

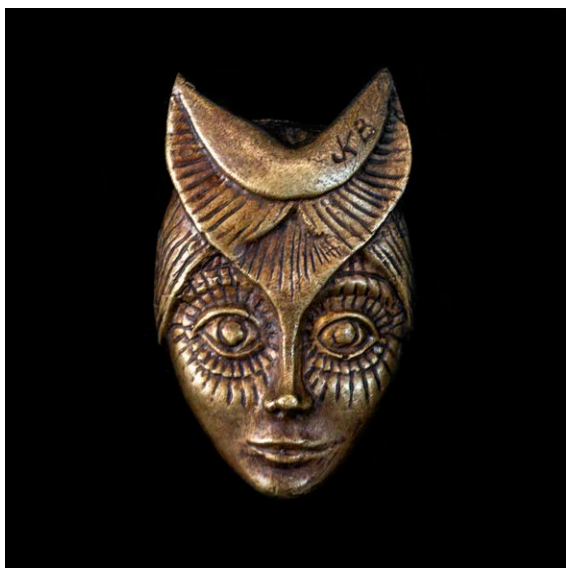
# Cómo se midió por primera vez el entrelazamiento cuántico

A. Akari **Uc Guerra**  
Giselle N. **Morales Rosales**

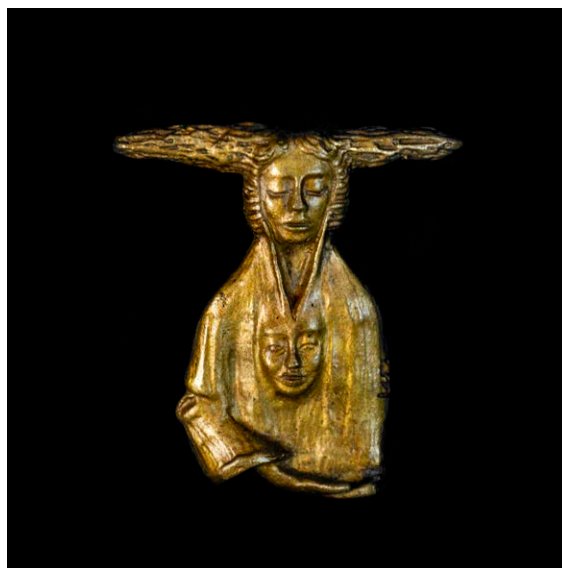
El entrelazamiento es una propiedad de la mecánica cuántica que no tiene ningún parecido con la física clásica. Este concepto continúa desafiando a los físicos más brillantes de cada época, ya que no se conoce completamente su naturaleza. El entrelazamiento sirve como una correlación no local, entendida esta como una comunicación a distancia, más fuerte que las que se han conocido (en particular, podemos citar otra correlación o comunicación a distancia llamada discordia cuántica; Ávila, 2018), por lo que puede servir como una herramienta poderosa que nos ayude a superar ciertas limitaciones de la física clásica (Wineland, 2013).

El entrelazamiento cuántico es un fenómeno caracterizado por el hecho de que dos o más partículas están íntimamente correlacionadas entre sí, de forma que no exista la posibilidad de describirlas de manera independiente (Schrödinger, 1935). De manera sencilla, se puede decir que, cuando sea medido el estado de una de estas partículas, de forma inmediata ya se conoce el estado de la o las otras, sin importar la distancia que las separe.

Para poder comprender apropiadamente qué es entrelazamiento cuántico, se hace uso de conceptos básicos de la mecánica cuántica. Se sabe, por ejemplo, que las partículas no pueden ser definidas por una trayectoria cinemática y que, en cambio, deben definirse mediante



© José Kuri Breña. *Búho*.  
Escultura, joya miniatura, bronce a la cera perdida, sfp.



© José Kuri Breña. *Nube*.  
Escultura, joya miniatura, bronce a la cera perdida, sfp.

una función de onda que refleje la probabilidad de que, en determinado punto, sea encontrado un estado específico de la partícula que se está analizando (Born, 1926).

El entrelazamiento cuántico ocurre cuando dos o más partículas se crean en un estado tal que sus ondas se encuentran estrechamente correlacionadas, lo que quiere decir que estas partículas están en un estado de superposición que da la posibilidad de encontrarlas en dos o más estados.

Un ejemplo claro ocurre cuando se crean dos fotones en un estado en el que ambas partículas están polarizadas perpendicularmente, por lo que, si se mide la polarización de un fotón, de forma automática se conoce la del otro fotón.

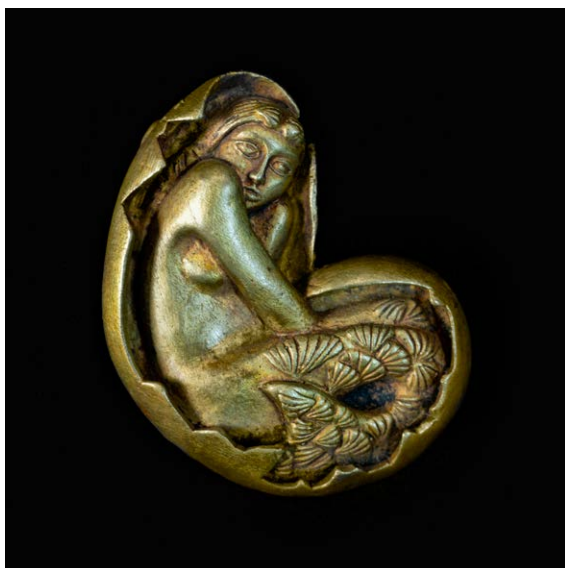
El término “entrelazamiento cuántico” fue acuñado desde los inicios de la mecánica cuántica. Fue en 1927 cuando Erwin Schrödinger propuso en su artículo “*Quantisierung als Eigenwertproblem*” (“Cuantización como problema de autovalores”), el concepto de *entanglement*, que usó para describir el estado de superposición en el que hay dos partículas que están tan correlacionadas que no es posible describirlas de forma independiente (Schrödinger, 1927).

En este artículo también propuso que las partículas cuánticas pueden estar enlazadas (esto quiere decir que la medición del estado de una partícula afectaría de igual manera a la otra partícula) sin importar qué tan separadas estén.

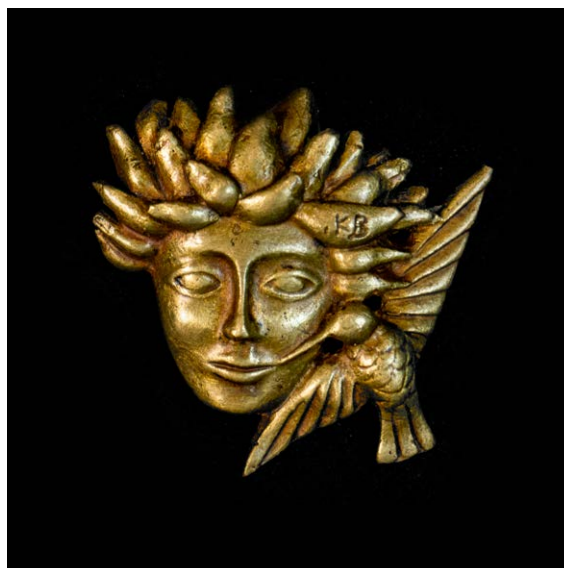
En palabras de Schrödinger, el entrelazamiento es “no uno sino más bien el rasgo característico de la mecánica cuántica”. Pero estas ideas fueron descritas informalmente.

Más tarde, en 1935, Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) discutieron el efecto del entrelazamiento en su artículo “*Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*” (“¿Se puede considerar completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física?”), publicado en 1935, cuyo objetivo fue mostrar que la descripción realizada por Schrödinger sobre la mecánica cuántica se encontraba aparentemente incompleta. En ese artículo propusieron un experimento mental que demostraba que, si las mediciones de dos partículas entrelazadas no pudieran ser descritas por las propiedades de las partículas individuales, entonces la mecánica cuántica estaría incompleta (Einstein, Podolsky y Rosen, 1935).

Fue en 1964 cuando John Bell demostró que el entrelazamiento cuántico era más que una ilusión en su artículo “*On the Einstein-Podolsky-Rosen*



© José Kuri Breña. *Sirena*.  
Escultura, joya miniatura, bronce a la cera perdida, sfp.



© José Kuri Breña. *Alcachofa colibrí*.  
Escultura, joya miniatura, bronce a la cera perdida, sfp.

paradox” (“Sobre la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen”). Este artículo se basó principalmente en el experimento mental realizado por EPR. En este experimento, dos partículas entrelazadas son separadas y llevadas a dos laboratorios diferentes.

Bell demostró que, si dos partículas estuvieran correlacionadas de manera que no pudiera explicarse por las propiedades de las partículas individuales, eso daría por hecho que el entrelazamiento cuántico es un fenómeno real y que viola el principio de localidad, el cual establece que la información no puede viajar más rápido que la velocidad de la luz.

El trabajo de Bell fue un punto clave para la comprensión del entrelazamiento cuántico porque, además de demostrarlo como un fenómeno real, también mostró que no puede ser explicado por las leyes de la física cuántica (Bell, 1964).

En concreto, el trabajo de Bell demostró que el entrelazamiento cuántico no es compatible con el realismo local, una teoría filosófica que sostiene que cada partícula tiene un estado bien definido, incluso si no se lo está midiendo.

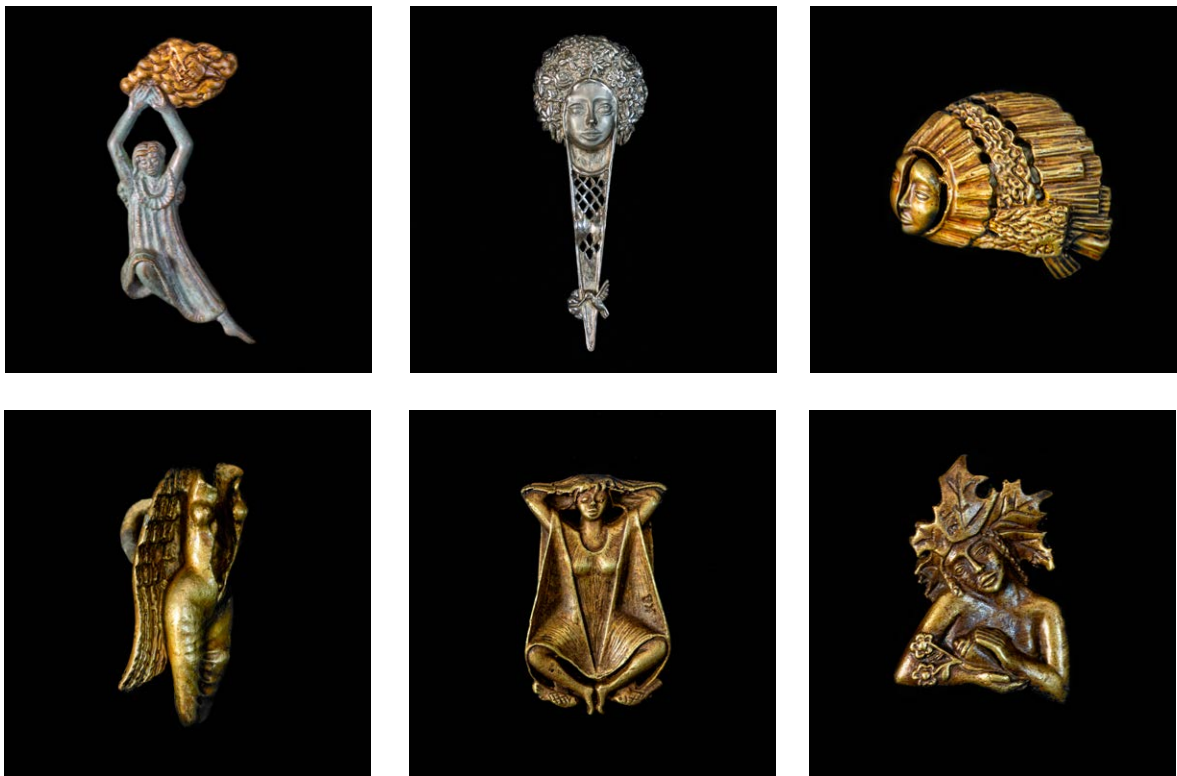
Esto quiere decir que el realismo local no puede generar una explicación de lo que ocurre con el entrelazamiento cuántico, y que debemos aceptar que la naturaleza del universo es mucho más compleja de lo que cualquiera pudiera imaginar.

Entre 1970 y 1990, se realizaron una serie de experimentos que confirmaron el entrelazamiento cuántico como un fenómeno real. En uno de ellos se hizo uso de fotones entrelazados, y al demostrar que las mediciones realizadas en estos estaban correlacionadas, se comprobó que violaban el principio de localidad (Batle *et al.*, 2017).

La primera vez en que se midió el entrelazamiento cuántico de manera experimental fue en 1982 por Alain Aspect, Philippe Grangier y Gérard Roger en el Laboratorio de Óptica Cuántica del CNRS en Orsay, Francia. Para realizar este experimento, en palabras sencillas, crearon dos pares de fotones entrelazados; después, estos fotones fueron separados con varios metros de distancia entre ellos y procedieron a medirlos independientemente demostrándose que existía correlación entre ellos a pesar de la distancia entre ambos.

En este punto vale la pena observar que, en su momento, Bell no midió entrelazamiento cuántico como tal. Así, formalmente, la primera medición experimental de entrelazamiento cuántico fue hecha por Alain Aspect.

Gracias a estos y más experimentos a lo largo de los años es que se ha podido entender mejor el



© José Kuri Breña. Escultura, joya miniatura, bronce a la cera perdida, sfp.

entrelazamiento cuántico y hacer uso del mismo para desarrollar nuevas tecnologías que tienen potencial para revolucionar al mundo. Por ejemplo, el desarrollo de nuevos protocolos criptográficos para uso en finanzas, milicia y telecomunicaciones. También, abrirá las puertas para el desarrollo del Internet cuántico.

El concepto de entrelazamiento cuántico está lejos de ser conocido completamente. Una de las implicaciones más fuertes de dicho concepto en la educación es el desarrollo de una nueva licenciatura que se llame Ingeniería Cuántica.

## REFERENCIAS

Aspect A, Grangier P and Roger G (1982). Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities. *Physical Review Letters* 49(2):91.

Batle J, Abutalib M and Abdalla S (2017). Anomaly of non-locality and entanglement in teaching quantum information. *Revista Mexicana de Física* 63(1):1-5.

Bell JS (1964). On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics Physique Fizika* 1(3):195.

Born M (1927). Quantum mechanics of collision processes. *Zeit. Phys.* 38:803-827.

Einstein A, Podolsky B and Rosen N (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review* 47(10):777-780.

Schrödinger E (1927). Quantisierung als Eigenwertproblem. *Annalen der Physik* 384(4):79-93.

Schrödinger E (1935). The present status of quantum mechanics. *Die Naturwissenschaften* 23(48):1-26.

Wineland DJ (2013). Nobel Lecture: Superposition, entanglement, and raising Schrödinger's cat. *Reviews of Modern Physics* 85(3):1103.

Fine A and Ryckman TA (2020). "The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory." *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2020 Edition). Recuperado de: <https://plato.stanford.edu/archives/sum2020/entries/qt-epr/>.

**A. Akari Uc Guerra**  
**Giselle N. Morales Rosales**  
**Centro Universitario**  
**UAEM Valle de Chalco**  
**akarisuc@gmail.com**