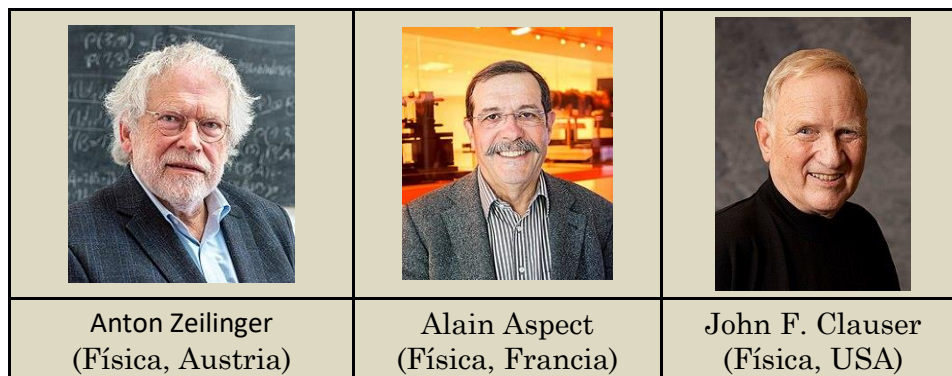




FÍSICA 2022

El entrelazamiento cuántico: de la teoría a la tecnología

El Premio Nobel de Física 2022 fue otorgado a Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger por el desarrollo de experimentos para detectar partículas entrelazadas, estableciendo que no se cumple la regla de desigualdad de Bell y siendo pioneros en la ciencia de la información cuántica”.



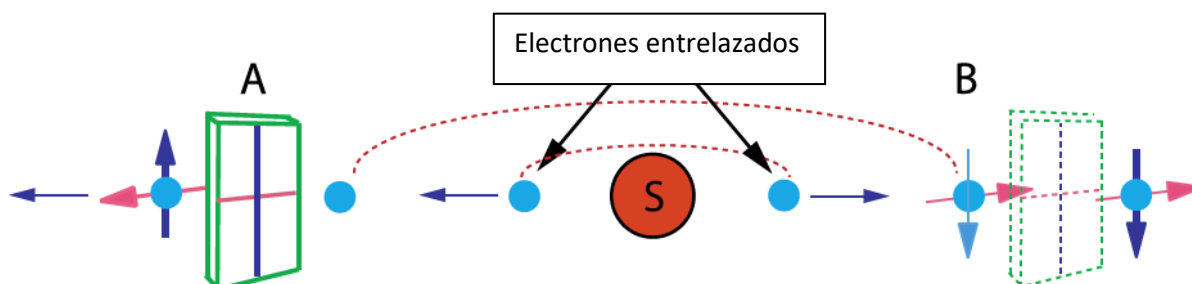
Estos experimentos tan ingeniosos han demostrado tener un gran potencial para investigar y controlar partículas que se encuentran en un estado entrelazado. Lo que le sucede a una partícula determina lo que le sucede a la otra, incluso si están demasiado separadas. El desarrollo de estas herramientas experimentales ha sentado las bases para una nueva era de la tecnología cuántica.

Utilizaremos el estudio de una propiedad cuántica como es el espín de dos electrones entrelazados para poder explicar estos avances.

Así pues, se conoce que dos electrones en la capa s (por ejemplo, de la capa $4s^2$ del átomo de calcio) están entrelazados, es decir, si uno tiene espín $+1/2$, el otro tendrá un espín de $-1/2$ (Principio de exclusión de Pauli). Si separamos, con experimentos adecuados, esta pareja de electrones, incluso a grandes distancias, al medir una propiedad en una de estas partículas, inmediatamente se puede determinar el resultado de una medición en la otra partícula, en este caso, opuesta, sin necesidad de comprobarla, es decir, medirla u observarla.

Albert Einstein denominó esta interacción como una “acción fantasmagórica a distancia” y Erwin Schrödinger dijo que era el rasgo más importante de la mecánica cuántica.

Para confirmar que no hubiera interferencias con la fuente emisora (S) estas partículas son separadas a grandes distancias para observarlas o medirlas en dos medidores diferentes, A y B. Cuando un observador en A mide (al azar) el espín de un electrón y obtiene $+1/2$, inmediatamente (en el otro lado) el otro electrón tiene un espín de $-1/2$ sin necesidad de comprobarlo.



En este punto, sería posible pensar que hubiera alguna “señal” que transmitiera tal información desde A hasta B de modo inmediato, pero esta señal iría más rápido que la velocidad de la luz y esto se ha demostrado que no es cierto. Entonces, otra posibilidad sería pensar que hay algunas variables que no estamos teniendo en cuenta en la mecánica cuántica

(variables ocultas) y que confiere a dicho sistema de partículas entrelazadas un espín concreto a cada una de ellas antes y después de separarse. En otras palabras, sería como si ambas partículas tuvieran un procedimiento que les dijera, al ser observadas, en qué estados ponerse, $+1/2$ o $-1/2$, una y la otra, respectivamente.

Sin embargo, la mecánica cuántica establece que cuando estos electrones están separados, los espines pueden ser $+1/2$ o $-1/2$ al mismo tiempo, es decir, una superposición de configuraciones o estados indeterminados antes de ser observados, es decir, son indistinguibles. Finalmente, cuando alguien observa el estado de la partícula en A obtiene al azar un resultado que será justo el opuesto en B. Esto es, si para un número de medidas, en A se ha obtenido, por ejemplo, el valor $+1/2$ un 30% de veces, en B se habrá obtenido un 30% el valor $-1/2$. Se dice que esta información ha pasado de una partícula a otra recibiendo este fenómeno el nombre de entrelazamiento cuántico o teleportación. En otras palabras, los sistemas cuánticos “entrelazados” pueden contener varias versiones de cada propiedad simultáneamente, donde cada versión tiene una cierta probabilidad de aparecer durante una medición.

Ahora bien, el siguiente paso es comprobar que no se cumple la desigualdad matemática de Bell la cual establece que cuando existe una correlación entre las medidas realizadas por separado, esta debe ser menor o igual que la que existe con medidas realizadas de manera conjunta. Para explicar esto vamos a simular el siguiente estudio estadístico:

El observador en A introduce **un cambio** en su sistema de detección de manera que ahora obtiene un 10% más de veces el valor $+1/2$, lo que significaría que, en B, sin ser observado, daría un 10% más de veces el valor $-1/2$.

Si solo en B ocurre la misma modificación, se obtiene también un resultado similar, pero con un 10% más de veces el valor $-1/2$.

Pero, ¿qué ocurriría si ambos observadores introducen, a la vez, la misma modificación en sus respectivos sistemas de detección? Parece indicar que existe cierta simetría en el proceso y que en A se esperaría el valor $+1/2$ un 20% de veces y justo lo contrario en B.

$$10\% (A) + 10\% (B) \leq 20\% \text{ (desigualdad de Bell)}$$

Pero tal fue la sorpresa que los resultados de esas correlaciones fueron mayores (27%) que la suma de ambos procesos por separados, demostrando que no se cumple dicha igualdad y que no hay nada intrínseco o algún tipo de variables ocultas que le diga al sistema qué valores tomar. La correlación entre este tipo de partículas es aún más fuerte y se demuestra que la medida (la observación) de una propiedad en A modifica la probabilidad de aparecer con un estado cuántico u otro en la siguiente medida. Esto a su vez, se transmite de una partícula a otra “por entrelazamiento cuántico” comprobándose que esas correlaciones por separados (en A o en B) no son equivalentes ($\neq 10\%$) cuando la propiedad se observa al mismo tiempo en A y B.