

ARTÍCULO ORIGINAL

EL ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO. DESDE LA TEORÍA A LA TECNOLOGÍA* Quantum Entanglement: from Theory to Technology

Ezequiel del Río Fernández

Departamento de Física Aplicada. ETSI Aeronáutica y del Espacio. UPM Madrid

ezequiel.delrio@upm.es

RESUMEN

Presentamos un resumen de la evolución histórica del entrelazamiento cuántico desde sus inicios en 1935 con la argumentación de Einstein y colaboradores, hasta sus implicaciones en la Segunda Revolución Cuántica que estamos empezando a ver actualmente. Analizamos la disputa entre Einstein y Bohr sobre la interpretación de Copenhague y prestamos especial atención a los experimentos que han confirmado las teorías actuales. Repasamos seguidamente experimentos relacionados con el entrelazamiento cuántico que tienen proyección tecnológica en computación cuántica u otras aplicaciones emergentes. Algunos de los protagonistas de estas investigaciones han sido galardonados con el Premio Nobel.

PALABRAS CLAVE: Entrelazamiento cuántico, estados EPR, desigualdad de Bell, no localidad cuántica, interpretación de Copenhague.

ABSTRACT

We present a summary of the historical evolution of quantum entanglement starting in 1935 with the arguments of Einstein and his collaborators and ending with some implications in the Second Quantum Revolution that we are beginning to see nowadays. We analyze the dispute between Einstein and Bohr over the Copenhagen interpretation, and we pay particular attention to the experiments that have confirmed current theories. We also review experiments related to quantum entanglement that have technological applications in quantum computing and other emerging fields. Several of the researchers involved in the above mentioned investigations have been awarded the Nobel Prize.

KEYWORDS: Quantum entanglement, EPR states, Bell inequality, Quantum nonlocality, Copenhagen interpretation.

* Sesión académica de la RADE celebrada el 26-11-2025 con el título *Centenario de la Mecánica Cuántica*.
<https://www.rade.es/pagina.php?item=1976>

1. INTRODUCCIÓN

El entrelazamiento cuántico es una propiedad genuinamente cuántica de forma que no tiene analogía con fenómenos clásicos. Es por ello que es uno de los fenómenos más fascinantes de la naturaleza. Desde el punto de vista tecnológico podemos decir que es el puente entre la primera y la segunda revolución cuántica que cada vez está tomando más protagonismo por sus implicaciones tecnológicas. Aun así, su atractivo tiene su origen incluso antes de su descubrimiento. En efecto, el quinto congreso de Solvay, celebrado en 1927, pasó a la historia por la famosa frase de Alber Einstein dirigida a Niels Borh: “Dios no juega a los dados”. A lo que Borh le responde, “deja de decir cómo ha de utilizar Dios sus dados”. Esto no quedó recogido en las actas, pero ha sido transmitido por sus protagonistas, dos científicos galardonados con el Premio Nobel. De hecho, este es, posiblemente, el congreso más famoso de la historia de la Física donde 17 de los 29 participantes fueron galardonados en el premio Nobel de Física o de Química o ambos, circunstancia que se dio en Marie Curie.

Lo que quería transmitir Einstein con esto era su desacuerdo con la incertidumbre asociada, en principio, al llamado principio de indeterminación Heisenberg. Este principio ya ha sido explicado en el artículo de Prof. Manuel G. Velarde [1] y lo que ahora nos interesa es enfatizar que dicha incertidumbre no se corresponde con la incertidumbre habitual en todo proceso de medida en física clásica. La idea de Borh y de Heisenberg es que se trata de una incertidumbre intrínseca de la naturaleza y no puede ser eliminada refinando las técnicas de medida, mientras que Einstein opinaba que una técnica de medida ideal eliminaría dicha incertidumbre. Con este propósito, Einstein ideaba constantemente experimentos mentales donde la incertidumbre debería ser menor de lo predicho por dicho principio. La expresión alemana “gedankenexperiment” para referirse a experimentos mentales se popularizó a raíz de este debate y sigue utilizándose hoy en día. Los argumentos de Einstein fueron desmontados uno a uno por Niels Borh. Aun así, hoy sabemos que en 1927 ninguno de los protagonistas, incluido Heisenberg, tenía claro el origen de la mencionada incertidumbre. En efecto, hay dos orígenes distintos para este fenómeno que conducen a las relaciones de incertidumbre. Primeramente, está lo que podríamos llamar relaciones de dispersión asociado a la función de onda de Erwin Schrödinger (ver ref. [1]) y al formalismo de la Mecánica Cuántica desarrollado principalmente por Paul Dirac (ver ref.[1,2]). Por otro lado, está lo que podríamos llamar relaciones de incertidumbre que estarían asociadas al proceso de medida, donde el propio aparato de medida ha de cumplir la Mecánica Cuántica. En ambos casos el resultado era siempre el mismo y parecía que la naturaleza se decantaba por la postura de Niels Borh. Finalmente, este debate quedó en suspense cuando en 1935 Albert Einstein propone un argumento conocido hoy como EPR en relación con sus autores: A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen. Es aquí donde comienza nuestra historia sobre el entrelazamiento cuántico.

2. (1935-1964) EINSTEIN FRENTE A BOHR. REALISMO LOCAL FRENTE A LA INTERPRETACIÓN DE COPENHAGUE. ¿CIENCIA O FILOSOFÍA?

Para entender el argumento del EPR hemos de recordar algo particular de la Física Cuántica. Dicha teoría propone dos tipos de evolución, una de ellas asociada a la ecuación de ondas de Schrödinger, que da cuenta de la evolución temporal de la función de ondas de Schrödinger, $\psi(t)$, cuyo significado ya se ha discutido en las referencias [1,2]. El otro tipo de evolución está asociado al proceso de medida que cambia dicha función, en principio instantáneamente. Este cambio asociado al proceso de medida produce una nueva función ψ , en ocasiones muy diferente a la función inicial previa a la medida. Este proceso se conoce como colapso de la función de ondas o más general como decoherencia cuántica. Aparte de lo ya mencionado sobre este fenómeno, es decir que cambia ψ de forma instantánea al margen de la ecuación de ondas de Schrödinger, la otra gran propiedad que nos ocupa es que el resultado final es aleatorio entre varios resultados posibles descritos en el formalismo de la mecánica cuántica para cada sistema a estudio. Para ilustrar este fenómeno utilizamos el ejemplo de dos electrones emitidos por una única fuente (ver figura 1). Los electrones tienen una propiedad llamada de spin que puede tomar dos valores posibles. También sabemos que, por el propio mecanismo de emisión de dichos electrones, la suma de sus spins ha de ser cero. Esto nos lleva a los dos posibles resultados ilustrados en la fig. 1 arriba y abajo del eje.



Figura 1: La fuente emite dos electrones en direcciones opuestas con spin opuestos: positivo o negativo, denotados por $|+\rangle$ y $|-\rangle$ respectivamente. Las notaciones superior e inferior indican los dos posibles resultados de la medida de los spins en derecha e izquierda.

Es de vital importancia indicar que el sistema está descrito por una única función de onda, que, por su construcción en el marco de la mecánica cuántica, no permite distinguir cada electrón de forma individual. Estos estados cuánticos se conocen como estados entrelazados, estados EPR o bien estados Bell y son nuestros protagonistas. Estos estados no se dan en física clásica en la cual todos podemos distinguir dos bolas de billar aun siendo iguales. Según lo expuesto, si disponemos de dos detectores de spin, uno a la derecha y otro a la izquierda, el de la derecha detectará $|+\rangle$ o $|-\rangle$ con igual probabilidad, pero esto condiciona el resultado del detector de la izquierda que debe ser opuesto al resultado en la derecha para sumar cero en total. Vemos pues que hay una aleatoriedad mucho más fuerte que en caso del principio de incertidumbre de Heisenberg que afectaba a un “error” en la posición o velocidad de una partícula. Ahora en estos estados EPR la incertidumbre es total; ¡o bien obtenemos un resultado o su contrario!

Realismo Local

Albert Einstein se da cuenta de que la situación con dos partículas introduce una nueva aleatoriedad que no estaba presente en la incertidumbre de Heisenberg. Con este motivo publica en 1935, junto a sus dos colaboradores, el argumento conocido hoy como Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) [3]. En su artículo trata de demostrar que la mecánica cuántica no describe la realidad completamente y puede generar problemas incluso con el principio de causalidad. En efecto, citando literalmente del EPR, Einstein afirma que: “if, without disturbing in any way a system, one can predict without any uncertainty the value of a physical quantity, then there is an element of physical reality corresponding to this quantity”. Como vemos el EPR introduce un principio epistemológico, no rigurosamente físico. En realidad, indica la relación esperada para las teorías físicas con los elementos de “realidad física” y espera que este argumento sea guía para el científico. Einstein propone un sistema entrelazado y lo somete al principio ya enunciado, pero nosotros utilizaremos para su análisis el sistema de la fig. 1 que es más simple que el original y por otra parte se extrapola directamente a los experimentos realizados en los años 80 en relación al tema por Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger siendo por ello reconocidos con el Premio Nobel en el año 2022.

En efecto, tomando la fig. 1 y siguiendo la argumentación del EPR podemos decir que, si sin perturbar de ningún modo el sistema de la izquierda, podemos predecir sin incertidumbre el valor del spin medido por el detector izquierdo, (esto lo podemos hacer claramente midiendo en el detector derecho) podemos afirmar que existe un elemento de realidad, concretamente el spin del electrón de la izquierda, que se corresponde con la cantidad medida en dicho detector.

Es importante precisar las implicaciones del argumento anterior. En primer lugar, admitimos que la medida en la parte derecha no influye en la parte izquierda del sistema entrelazado. Esto sería consecuencia de la Teoría de la Relatividad donde las perturbaciones han de transmitirse siempre a velocidades menores que c , velocidad de la luz, por lo que el colapso de la función de onda de forma instantánea no puede perturbar el electrón de la izquierda, muy alejado del de la derecha. Esto se conoce como principio de “localidad”. La importancia de este principio reside en que si se viola en el mundo macroscópico, siguiendo la teoría especial de la relatividad del propio Einstein, puede haber observadores que vean los acontecimientos en orden temporal inverso. Por ejemplo, si pudiéramos transmitir información a velocidad superior a c desde Madrid a Atenas, digamos un texto de un libro donde describe que Sócrates fue condenado a tomar la cicuta, llegaría a Atenas antes de la condena a Sócrates, de forma que este podría haberlo evitado. La contradicción viene al considerar que, si lo evita, ya no aparecería tal condena en el libro que hemos enviado desde Madrid a Atenas. Volviendo ahora al detector de la izquierda de la fig. 1, en el EPR se

concluye que el valor del spin del electrón de la izquierda ya existía antes de la medida en el detector de la derecha y la teoría cuántica no puede predecir su valor, es decir es incompleta. Es más, Einstein afirma que la mecánica cuántica debería ser completada con alguna variable adicional. Estas variables se conocen como variables ocultas.

Ciertamente había que ser un inconsciente o bien un genio para atacar con un argumento epistemológico a la Física Cuántica, la teoría con más resultados comprobados experimentalmente que existe. El argumento expuesto en el EPR es lo que hoy se conoce como Realismo Local. En este sentido, entre los que se inclinaban por la opinión de que el argumento, o paradoja EPR, era propio de un inconsciente estaba el prestigioso físico John von Neumann que había demostrado, presuntamente, que la física cuántica no se podía completar con variables ocultas. Años más tarde se desmontó que el argumento de von Neumann incluía hipótesis sobre los operadores cuánticos muy restrictivas. Otro de los grandes físicos del siglo XX, Richard Feynman galardonado con el Premio Nobel de Física en 1965, argumenta en sus famosas “Lectures on Physics” que el argumento EPR carece de interés. Hay que decir en honor a la verdad que décadas después Feynman cambió completamente de opinión al respecto.

Interpretación de Copenhague

En este ambiente, se postula como opinión dominante la llamada “interpretación de Copenhague” que es la que se utiliza en los laboratorios con completo éxito. Entre los firmes defensores de esta posición está Niels Bohr, que se tomó muy en serio el argumento EPR y lo consideraba fruto de un genio. Es por ello que invirtió mucho tiempo y esfuerzo en argumentar en su contra; entendía que este esfuerzo era de gran interés para la ciencia. Según Bohr, la física cuántica es completa aún sin describir cuál será el resultado de la medida de spin en cada detector. Esto es debido a que dicho spin no está físicamente determinado hasta que no se mide, y por tanto ni la física cuántica ni cualquier otra teoría podrá determinarlo previamente a la medida. Es decir, no existen los elementos de realidad del EPR como algo objetivo al observador, sino que dichos elementos “aparecen” en el proceso de la medida. En el símil macroscópico de los dados de 1927 (ver Fig. 2) ahora los dados no tienen rotuladas las caras y se rotularan aleatoriamente cuando se observan, cuando se mide. Ciertamente esta interpretación es sorprendente y deja muchas dudas. Quizás la más importante es saber dónde termina el sistema a estudio y donde empieza el aparato de medida.

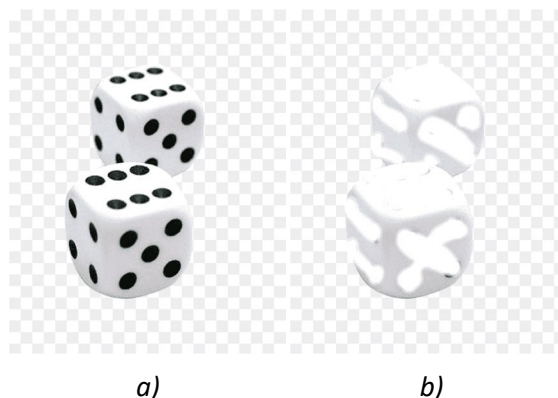


Figura 2: Evolución del símil macroscópico de los dados de Einstein y Bohr. a) Dados con los que Dios podía o no jugar en el congreso de 1927. b) Dados de la interpretación de Copenhague de 1935 donde las caras no está rotuladas y los números aparecerán en el momento de ser observados.

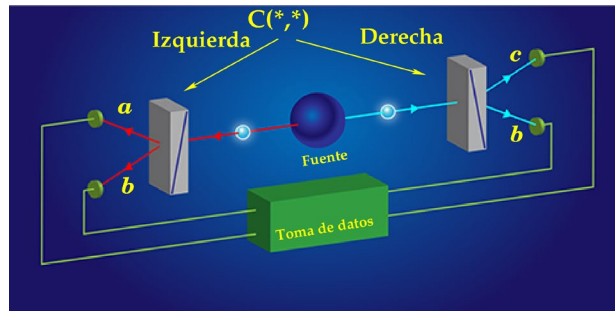
Esta línea argumental es la que enfatizó Schrödinger, otro físico que entendía que el argumento EPR era el camino a seguir. Según él podemos utilizar una única función de ondas para los dos electrones y los dos detectores de spin. Ahora queda la medida incluida en la interpretación de Copenhague y los detectores carecen de lectura hasta que otro sistema de medida lo determine. Este último sistema de medida podrá ser incluido nuevamente en una única función de ondas y volvemos a la casilla de salida. Evidentemente, Schrödinger concluye que aquí hay gato encerrado, paradoja que publicaría a este respecto también en 1935 y es lo que hoy se conoce como el problema de la macro-objetivación.

3. ¿CIENCIA O FILOSOFÍA?

Ciertamente el debate es filosófico sin duda. Falta ver si también es científico. Para ello podemos hacer la siguiente pregunta: ¿cuál de las dos opciones es “verdadera”, RL (Realismo Local) o IC (Interpretación de Copenhague)?

Recordamos que para el realismo local de Einstein la Física Cuántica no describe completamente la naturaleza y se debe completar con una teoría más profunda, es decir con variables ocultas que, haciendo honor a su nombre, hasta la fecha no han sido halladas. Por otra parte, la interpretación de Copenhague admite que cada electrón no tiene definido el valor de su spin en incluso antes de medir no se puede hablar de “cada” electrón sino del sistema completo entrelazado.

Desde el punto de vista físico no se ve solución dado que todo parece indicar que ambas interpretaciones deben producir los mismos resultados experimentales. Es como si no se pudiese interrogar a la naturaleza para que nos dé su opinión, la única que puede decidir el debate.



$$C(a, b) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \left(\frac{a_i b_i}{N} \right), a_i = \pm 1, b_i = \pm 1$$

Figura 3: Esquema del experimento diseñado por John Bell junto con la definición de la función correlación $C(a,b)$, básica para demostrar su teorema. a, b y c son los ángulos en los que están orientados los polarizadores. Los resultados de sus medidas son $+1$ o -1 y consideramos que se hacen N mediciones.

Tendrían que pasar casi tres décadas hasta que en 1964 un físico del CERN, John Bell, se tomó en serio la posible existencia de las variables ocultas. Diseñó un experimento, en este caso con fotones, las “partículas” de luz, donde mediría su polarización (ver Fig. 3). La luz también se describe como un campo electro-magnético oscilando. La polarización de la luz indica el plano de vibración del campo eléctrico y el fotón, desde el punto de vista cuántico, admite sólo dos valores que podemos indicar como $+y -$ en analogía con el spin del electrón y que físicamente corresponden con el plano del polarizador o el plano perpendicular al mismo. En este sentido podemos trasladar todo lo dicho para los electrones a los fotones y a cualquier otro observable con sólo dos valores posibles en las mediciones.

La idea de Bell es calcular $C(a,b)$, donde el primer argumento se refiere a medidas en el detector de la izquierda mientras el segundo argumento es para la parte derecha. Recordemos que el valor de las mediciones es $+1$ o -1 con diferentes probabilidades en función de la orientación de los polarizadores. Para evaluar $C(a,b)$ Bell propone dos métodos. El primero de ellos consiste en asumir que los valores medidos existen antes de la medición, es decir, hipótesis del realismo local. En este caso utiliza la relación de probabilidades de Pierre-Simon Laplace, (casos posibles) / (casos favorables), llegando a la desigualdad original de Bell [4].

$$|C(a, b) - C(a, c)| \leq 1 - C(b, c)$$

El segundo método utilizado es la aplicación del formalismo cuántico con los correspondientes operadores de rotación. Ahora Bell descubre que, para cierta combinación de ángulos, la desigualdad anterior no se cumple, es decir, el formalismo de la física cuántica indica que la hipótesis de realismo local no es válida. Tenemos por tanto un gedankenexperiment esquematizado en la figura 4 y una relación numérica que se debe cumplir si la naturaleza tiene los datos de la figura 2.a o no cumplirse si la naturaleza juega

con los datos de la figura 2.b. Sin abandonar la filosofía, hemos entrado en el terreno científico de la física. El siguiente paso es previsible: tratar de hacer el experimento.

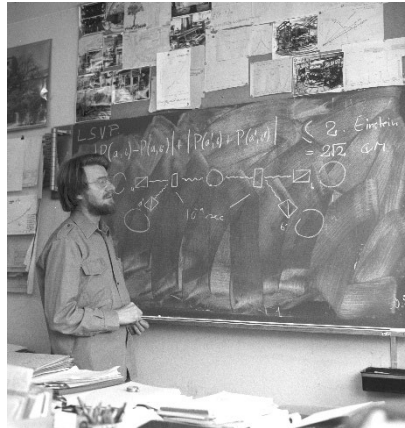


Figura 4: J. Bell en su despacho del CERN analizando la desigualdad CHSH con la siguiente anotación:

- CHSH ≤ 2: Einstein
- CHSH ≤ 2√2: QM

(1970 - 1990) Experimentos basados en las desigualdades de Bell.

Es curioso pero la desigualdad original de Bell no puede ser realizada experimentalmente por la presencia del número 1. Dicho número se obtiene en la demostración tras dividir todos los fotones detectados por los diferentes polarizadores entre el número total de fotones emitidos, obteniendo la unidad solo en el caso de eficiencia 100% de los polarizadores. Lo cierto es que esta hipótesis está muy alejada de las posibilidades tecnológicas, por lo que es necesario cambiar la desigualdad original por otra que prescindiera del mencionado cociente. Utilizando la técnica de Bell, hoy se conocen muchas desigualdades similares, la más utilizada en los experimentos es la denominada CHSH propuesta por Clauser, Horne, Shimony y Holt y las siglas CHSH se identifican con la siguiente cantidad

$$|C(a, b) - C(a, c)| + C(b', b) + C(b', c) = CHSH$$

igualmente referida al experimento de la figura 3 pero ahora tenemos 4 ángulos posibles para orientar los polarizadores; a, b, c, y adicionalmente b'. La cantidad CHSH tiene distintos límites posibles según apliquemos el realismo local o bien la interpretación de Copenhague (ver Fig. 4). Concluimos pues que si en algún experimento obtenemos CHSH > 2 habremos, en principio, descartado el realismo local indicado en la pizarra de J. Bell como Einstein, decantándonos por la interpretación de Copenhague descrita como QM en la figura 4.

Una vez consensuada la parte teórica del experimento vamos al laboratorio. Sus protagonistas, Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 2022 “for experiments with entangled photons,

establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science”. Es interesante señalar que en la propia motivación del galardón ya se cita una aplicación tecnológica “quantum information science”, es decir lo que fue en inicio un debate puramente filosófico, ha pasado al campo de la física básica y de este a la física aplicada en lo que hoy se conoce como la segunda revolución cuántica de que ya ha hablado el Prof. Luis Vázquez en la referencia [2]. Pasemos seguidamente a describir brevemente los experimentos en cuestión.

Descripción de los experimentos

Básicamente hemos de conseguir tres puntos importantes:

- Fuente: Seleccionar una fuente adecuada para producir suficientes pares de partículas (electrones o fotones) en estado entrelazado.
- Independencia en las medidas: No debe influir la medida de un detector en los otros detectores. Técnicamente hemos de descartar las variables ocultas locales, que comunicarían los detectores a velocidades inferiores a c (velocidad de la luz).
- Eficiencia de los detectores: Debe ser muy alta para asegurar que la muestra detectada no esté sesgada de alguna forma desconocida.

En todos los casos descritos a continuación se utilizan fotones y se mide su polarización para determinar la variable CHSH.

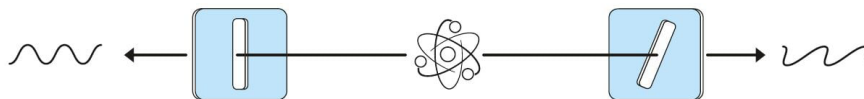


Figura 5: Experimento de John F. Clauser y sus colaboradores en 1972 que cuenta con una fuente de fotones y dos polarizadores.

Inicialmente, John F. Clauser y sus colaboradores utilizan solo dos polarizadores. Uno de ellos se puede rotar manualmente (ver Fig. 5). Utiliza como fuente átomos de ^{40}Ca que al desexcitarse emiten pares de fotones entrelazados. Esto se adecúa al punto primero. Con ello comprueban que las predicciones cuánticas para la cantidad CHSH, que depende del ángulo relativo entre polarizadores, se cumplen tal como la teoría predice. Esto es un gran avance, pero no despeja la existencia de variable ocultas, es decir, no se pronuncia sobre el realismo local de Einstein (punto 2 señalado antes). Esto es debido a que, al estar prefijadas las orientaciones de los polarizadores, teóricamente hay tiempo suficiente para que los fotones emitidos “conozcan” el ángulo de los mismos para poder ajustar la estadística, es decir no serían medidas independientes.

El avance casi definitivo lo produce el otro galardonado en 2022 Alain Aspect. En su montaje experimental incluye cuatro polarizadores con ángulos variables (ver. Fig 6).

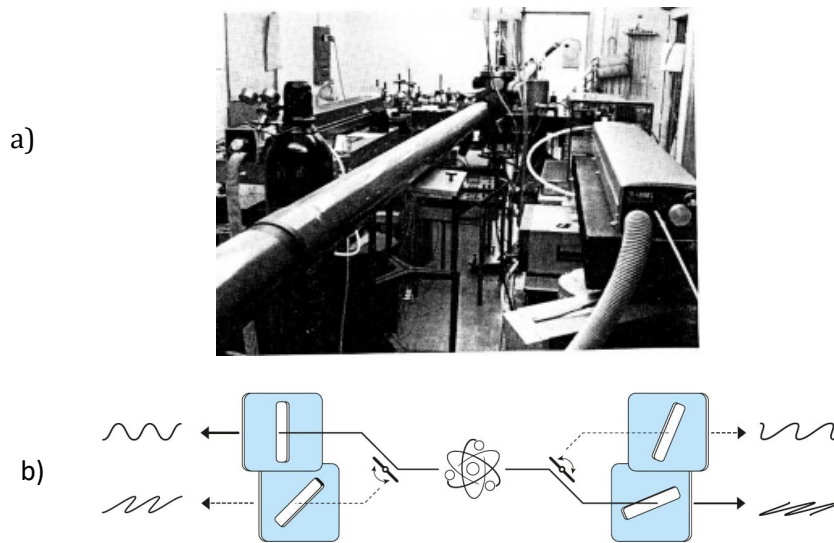


Figura 6: a) Experimento de Alain Aspect y sus colaboradores en 1982. Foto de su laboratorio en París. A la derecha vemos el potente láser utilizado para excitar la fuente de fotones mientras que a la izquierda aparece un tubo correspondiente a uno de los caminos que siguen dichos fotones. b) Esquema donde se muestran los cuatro polarizadores y dos generadores aleatorios.

Ahora cada fotón dispone de dos caminos a la derecha y dos a la izquierda de la fuente. La novedad consiste en que mientras los fotones están en camino hacia ambos lados, se selecciona de forma aleatoria e independiente cada 10ns (ns indica nanosegundo, es decir milésima de la millonésima de segundo) el camino hacia arriba o abajo. Esto se consigue mediante dos generadores aleatorios montados entre la fuente y cada par de polarizadores de ambos lados. Dichos pares distan 12m por lo que una comunicación de variables ocultas entre derecha e izquierda queda descartada ya que tardaría al menos 40ns. Con esto estamos cumpliendo el punto 2 anterior y asegurando la independencia de las medidas de acuerdo con el realismo local. Por otra parte, los puntos primero y tercero fueron muy mejorados respecto a experimento de la figura 5. El experimento descrito y otro anterior fueron parte fundamental en la tesis de Alain Aspect presentada en 1983. Los resultados estaban en perfecto acuerdo con la física cuántica descartando el realismo local y confirmando la no localidad cuántica, es decir, comunicación a velocidades superlumínicas dentro de la función de onda de Schrödinger, en contra de lo que J. Bell, miembro del tribunal de la tesis, deseaba como einsteniano convencido.

Aun así, estos resultados dejaban un pequeño resquicio para poder negar la no localidad cuántica si admitimos que pudiera haber comunicación entre los fotones. La única posibilidad es que supieran en comportamiento de los generadores aleatorios y por tanto el camino que dichos generadores marcarían. En teoría esto es posible debido a que estrictamente hablando no existen generadores aleatorios, salvo si se utiliza en colapso de la función de onda de Schrödinger como generador aleatorio. Pero utilizar esto para comprobar en propio colapso sería convertir a la Física Cuántica en juez y parte y ¡estaríamos en un bucle lógico!

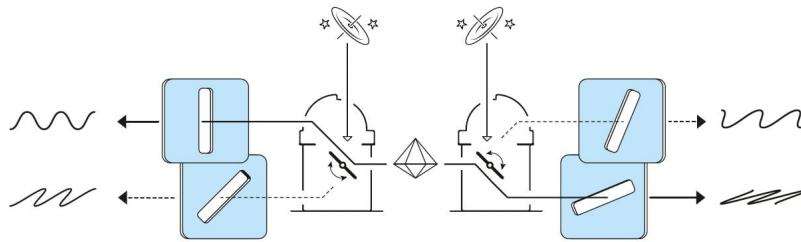


Figura 7: Experimento de Anton Zeilinger y sus colaboradores donde se muestran los cuatro polarizadores y dos generadores aleatorios controlados por rayos cósmicos.

Una salida a esta situación es utilizar rayos gamma del universo para permutar los caminos a seguir por los fotones. Esto es precisamente lo que utiliza A. Zeilinger en su experimento. Se usan dos telescopios enfocados a fuentes opuestas de rayos gamma cósmicos para evitar un origen común y por tanto una posible comunicación previa. Los polarizadores están ahora separados unos 400m, son de alta eficiencia y la fuente de fotones entrelazados se consigue con un potente rayo láser que excita un cristal especial. Con todos estos avances tecnológicos reproduce los mismos resultados que en los experimentos de A. Aspect, confirmando nuevamente la no localidad cuántica y la interpretación de Copenhague.

Decoherencia cuántica en sistemas pequeños

Anteriormente hemos visto que la decoherencia cuántica para dos fotones o partículas muy alejadas unas de otras fue lo que motivó el EPR y el problema de la no localidad cuántica. Este problema sería menor si las partículas estuvieran muy juntas, digamos en el interior de un átomo. De hecho, J. Bell opinaba, antes de los experimentos de Aspect claro está, que la decoherencia cuántica funcionaría bien en sistemas pequeños, pero no con partículas muy alejadas. En cualquier caso, lo que queda claro es que se hace de forma instantánea. Podemos también calcular los posibles resultados de dicha decoherencia utilizando el formalismo cuántico, aunque en ocasiones esto requiere un arduo esfuerzo computacional con los ordenadores más rápidos disponibles. Llama la atención que todo esto lo hace el colapso de la función de ondas de forma instantánea. Buscando ahora una aplicación práctica de este fenómeno cuántico podemos pensar en utilizarlo para conseguir ordenadores de velocidad casi infinita. Evidentemente los ordenadores actuales funcionan gracias a las leyes de la física cuántica, pero nunca se ha utilizado la decoherencia cuántica para ello ni para otra cualquier aplicación tecnológica. Esto es lo que abre la posibilidad a lo que ahora se conoce como la segunda revolución cuántica.

Todas estas tecnologías requieren dos cosas: manipular sistemas de pocas partículas, y medir resultados de la decoherencia cuántica. Esto no es fácil ya que las partículas deben estar extremadamente aisladas del entorno. Evidentemente cualquier contacto con el entorno ya implica un número ingente de partículas, en comparación con el propio sistema a estudio, de forma que su perturbación será dominante sobre el fenómeno investigado.

Seguidamente describimos dos métodos de manipulación de sistemas cuánticos individuales que merecieron el Premio Nobel de Física en el año 2012.

Manipulación de Sistemas Cuánticos Individuales

En la figura 8 aparece el diseño experimental del equipo de Serge Haroche, uno de los galardonados en el 2012. La idea es aislar fotones individuales para poder manipularlos. Sabemos que los fotones están en permanente viaje a velocidad c por lo que la forma de almacenarlos es haciendo que se reflejen en espejos enfrentados. Cada reflexión ha de ser casi perfecta para no interferir con el estado cuántico de los fotones. Por este motivo se utilizan espejos superconductores de niobio a muy baja temperatura, concretamente a 0.8K. Estamos por tanto próximos al cero absoluto de temperatura, 0K, que equivale -273.15°C . Los fotones son almacenados con este sistema un tiempo aproximado de 130ms, recorriendo por tanto una distancia igual al perímetro de la tierra. Para ello han de reflejarse unos dos mil millones de veces en los espejos sin perder sus propiedades cuánticas.

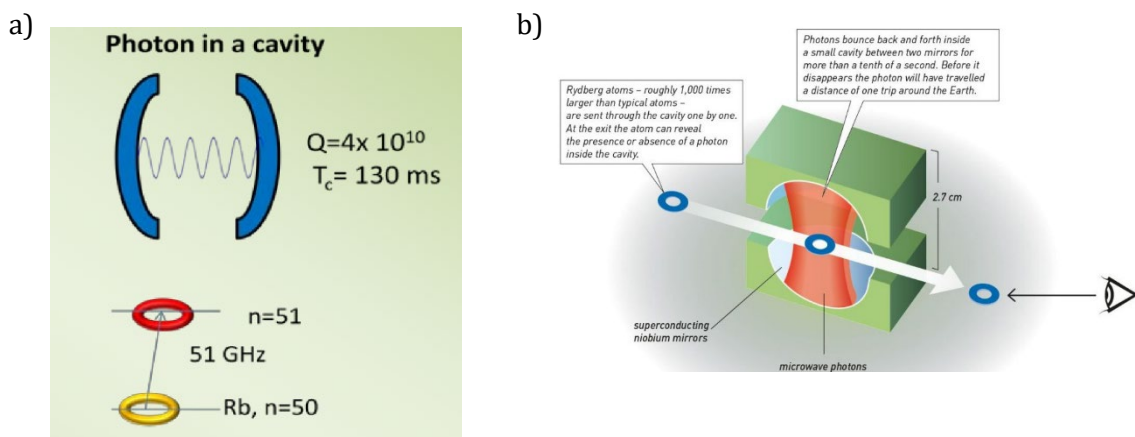


Figura 8: Diseño experimental del equipo del Prof. Serge Haroche para atrapar y manipular varios fotones. a) Esquema teórico donde un fotón atrapado en una cavidad debe excitar un átomo de Rb desde $n=50$ hasta $n=51$. b) Dibujo del experimento con los espejos de Niobio superconductor.

Ya tenemos los fotones en una “caja” y sólo falta diseñar un método de medida sobre un fotón individual.

La medida se hace mediante un anillo de rubidio, Rb, de tamaño microscópico. El Rb es el elemento químico alcalino del periodo 5º del sistema periódico. Tiene por tanto un solo electrón en su última capa, la quinta. Los átomos utilizados en el experimento de Haroche están en estado llamado de Rydberg, es decir, en estado excitado donde el último electrón ha sido llevado hasta la capa $n=50$. Recordemos que Johannes R. Rydberg es citado en los libros de física y química de bachillerato en relación con su fórmula para el espectro del átomo de hidrógeno. La particularidad de los átomos de Rydberg es que responden muy bien ante campos electromagnéticos, digamos fotones. Esto hace que al pasar entre los espejos absorba un fotón cuya energía no es lo suficiente para pasar al átomo de Rb de $n=50$

a $n=51$ por lo que este queda en estado cuántico superposición de ambos. Podemos asimilar $n=50$ a $|+\rangle$ y $n=51$ a $|-\rangle$ para imaginar los dos estados del átomo, aunque en este caso es algo más complejo. El estado de superposición se detecta a la salida mediante efecto Stark, llamado así por su descubridor, quien recibió el premio Nobel de Física en 1919 por ello. Como vemos es una técnica muy compleja que utiliza varios fenómenos cuánticos para producir y medir el colapso de la función de onda de Schrödinger y nace como aplicación para futuros ordenadores cuánticos, pero actualmente que está siendo muy fructífera en otras aplicaciones como radares cuánticos y comunicación cuántica.

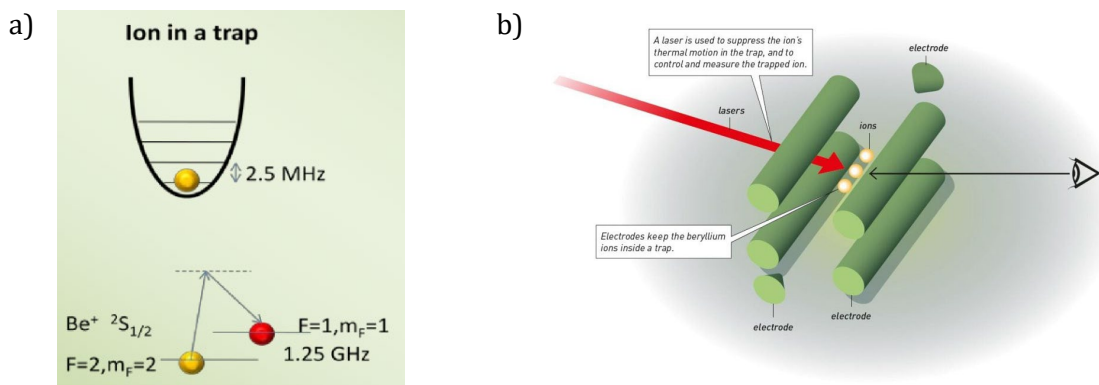


Figura 9: Diseño experimental del equipo del Prof. David Jeffrey Wineland para manipular iones individuales. a) Esquema de la trampa de iones Be^+ . b) Dibujo del experimento con los electrodos donde quedan atrapados los iones.

Otra importante técnica de manipulación cuántica fue desarrollada por el equipo del Prof. David Jeffrey Wineland, galardonado con el Nobel de Física también en el año 2012, aparece en la figura 9. La idea es utilizar trampas de iones con campos eléctricos. En este caso son iones de berilio que son enfriados hasta su mínimo de energía (ver fig. 10.a). Los iones tienen unos niveles propios de energía, mientras que la vibración en el valle del pozo de potencial de la trampa añade otro nivel de energía adicional. Desde el punto de vista cuántico estos dos niveles de energía pueden superponerse en el ion. Esta tecnología se basa en un artículo clave de Juan Ignacio Cirac y Peter Zoller [5] donde proponen como qubits (la unidad de información en la computación cuántica) un solo ion. Los dos estados de información serían el estado energético más bajo del ion y el siguiente escalón energético. No olvidemos que la energía está cuantizada [1]. Siguiendo el razonamiento de la ref. [5], en una línea de iones se podría almacenar muchísima información mediante el láser de la figura 9.b. Lo importante del sistema es que es muy estable a la decoherencia debido a la escasa interacción con el entorno. Destacamos que Ignacio Cirac se formó como físico en la Universidad Complutense de Madrid donde asistió al curso de doctorado impartido por el Profesor Luis Vázquez. En la figura 9.b vemos un dibujo de la disposición experimental donde se utilizan electrodos en línea para atrapar varios iones en la trampa. En este caso los electrodos proporcionan un campo eléctrico constante sumado a otro oscilante para crear varios mínimos donde alojar cada ion. Todo el sistema está en una cámara de alto vacío,

dato que cualquier molécula de aire introduciría una gran perturbación al ion produciendo decoherencia cuántica no controlada. Para el enfriamiento al mínimo de energía se utiliza un láser cuidadosamente sintonizado, que a su vez proporciona información sobre el estado cuántico de los iones.

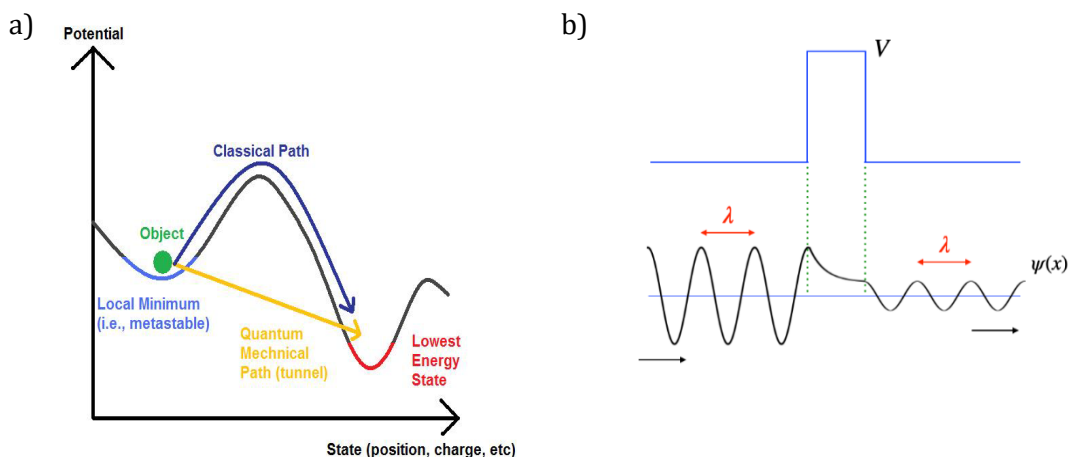


Figura 10: Efecto túnel cuántico. a) El objeto, típicamente un electrón es capaz de cruzar de un valle a otro sin subir la montaña. b) Explicación cuántica utilizando la función de onda.

Para terminar, hemos de recordar a los galardonados con el Nobel de Física en el 2025, centenario de la Física Cuántica; John Clarke, Michel H. Devoret y John M. Martinis. Han sido premiados por unos experimentos que hicieron entre 1984 y 1985 en relación al efecto túnel cuántico. Dicho efecto se refiere a la capacidad de la función de onda de Schrödinger de “atravesar paredes” o bien montañas en ausencia de túnel, como representa la figura 10.a, donde un objeto pasa de un lado a otro como si hubiera un túnel cuántico. La explicación del sorprendente fenómeno está en la ecuación de ondas de Schrödinger donde la solución para la onda de un electrón no se anula al llegar a una barrera de potencial, es decir la pared (ver fig. 10.b). Matemáticamente la solución predice un decaimiento exponencial por lo que la función de onda no llega a anularse al otro lado de la barrera. Recordando que su cuadrado nos proporciona la probabilidad de hallar al electrón (ver ref. [1]) concluimos que podemos detectarlo al otro lado de la barrera de potencial. Este efecto no tiene analogía en física clásica. En efecto, podemos pensar que el sonido también atraviesa paredes como la función de onda, pero la analogía no es válida debido a que las ondas sonoras hacen vibrar físicamente el material de la pared introduciendo energía. Es esta vibración la que mueve el aire al otro lado generando una nueva vibración análoga a la original. En el efecto túnel cuántico, podemos decir que la función de onda no aporta energía a la pared y lo que pasa al otro lado es la propia función de ondas. Este efecto fue descubierto por el físico japonés Leo Esaki galardonado con el Nobel de Física en 1973 por dicho descubrimiento. Curiosamente, L. Esaki cuenta actualmente con 100 años de edad, los mismos que la física cuántica, aunque sabemos que esta última es más longeva [1]. Actualmente hay muchos dispositivos que utilizan el efecto túnel cuántico y que compartieron galardón en 1973 con Esaki. Uno de ellos fue el físico noruego Ivar Giaever que

observó el efecto túnel no en un electrón como lo haría Esaki, sino en dos electrones de un superconductor unidos en lo que se llaman pares de Cooper. El tercer galardonado en 1973 fue el físico británico Brian David Josephson por el descubrimiento de las uniones que llevan su nombre. En este caso sigue utilizando superconductores pero con una delgada capa de material aislante. En sus experimentos demuestra que la corriente eléctrica fluye como en el caso de un superconductor debido a que los pares de Cooper pasan por el aislante por efecto túnel. Actualmente utilizando dos de estas uniones se construyen los llamados SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) utilizados para detectar campos magnéticos extremadamente débiles.

Vemos pues que el efecto túnel ya ha sido premiado con el Nobel (aparte de los tres primeros citados hay otros que por brevedad no comentamos). Este nuevo galardón se debe a que en los experimentos de los años 80 se incluyó la novedad de utilizar un circuito macroscópico observando propiedades de cuantización de la energía previstas por la ecuación de Schrödinger, que, en principio, es un efecto microscópico. Hoy en día a estos sistemas se los refiere como átomos macroscópicos, en el sentido de que tiene cuantización de energía como un átomo siendo el sistema macroscópico. Esta tecnología se ha desarrollado actualmente y sería una candidata para conseguir ordenadores cuánticos.

4. CONCLUSIONES

Los experimentos descritos relativos a la desigualdad de Bell se han repetido con electrones y otro tipo de partículas y con detectores separados varios kilómetros obteniendo siempre los resultados previstos por la física cuántica. Todo indica por tanto que la decoherencia cuántica propaga algún tipo de información a velocidades superiores a c ; lo que hemos llamado no localidad cuántica. Si esto sucediera a nivel clásico tendríamos paradojas violando el principio de causalidad, como ya hemos descrito al principio.

Todos los gedankenexperiment propuestos para violar la no localidad clásica han sido refutados, pero en mi opinión actualmente no hay un teorema general que prohíba la no localidad clásica. Podemos imaginar la opinión de A. Einstein de haber sabido todo esto. Este es el título del libro de A. Aspect, "Si Einstein lo hubiera sabido", donde explica con detalle su contribución a esta parte de la física cuántica [6].

La mayor parte de la tecnología actual se basa en propiedades de la física cuántica, pero hasta ahora no se había utilizado la decoherencia cuántica en aplicaciones tecnológicas. Este cambio es lo que se conoce como segunda revolución cuántica que está abriendo un campo de aplicaciones fascinante de la que nos ha hablado el Prof. Luis Vázquez [2].

Pensando en esta doble faceta de la física, básica y aplicada, es conocido que J. Bell decía “Yo de lunes a sábados soy un ingeniero cuántico. Y los domingos tengo mis principios” y es durante esos fines de semana cuando hizo sus desigualdades. Actualmente hay muchísimo trabajo para ingenieros cuánticos durante la semana, pero, aun así, se están abriendo nuevos campos para disfrutar los fines de semana.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] García Velarde, M. Anales de la Real Academia de Doctores de España. Volumen 11, número 1, 2026. <https://www.rade.es/publicacion.php?item=132>
- [2] Vázquez Martínez, L. Anales de la Real Academia de Doctores de España. Volumen 11, número 2, 2026.
- [3] Einstein, A.; Podolsky, B.; Rosen, N. (1935). “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?”. *Physical Review* 47: 777-780.
- [4] J. Bell, On Einstein-Podolsky-Rosen paradox. *Physics*, 1 (1964) 195-200.
- [5] J. I. Cirac and P. Zoller, “Quantum Computations with Cold Trapped Ions”, *Physical Review Letters* 74 (1995) 4091-4094
- [6] Aspect, A., "Si Einstein lo hubiera sabido". Editorial DEBATE Primera edición 2025.