satélite [20]. En este experimento, los autores aprovecharon el hecho de que parte del trayecto ocurre en una región de la atmósfera bastante enrarecida lo cual evita la dispersión de los fotones. Se espera que con este método se puedan establecer redes de computación cuántica con vistas a desarrollar el internet cuántico global.

Debo aclarar que la teletransportación solo ocurre para las partículas cuánticas, todavía no podemos emular a Harry Potter ni al hombre mosca, y tal vez nunca podamos. Aun así, los resultados de estos experimentos son muy sorprendentes.

## VIII. LAS INTERPRETACIONES

El hecho de no haber podido conciliar los resultados de los experimentos con la teoría de las variables ocultas locales, nos devuelve a la situación que molestaba a Einstein. La existencia de esta situación, que algunos consideran inquietante, se pone de manifiesto más dramáticamente si suponemos la división espacial de un haz de fotones individuales. Veamos, por ejemplo, el famoso experimento de la interferencia de la doble rendija realizado con un flujo de fotones individuales. Ya se sabe que cada fotón está representado por una función de onda extendida en el espacio, y “pasa” a través de las dos rendijas. Por esto, un sólo fotón interfiere consigo mismo en la forma predicha por Thomas Young para la luz concebida como una onda clásica. Sin embargo, cuando realizamos una medición de la posición del fotón, su función de onda colapsa en un punto, o lo que es lo mismo, el fotón se mide como una partícula concentrada en el espacio. Si la medición se hace justo detrás de una de las rendijas (colocando un detector allí, por ejemplo) encontraremos que el fotón pasa por esa rendija la mitad de las veces. Lo mismo si medimos justo en la otra rendija. Pudiéramos pensar entonces que cada fotón no pasa por las dos rendijas sino por una sola, pero ¿cómo explicar entonces la formación de un patrón de interferencia? Porque si los fotones van pasando de uno en uno, y cada uno por una rendija, ¿con quién interfieren? De hecho, si no ponemos el detector detrás de la rendija sino ponemos, digamos, un dispositivo de carga acoplada (CCD, charge

coupled device, por sus siglas en inglés) en la región de la pantalla, se observará que cada fotón irá a parar también a un punto. Sin embargo, cuando hayan pasado muchos fotones, veremos que los lugares a donde fue a parar cada uno, son una representación del patrón de máximos y mínimos de interferencia que predice un comportamiento ondulatorio. O sea, como no hemos medido justo en las rendijas, ahora la función de onda no ha colapsado allí, sino que el electrón ha pasado a través de las dos rendijas y ha colapsado en la pantalla, donde hemos hecho la medición. Esto quiere decir que el hecho de que el fotón atravesase una rendija o las dos depende de cómo midamos. Einstein decía, ¿cómo es que la Luna no está allí cuando no la miramos? Heisenberg ha escrito, sorprendentemente: “En los experimentos sobre los acontecimientos atómicos, tenemos que vérnoslas con cosas y hechos, con fenómenos que son tan perfectamente reales como los de la vida cotidiana. Pero los átomos o las mismas partículas elementales no son tan reales; constituyen un mundo de potencialidades o posibilidades más bien que uno de cosas o de hechos” [21]. Por su parte, y en la misma línea, Richard Feynman ha comentado: “...el electrón es una teoría, pero la teoría es tan buena, que casi podemos considerarlo real”.

Hoy se cree que la existencia del entrelazamiento es debida a que la FC no es local. Mario Bunge lo ha dicho de un modo bastante conciso: “...separación física implica separación espacial, lo contrario es falso. La teoría cuántica es entonces no local en este sentido peculiar, o como preferimos decir, es sistémica, en tanto no incorpora el principio clásico de que cosas extensamente separadas no pueden pertenecer al mismo sistema...” [22]. Ya que no se puede enviar información super-lumínica utilizando el entrelazamiento, no existe contradicción con la teoría de la relatividad.

Sobre la aleatoriedad del resultado de la medición, existen variadas interpretaciones. La más común y que se usa en la mayoría de los libros de texto (de hecho, la que he usado de alguna manera en mis descripciones anteriores) es la llamada interpretación de Copenhague. En esta interpretación, la FC consiste en un conjunto de operaciones y reglas, y la función de onda es algo que sirve para calcular y que se transforma predictivamente según la ecuación diferencial de Schrödinger, pero sólo mientras no se realice una medición. El resultado de la medición, en general, no es predecible. Esto es lo que se conoce como “el problema de la medición.” Lo más que puede saberse, es la probabilidad de obtener alguno de los diferentes resultados previstos por la ecuación. La función de onda no puede “observarse”, sólo es observable el resultado de la medición. Esto justifica la afirmación de Heisenberg de que el electrón no es real, si consideramos, como es usual, que lo real debe tener propiedades que son independientes de que sean medidas o no o del tipo de medición que se realice sobre ellas. Un electrón cuya posición depende de que se realice una medición, o un fotón cuya polarización depende de como coloquemos el polarizador, no contienen realidad. La interpretación de Copenhague suele dejar una cierta insatisfacción: ¿no se hizo en gran medida la ciencia para predecir? ¿es la ciencia solamente un conjunto de reglas de operación? ¿no hay nada conceptual en el fondo?.

Otra de las interpretaciones, es conocida como “universos múltiples”. Según esta interpretación, propuesta por Hugh Everett en 1957 [23], todas los posibles resultados de una medición sobre un sistema cuántico ocurren, sólo que en universos diferentes entre los cuales no hay intercambio de información. Esta interpretación, a pesar de parecer bastante exótica, es rigurosa y ha recibido el apoyo de eminentes físicos, probablemente porque no necesita del concepto de colapso de la función de onda. Sin embargo, contiene el problema de que es difícilmente falsable por medios experimentales (ya que no hay comunicación entre los universos) y muchos consideran que una hipótesis que no es falsable se encuentra fuera de la ciencia y es más bien un relato posible. Es interesante que en esta teoría cada resultado posee un pasado común a otros, pero da lugar a futuros diferentes, a infinitos futuros diferentes. Los partidarios de esta teoría se dividen entre los que creen que esos futuros son reales y los que no. Por lo que parece que el problema de la irrealidad se mantiene latente.

Existe una teoría de variables ocultas no locales (que por ser no locales, no entran en contradicción con los resultados de las pruebas del teorema de Bell) debida a David Bohm y publicada en dos artículos de 1952 [24, 25]. Esta teoría, tiene bases similares a una presentada anteriormente por Louis de Broglie (que había sido luego criticada por Pauli, y por el propio de Broglie); es conocida como teoría de de Broglie-Bohm o también como Mecánica Bohmiana. En ella, el movimiento de la partícula es guiado por una onda llamada onda piloto (precisamente en el sentido de que la guía, la pilotea). Así, por ejemplo, en el caso de la doble rendija que hemos descrito antes, se supone que la onda piloto pasa por las dos rendijas y que cada fotón atraviesa solo una, pero es guiado hacia las zonas donde la onda predice una máxima amplitud de la onda piloto. Es como si la onda piloto estableciera pistas para guiar el movimiento de las partículas.

La Mecánica Bohmiana provee resultados similares a la mecánica cuántica ortodoxa; no necesita la suposición del colapso de la función de onda, es determinista y no local. Sin embargo, no ha tenido gran presencia en la comunidad científica ni aparece como alternativa en los libros de texto. Hay quienes la consideran más complicada que la teoría estándar o que, al decir de Heisenberg [26] “no es una teoría contrapropuesta a la interpretación de Copenhague sino su repetición exacta en un lenguaje diferente”, lo cual otros consideran no justificado. En particular, Bell fue un gran defensor de esta teoría sobre la que comentó, refiriéndose al experimento de la doble rendija: “... ¿No está claro por la pequeñez del centelleo en la pantalla que tenemos que ver con una partícula? ¿Y no está claro, a partir de los patrones de difracción e interferencia, que el movimiento de la partícula está dirigido por una onda? De Broglie mostró en detalle cómo el movimiento de una partícula, que pasa a través de uno de los dos orificios de la pantalla, puede verse influido por las ondas que se propagan a través de ambos orificios. Tan influido que la partícula no va donde las ondas se anulan, sino que es atraída hacia donde cooperan. Esta idea me parece tan natural y sencilla, para resolver el dilema onda-partícula de una forma tan clara y ordinaria, que me resulta un gran misterio que haya sido tan generalmente ignorada...” [27].

También hay hipótesis y especulaciones sobre la relación entre la conciencia y la FC; son muy variadas. Una de ellas supone que el colapso de la función ocurre por la acción de un observador consciente. Pero la mayoría considera que la medición es el resultado de la interacción de un sistema de pocos grados de libertad con un objeto macroscópico, donde el observador consciente no juega ningún papel importante. Un argumento interesante es que, si tomamos el universo entero como sistema, no nos quedaría ningún observador para efectuar las mediciones de la función de onda global, o en cambio, tendría que ser un observador fuera del mundo físico: ¿Dios? Existe también la hipótesis de que la conciencia es el resultado de procesos cuánticos en el cerebro. Y que la teletransportación es el origen de interacciones extrasensoriales, como las nunca fehacientemente demostradas telepatía, telequinesia o radiestesia. Muchas de estas ideas son interesantes y algunas tentadoras, pero no parecen tener sólidas evidencias científicas, al menos por el momento.

Por otra parte, algunos practicantes de las falsas ciencias se aprovechan de la complejidad de la FC para justificar determinados sistemas curativos como el toque cuántico, o la sanación cuántica. Pero ¡atención!, si bien la FC explica y predice muchas cosas que están fuera del sentido común, ello no quiere decir que explique cualquier supuesta cualidad extraña o sobrenatural.

## IX. CONCLUSIONES

La FC ha dado un vuelco inimaginable al modo en que entendemos la realidad. Se sabe que la imposición de cualquier nuevo enfoque implica un tortuoso camino de comprobaciones, errores y debates, pero en el caso de la FC esto ha sido aún más agudo debido a lo exótico de algunos conceptos que evidentemente chocan con nuestros juicios habituales. Estos resultados extraños han sido aceptados luego de muchísimas pruebas y experimentos, y del hecho de que casi toda la tecnología actual, desde las computadoras hasta los láseres, tienen como sostén, de alguna manera, esta extraña teoría. De cualquier manera, casi todos los autores consideran que la FC es la más comprobada de todas las teorías de la Física. Lo que hemos analizado en este trabajo demuestra que la ciencia no rechaza las cosas extrañas como a veces se piensa: por el contrario, las incorpora y hasta les saca provecho. Rechaza, extraño o no, lo que no esté correctamente verificado. Una enseñanza que pudiera obtenerse de esta historia, y no sólo en cuestiones de física, es que no debiéramos estar demasiado seguros de ninguna supuesta verdad absoluta; que lo que hoy parece una verdad como un templo, mañana puede descubrirse errado, o solo parcialmente cierto. Era inimaginable a principios del siglo XX la complejidad que aportaría la FC al pensamiento y no creo que ni siquiera un supuesto Julio Verne “cuántico” hubiera podido predecirla en una novela de ciencia ficción. El famoso biólogo y genetista J. B. S. Haldane lo ha dicho mejor: “mi propia sospecha es que el Universo no solo es más raro de lo que suponemos, sino más raro de lo que podemos suponer.” Así y todo, parece que la próxima revolución

científica será sobre estos temas.

Anexo: Algunos sitios educativos relacionados con la Física Cuántica.

<https://quantumatlas.umd.edu/entry/quantumstates>

<https://qplaylearn.com/about-us>

<https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/>

<http://www.quantica.fis.ufba.br/index.php>

<http://sites.science.oregonstate.edu/~mcintyre/ph425/spins/index.SPINS.OSP.html>

<https://qt.eu/about-quantum-flagship/the-quantum-flagship-community/quantum-community-network/>

## REFERENCIAS

- [1] M. Planck, *Verhandl Dtsch Phys Ges.* **2**, 237 (1900).
- [2] A. Einstein, *Ann. Phys.* **322**, 132 (1905).
- [3] N. Bohr, *Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci.* **26**, 1 (1913).
- [4] E. Rutherford, *Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci.* **21**, 669 (1911).
- [5] W. Pauli, *Z. Für Phys.* **31**, 765 (1925).
- [6] D. Ter Haar, *The old quantum theory*, (Pergamon Press, New York, 1967).
- [7] W. Heisenberg, *Z. Für Phys.* **33**, 879 (1925).
- [8] E. Schrödinger, *Phys. Rev.* **28**, 1049 (1926).
- [9] L. D. Broglie, *Ann. Phys.* **10**, 22 (1925).
- [10] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
- [11] N. Bohr, *Phys. Rev.* **48**, 696 (1935).
- [12] P.A. Schilpp, A. Einstein, Albert Einstein, philosopher-scientist, [1st ed.], (Library of Living Philosophers, Evanston, Ill., 1949).
- [13] J.S. Bell, *Phys. Phys. Fiz.* **1**, 195 (1964).
- [14] S.J. Freedman, J.F. Clauser, *Phys. Rev. Lett.* **28**, 938 (1972).
- [15] A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 91 (1982).
- [16] A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804 (1982).
- [17] G. Weihs, T. Jennewein, C. Simon, H. Weinfurter, A. Zeilinger, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5039 (1998).
- [18] D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter, A. Zeilinger, *Nature.* **390**, 575 (1997).
- [19] H. Krauter, D. Salart, C.A. Muschik, J.M. Petersen, H. Shen, T. Fernholz, E.S. Polzik, *Nat. Phys.* **9**, 400 (2013).
- [20] J.-G. Ren, P. Xu, H.-L. Yong, L. Zhang, S.-K. Liao, J. Yin, W.-Y. Liu, W.-Q. Cai, M. Yang, L. Li, K.-X. Yang, X. Han, Y.-Q. Yao, J. Li, H.-Y. Wu, S. Wan, L. Liu, D.-Q. Liu, Y.-W. Kuang, Z.-P. He, P. Shang, C. Guo, R.-H. Zheng, K. Tian, Z.-C. Zhu, N.-L. Liu, C.-Y. Lu, R. Shu, Y.-A. Chen, C.-Z. Peng, J.-Y. Wang, J.-W. Pan, *Nature.* **549**, 70 (2017).
- [21] *FISICA E FILOSOFIA IN WERNER HEISENBERG*, Napoli, 2006.
- [22] M. Bunge, *Hidden Variables, Separability, and Realism*, in: M. Marion, R.S. Cohen (Eds.), *Qué. Stud. Philos. Sci. Part Log. Math. Phys. Hist. Sci. Essays Honor Hugues Leblanc*, Springer Netherlands, Dordrecht, 1995: pp. 217.
- [23] H. Everett, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 454 (1957) 454.
- [24] D. Bohm, *Phys. Rev.* **85**, 16(1952) 166.
- [25] D. Bohm, *Phys. Rev.* **85**, 180 (1952).
- [26] W. Heisenberg, *The development of the interpretation of the quantum theory*, (McGraw-Hill, New York, 1955) pp. 12. <https://plato.stanford.edu/archives/fall2021/entries/qm-bohm/>.
- [27] J.S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics: Collected Papers on Quantum Philosophy*, (Cambridge, 2004).

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.

