

PREMIO NOBEL DE FÍSICA 2022

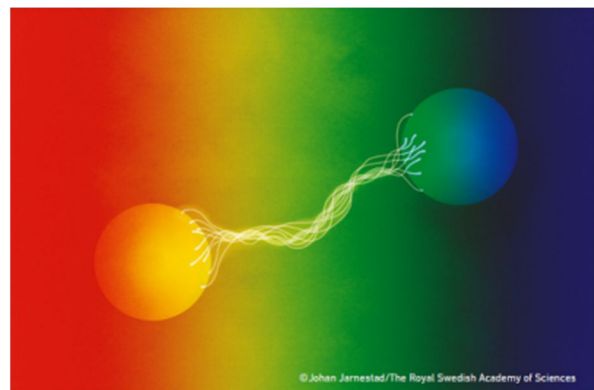
Como el entrelazamiento se ha convertido en una poderosa herramienta

Usando experimentos innovadores, **Alain Aspect**, **John Clauser** y **Anton Zeilinger** han demostrado su potencial para investigar y controlar partículas que se encuentran en estado entrelazado. Lo que le sucede a una partícula en un par entrelazado determina lo que le sucede a la otra, incluso si están demasiado separadas para poder interactuar entre ellas. El desarrollo de herramientas experimentales por los premiados ha sentado las bases para una nueva era de la tecnología cuántica.

Los fundamentos de la mecánica cuántica no son solo una cuestión teórica o filosófica. Se están realizando intensas investigaciones y desarrollos para utilizar las propiedades especiales de los sistemas de partículas individuales para construir computadoras cuánticas, mejorar las mediciones, construir redes cuánticas y establecer una comunicación con cifrado cuántico que sea segura.

Muchas aplicaciones se basan en el hecho de que la mecánica cuántica permite que dos o más partículas existan en un estado compartido, independientemente de cuán separadas estén. Esto se denomina entrelazamiento y ha sido uno de los elementos más debatidos desde la formulación de la mecánica cuántica. Albert Einstein habló sobre la fantasmal acción a distancia y Erwin Schrödinger dijo que era el rasgo más importante de la teoría.

Los laureados de este año han explorado estos estados cuánticos entrelazados y sus experimentos han sentado las bases de la revolución que se está produciendo actualmente en la tecnología cuántica.



Lejos de la experiencia cotidiana.

Cuando dos partículas están en estados cuánticos entrelazados alguien que mide una propiedad de una partícula puede determinar inmediatamente el resultado de una medición equivalente en la otra partícula, sin necesidad de hacerla.

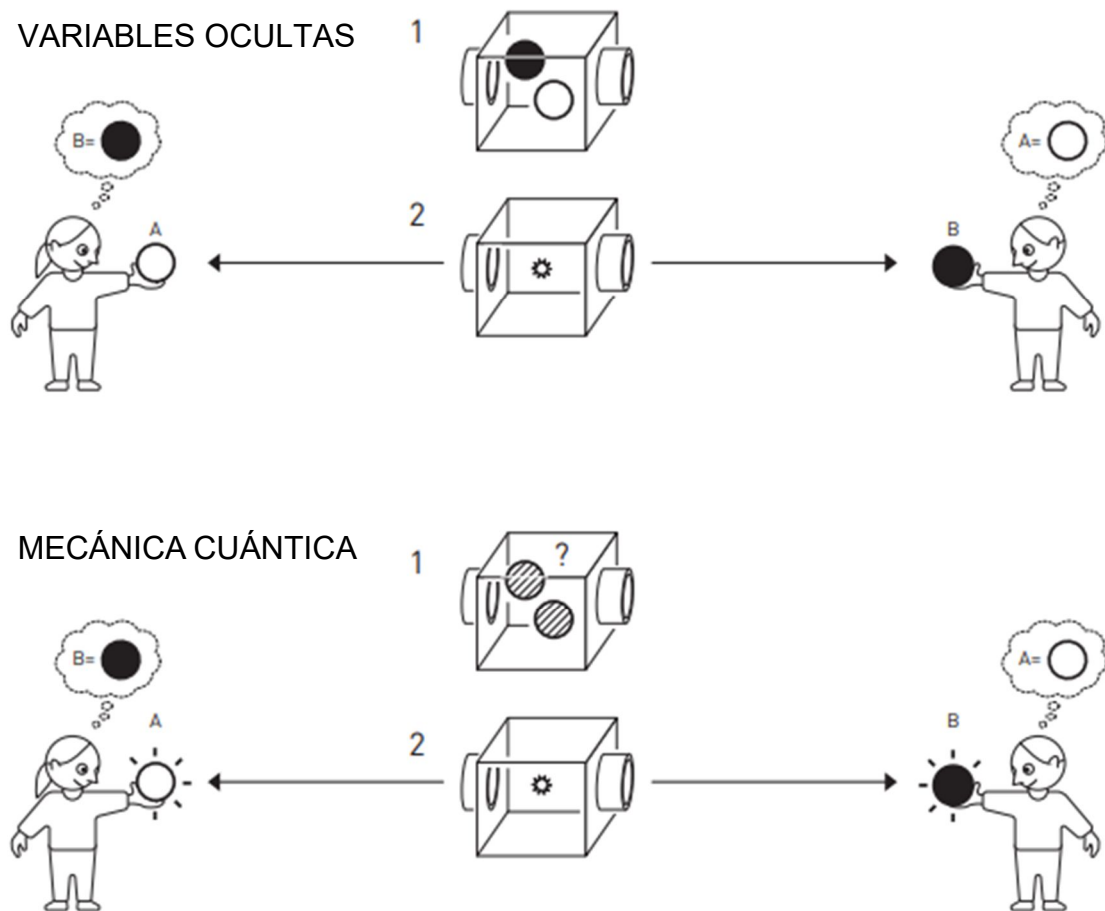
A primera vista esto quizás no sea tan extraño. Si pensamos en bolas en lugar de partículas, podemos imaginar un experimento en el que se envía una bola negra en una dirección y una bola blanca en la dirección opuesta. Si un observador atrapa una de las bolas y ve que es blanca, puede decir inmediatamente que la pelota lanzada en la otra dirección es negra.

Lo que hace que la mecánica cuántica sea tan especial es que sus equivalentes a las bolas no tienen estados determinados hasta que se miden. Es como si ambas bolas fueran grises, hasta que alguien mira una de ellas. Entonces la bola observada puede tomar al azar el color negro o el blanco. La otra bola tomará, inmediatamente, el color opuesto.

Pero ¿cómo es posible saber que las bolas no tenían cada una un color al principio? Incluso si parecían grises, tal vez tenían una etiqueta oculta en el interior que decía de qué color debían ponerse cuando alguien las mirara.

¿Existe el color cuando nadie está mirando?

Los pares entrelazados de la mecánica cuántica se pueden comparar con una máquina que arroja bolas de colores opuestos en direcciones opuestas. Cuando Bob atrapa una pelota y ve que es negra, inmediatamente sabe que Alice ha atrapado una blanca. En una teoría que suponga variables ocultas las bolas contienen información oculta sobre qué color han de mostrar. Sin embargo, la mecánica cuántica dice que las bolas eran grises hasta que alguien las miró, entonces una se volvió blanca al azar y la otra negra. Las desigualdades de Bell muestran que hay experimentos que pueden diferenciar entre estos casos. Tales experimentos han demostrado que la descripción de la mecánica cuántica es la correcta.



Una parte importante de la investigación premiada con el Premio Nobel de Física de este año está relacionada con las conocidas como desigualdades de Bell.

Las desigualdades de Bell permiten diferenciar entre la indeterminación de la mecánica cuántica y una descripción alternativa utilizando instrucciones secretas o variables ocultas. Los experimentos han demostrado que la naturaleza se comporta según lo predicho por la mecánica cuántica. Las bolas son grises, sin información secreta, y el azar determina cuál se vuelve negra y cuál se vuelve blanca al realizar el experimento.

El recurso más importante de la mecánica cuántica

Los estados cuánticos entrelazados pueden ser potencialmente usados como formas nuevas de almacenar, transferir y procesar información.

Sucedan cosas interesantes si las partículas de un par entrelazado viajan en direcciones opuestas y una de ellas se encuentra con una tercera partícula de tal manera que se entrelazan. Entran entonces en un nuevo estado compartido. La tercera partícula pierde su identidad, pero sus propiedades originales ahora se han transferido a la primera partícula del par original. Esta forma de transferir un estado cuántico desconocido de una partícula a otra se denomina **teletransportación cuántica**. Este tipo de experimento fue realizado por primera vez en 1997 por Anton Zeilinger y sus colegas.

Sorprendentemente, la teletransportación cuántica es la única forma de transferir información cuántica de un sistema a otro sin perder nada de ella ya que es absolutamente imposible medir todas las propiedades de un sistema cuántico y enviar la información a un destinatario que quiere reconstruir el sistema.

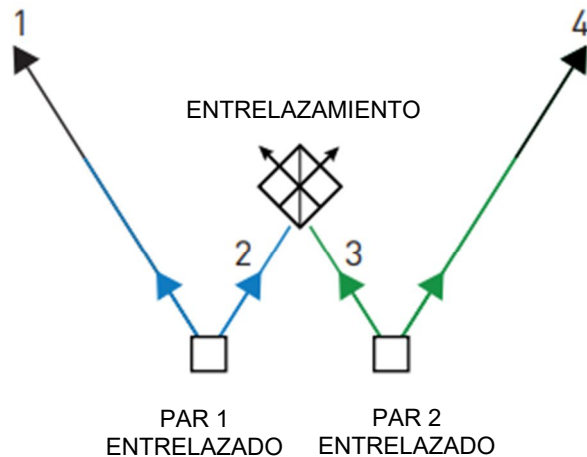
Esto se debe a que un sistema cuántico puede contener varias versiones de cada propiedad simultáneamente, y cada versión tiene una probabilidad de aparecer durante una medición. Tan pronto como se realiza la medición, solo queda una versión, a saber, la que fue leída por el instrumento de medición. Las otras han desaparecido y es imposible saber nada acerca de ellas. Sin embargo, propiedades cuánticas completamente desconocidas pueden transferirse mediante teletransportación cuántica y aparecer intactas en otra partícula, pero al precio de que se destruyan en la partícula original.

Una vez que esto se demostró experimentalmente, el siguiente paso fue utilizar dos pares de partículas entrelazadas. Si junta una partícula de cada par las otras dos partículas no perturbadas pueden entrelazarse a pesar de que nunca hayan estado en contacto entre sí. Este intercambio de entrelazamiento fue demostrado por primera vez en 1998 por el grupo de investigación de **Anton Zeilinger**.

Pares de fotones entrelazados pueden enviarse en direcciones opuestas a través de fibras ópticas y funcionar como señales en una red cuántica. El entrelazamiento entre dos pares permite ampliar las distancias entre los nodos de una red de este tipo. Existe un límite en la distancia a la que se pueden enviar los fotones a través de una fibra óptica antes de que sean absorbidos o pierdan sus propiedades. Las señales de luz ordinarias se pueden amplificar en el camino, pero esto no funciona con pares entrelazados. Un amplificador ha de capturar y medir la luz, lo que rompe el entrelazamiento. Sin embargo, el intercambio de entrelazamiento significa que es posible enviar el estado original más allá, transfiriéndolo así a distancias más largas de lo que hubiera sido posible de otro modo.

Entrelazamiento entre partículas que nunca han estado juntas

Dos pares de partículas entrelazadas se emiten desde diferentes fuentes. Dos partículas, una de cada par, se entrelazan. Las otras dos partículas (1 y 4 en el diagrama) estarán entonces entrelazadas. De esta manera, dos de las partículas que nunca han estado en contacto pueden entrelazarse.



©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

De la paradoja a la desigualdad

Estos avances llevaron años de investigación. Todo comenzó con la brillante intuición de que la mecánica cuántica permite que un solo sistema cuántico se divida en partes que aun estando separadas pueden comportarse como una unidad.

Esto va en contra de todas las ideas habituales sobre causa y efecto y la naturaleza de la realidad. ¿Cómo puede algo ser influenciado por un evento que ocurre en otro lugar sin haber intercambiado ningún tipo de señal con él? Una señal no puede viajar más rápido que la luz, pero en la mecánica cuántica no parece haber ninguna necesidad de una señal para conectar las diferentes partes de un sistema.

Albert Einstein consideró esto como inviable y estudió este fenómeno, junto con sus colegas Boris Podolsky y Nathan Rosen. El 1935 enunciaron lo llamada paradoja EPR: (iniciales de los investigadores): “La mecánica cuántica no parece proporcionar una descripción completa de la realidad”.

La pregunta era si podría haber una descripción más completa del mundo, donde la mecánica cuántica fuera solo una parte. Podría funcionar, por ejemplo, con partículas que llevan información oculta que se mostraría como resultado de un experimento. Las mediciones muestran entonces las propiedades que existen cuando son medidas. Este tipo de información se denomina **variables ocultas locales**.

El físico norirlandés **John Stewart Bell** (1928-1990), que trabajó en el CERN, analizó el problema. Descubrió que existe un tipo de experimento que puede determinar si el mundo es puramente mecánico cuántico o si podría haber otra descripción con variables ocultas. Si el experimento se repite muchas veces todas las teorías con variables ocultas muestran una correlación entre los resultados que debe ser inferior o, como máximo, igual a un valor específico, lo que recibe el nombre de **desigualdad de Bell**.

La mecánica cuántica puede violar esta desigualdad. Predice valores más altos para la correlación entre los resultados de lo que es posible a través de variables ocultas.

John Clauser se interesó en los fundamentos de la mecánica cuántica cuando era estudiante en la década de 1960. Una vez que leyó sobre la idea de Bell no pudo dejar de pensar en ella y, finalmente, él y otros tres investigadores pudieron presentar una propuesta para un tipo de experimento que puede usarse para probar la desigualdad de Bell.

El experimento consiste en enviar un par de partículas entrelazadas en direcciones opuestas. En la práctica se utilizan fotones de luz polarizada. Cuando se emiten la dirección de polarización es indeterminada y todo lo que es seguro es que las partículas tienen polarización paralela. Esto se puede investigar utilizando un filtro que permite la polarización que está orientada en una dirección particular (ver figura "Experimentando con las desigualdades de Bell"). Este es el efecto utilizado en muchas gafas de sol, que bloquean la luz que ha sido polarizada en un determinado plano, por ejemplo, al reflejarse en el agua.

Si ambas partículas en el experimento se envían hacia filtros que están orientados en el mismo plano, verticalmente, por ejemplo, y uno se desliza, entonces el otro también pasará. Si están en ángulo recto entre sí, uno se detendrá mientras que el otro pasará. El truco consiste en medir con los filtros colocados en diferentes, ya que entonces los resultados pueden variar: a veces se filtran ambos, a veces solo uno y, a veces, ninguno. La frecuencia con la que ambas partículas atraviesan el filtro depende del ángulo entre los filtros.

La mecánica cuántica conduce a una correlación entre las mediciones. La probabilidad de que una partícula pase depende del ángulo del filtro que mide la polarización de su compañero en el lado opuesto de la configuración experimental. Esto significa que los resultados de ambas mediciones, para algunos ángulos, violan una desigualdad de Bell y tienen una correlación más fuerte que si los resultados estuvieran regidos por variables ocultas y ya estuvieran predeterminados cuando se emitieron las partículas.

La desigualdad violada

John Clauser comenzó a trabajar en este experimento. Construyó un aparato que emitía dos fotones entrelazados a la vez, cada uno hacia un filtro que medía su polarización. En 1972, junto con el estudiante de doctorado Stuart Freedman (1944-2012), pudo mostrar un resultado que era una clara violación de una desigualdad de Bell y estaba de acuerdo con las predicciones de la mecánica cuántica.

En los años que siguieron, **John Clauser** y otros físicos continuaron discutiendo el experimento y sus limitaciones. Una de ellas era que el experimento era bastante ineficiente, tanto en lo que respecta a la producción como a la captura de partículas. La medida también estaba preestablecida, con los filtros en ángulos fijos. Por lo tanto, había lagunas en las que un observador podía cuestionar los resultados: ¿qué pasaría si la configuración experimental seleccionara de alguna manera las partículas que tenían una fuerte correlación y no detectara las otras? Si fuera así, las partículas aún podrían llevar información oculta.

Eliminar esta laguna fue difícil, porque los estados cuánticos entrelazados son muy frágiles y difíciles de manejar; es necesario tratar con fotones individuales. El estudiante de doctorado francés **Alain Aspect** construyó una nueva versión perfeccionada. En su experimento pudo registrar los fotones que pasaban por el filtro y los que no. Esto significó que se detectaron más fotones y las mediciones fueron mejores.

En la variante final de sus pruebas, también pudo dirigir los fotones hacia dos filtros diferentes que se colocaron en diferentes ángulos. El resultado era un mecanismo que cambiaba la dirección de los fotones entrelazados después de haber sido creados y emitidos desde su fuente. Los filtros estaban a solo seis metros de distancia, por lo que el cambio debía ocurrir en unas pocas milmillonésimas de segundo. Si la información sobre a qué filtro

llegaría el fotón influyera en cómo se emite desde la fuente, no estaría llegando a ese filtro. La información sobre los filtros de un lado tampoco podría llegar y afectar el resultado de la medición.

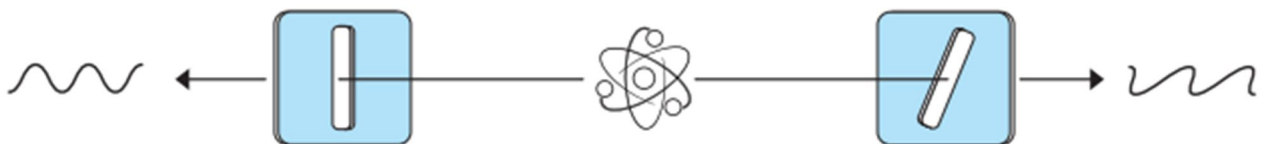
De esta forma, Alain Aspect cerró un importante resquicio y proporcionó un resultado muy claro: la mecánica cuántica es correcta y no hay variables ocultas.

La era de la información cuántica

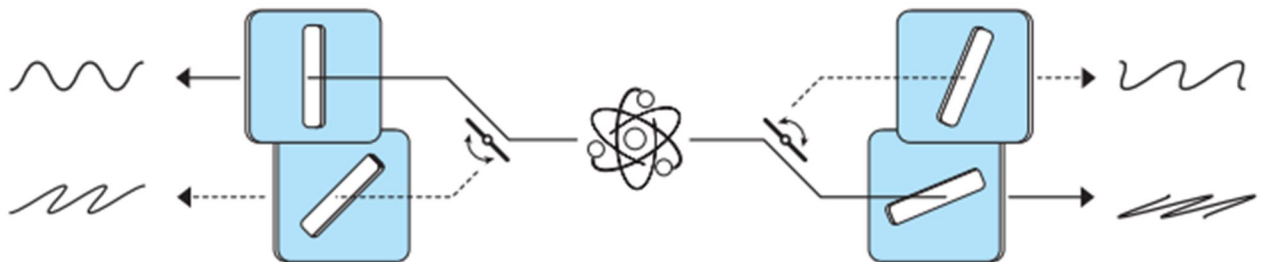
Estos y otros experimentos similares sentaron las bases de la intensa investigación que actualmente se lleva a cabo en el terreno de la información cuántica.

Ser capaz de manipular y gestionar estados cuánticos y todas sus propiedades nos da acceso a herramientas con un potencial inesperado. Esta es la base para la computación cuántica, la transferencia y el almacenamiento de información cuántica y los algoritmos para el cifrado cuántico. Actualmente se utilizan sistemas con más de dos partículas, todas ellas entrelazadas, que **Anton Zeilinger** y sus colegas fueron los primeros en explorar.

EXPERIMENTANDO CON LAS DESIGUALDADES DE BELL

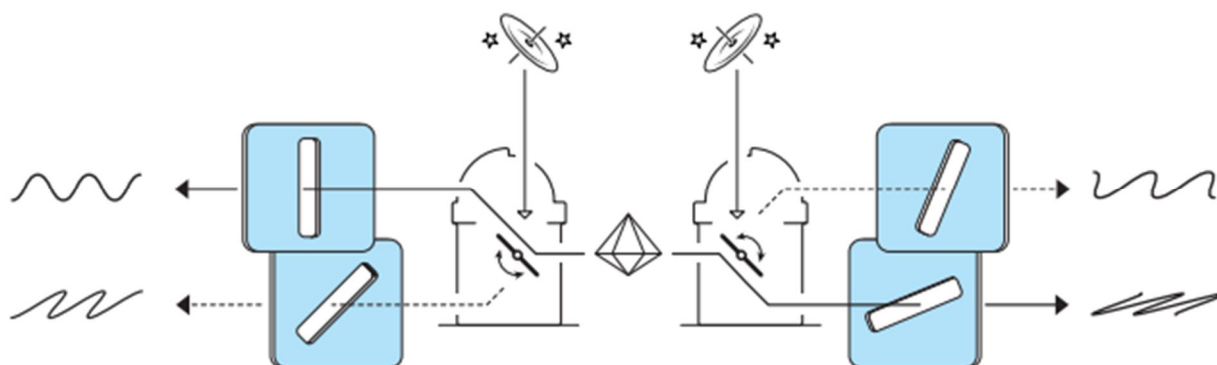


John Clauser usó átomos de calcio que podían emitir fotones entrelazados después de haberlos iluminado con una luz especial. Colocó un filtro a cada lado para medir la polarización de los fotones. Después de una serie de mediciones pudo demostrar que violaron una desigualdad de Bell.



Alain Aspect desarrolló este experimento utilizando una nueva forma de excitar los átomos para que emitieran fotones entrelazados a una velocidad mayor.

También podía elegir entre diferentes configuraciones, por lo que el sistema no contendría ninguna información anticipada que pudiera afectar los resultados.



Anton Zeilinger realizó más tarde pruebas de las desigualdades de Bell. Creó pares de fotones entrelazados al hacer incidir un láser en un cristal especial y usó números aleatorios para cambiar entre configuraciones de medición. Un experimento usó señales de galaxias distantes para controlar los filtros y asegurarse de que las señales no pudieran afectarse entre sí.

Herramientas cada vez más sofisticadas hacen pensar que las aplicaciones están cada vez más cerca. Se han demostrado estados cuánticos entrelazados entre fotones que se han enviado a través de decenas de kilómetros de fibra óptica y entre un satélite y una estación en tierra. En poco tiempo investigadores de todo el mundo han encontrado muchas formas nuevas de utilizar la propiedad más poderosa de la mecánica cuántica.

La primera revolución cuántica nos dio transistores y láseres, pero ahora estamos entrando en una nueva era gracias a las herramientas desarrolladas para manipular sistemas con partículas entrelazadas.

OTRAS LECTURAS

Se puede encontrar información adicional sobre los premios de este año, incluidos antecedentes científicos en inglés, en el sitio web de la Real Academia Sueca de Ciencias, www.kva.se, y en www.nobelprize.org, donde se pueden ver videos de las conferencias de prensa, las Conferencias Nobel y más. La información sobre exposiciones y actividades relacionadas con los Premios Nobel y el Premio de Ciencias Económicas está disponible en www.nobelprizemuseum.se.

La Real Academia Sueca de Ciencias ha decidido otorgar el Premio Nobel de Física 2022 a		
ALAIN ASPECT	JOHN F. CLAUSER	ANTON ZEILINGER
Nacido en 1947 en Agen, Francia. Doctorado 1983 por la Universidad Paris-Sud, Orsay, Francia. Profesor de la Escuela de Graduados del Institut d'Optique - Université Paris-Saclay y École Polytechnique, Palaiseau, Francia.	Nacido en 1942 en Pasadena, CA, EE. UU. PhD 1969 por la Universidad de Columbia, Nueva York, EE. UU. Físico investigador, J.F. Clauser & Assoc., Walnut Creek, CA, EE. UU.	Nacido en 1945 en Ried en Innkreis, Austria. PhD 1971 de la Universidad de Viena, Austria. Profesor de la Universidad de Viena, Austria.
"por los experimentos con fotones entrelazados, el establecimiento de la violación de las desigualdades de Bell y el desarrollo pionero de la ciencia de la información cuántica"		