

El Premio Nobel de Física 2012

Control de partículas en un mundo cuántico

Serge Laroche y David J. Wineland, de forma independiente, han inventado y desarrollado métodos innovadores para medir y manipular partículas individuales conservando su naturaleza mecánico-cuántica de una forma que, hasta hace muy poco, se consideraba inalcanzable.

Haroche y Wineland han abierto la puerta a una nueva era en la experimentación en física cuántica al lograr la observación directa de sistemas cuánticos individuales sin destruirlos. Con sus ingeniosos métodos experimentales han logrado medir y controlar estados cuánticos muy frágiles permitiendo con sus investigaciones dar los primeros pasos hacia la construcción de un nuevo tipo de ordenador súper rápido, basado en la física cuántica. Estos métodos también han contribuido a la construcción de relojes extremadamente precisos que podrían convertirse en la futura base de un nuevo estándar de tiempo con una precisión cien veces mayor que los actuales relojes de cesio.



Figura 1. El Nobel de Física ha sido concedido por lograr controlar partículas individuales. Los galardonados han conseguido que partículas individuales atrapadas se comporten de acuerdo con las leyes de la física cuántica.

Las leyes de la física clásica dejan de ser aplicables cuando tratamos con las partículas individuales que forman la luz o la materia, debiendo recurrir entonces a la física cuántica. Pero no es fácil disponer de partículas aisladas de su entorno, ya que estas partículas pierden sus misteriosas propiedades cuánticas en cuanto interactúan con el mundo exterior.

Así muchos fenómenos aparentemente extraños predichos por la mecánica cuántica no podían ser observados directamente y los investigadores sólo podían realizar "experimentos mentales" que los pusieran de manifiesto.

Los galardonados trabajan en el campo de la óptica cuántica que estudia la interacción fundamental entre la luz y la materia, un campo que ha tenido un progreso considerable desde mediados de la década de 1980. Sus métodos tienen muchas cosas en común. David Wineland atrapa átomos con carga (iones), controlándolos y midiéndolos con luz (fotones). Serge Haroche adopta el enfoque opuesto: controla y mide fotones o partículas de luz mediante átomos.

Control de iones individuales en una trampa

En el laboratorio de David Wineland en Boulder, Colorado, átomos con carga eléctrica (iones) se mantienen dentro de una trampa formada por campos eléctricos que los rodean. Las partículas se mantienen aisladas del calor y la radiación de su entorno realizando los experimentos en el vacío y a temperaturas extremadamente bajas.

El dominio del arte de la creación y utilización de rayos láser es uno de los secretos que está detrás del avance de Wineland. El láser se utiliza para suprimir el movimiento térmico de los iones atrapados, situando así el ion en su estado de menor energía y permitiendo el estudio de los fenómenos. Un pulso de láser cuidadosamente sintonizado puede utilizarse para situar el ion en un estado de superposición, en el que coexisten, de forma simultánea, dos estados (cuánticos) diferentes. Por ejemplo, puede lograrse que el ion ocupe dos niveles de energía diferentes al mismo tiempo. Se comienza en un nivel más bajo de energía y el pulso de láser suministra pequeños empujones hasta situar el ion a mitad de camino hacia un nivel de energía superior situándolo entre los dos niveles, en una superposición de energía, con una probabilidad idéntica de terminar en cualquiera de ellos. De esta manera puede estudiarse la superposición cuántica de estados de energía.

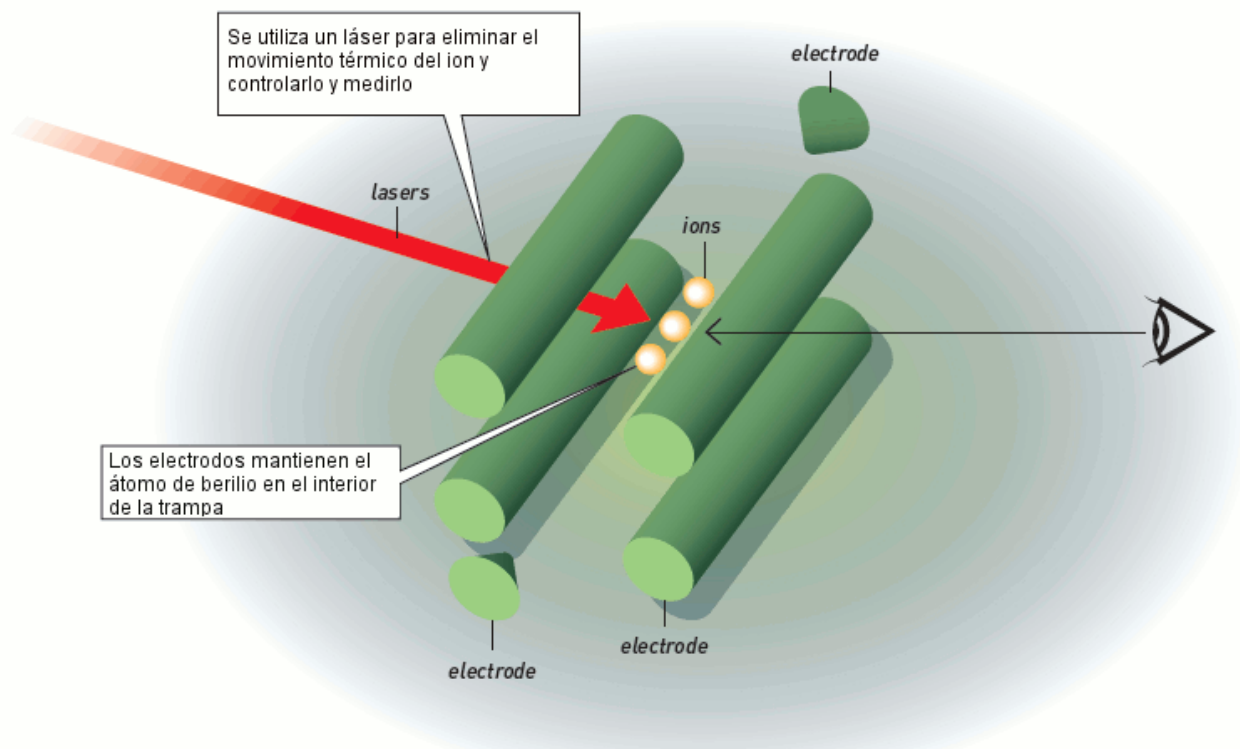


Figura 2. En el laboratorio de David Wineland, en Boulder, Colorado, átomos con carga eléctrica (iones) se mantienen confinados en el interior de campos eléctricos que los rodean. El arte de crear y mantener pulsos de láser está detrás de los logros de Wineland. El láser se utiliza para situar el ion en su estado de más baja energía permitiendo el estudio de fenómenos cuánticos

Control de fotones individuales en una trampa

Serge Haroche y su grupo de investigación emplean un método diferente para revelar los misterios del mundo cuántico. En su laboratorio de París fotones de microondas rebotan continuamente entre dos espejos situados a unos tres centímetros de distancia. Los espejos están hechos de material superconductor y se han enfriado a una temperatura muy cercana al cero absoluto. Estos espejos superconductores son los más brillantes del mundo. Su capacidad de reflexión es tan grande que un solo fotón puede rebotar dentro de la cavidad durante casi una décima de segundo antes de que se pierda o se absorba. Durante este largo tiempo de vida el fotón habrá viajado 40 000 kilómetros, equivalentes a un viaje alrededor de la Tierra.

Durante la larga vida del fotón atrapado pueden realizarse muchas manipulaciones cuánticas. Haroche utiliza átomos especialmente preparados, denominados *átomos de Rydberg* (en honor del físico sueco Johannes Rydberg) para controlar y medir los fotones de microondas en la cavidad. Un átomo de Rydberg tiene un radio de unos 125 nanómetros (aproximadamente 1 000 veces mayor que los átomos típicos). Estos gigantes átomos de Rydberg, con forma de rosquilla, se envían dentro de la cavidad uno a uno a una velocidad cuidadosamente escogida, para que la interacción con los fotones de microondas se produzca de una manera bien controlada.

El átomo de Rydberg atraviesa la cavidad y los fotones de microondas, pero la interacción entre el fotón y el átomo crea un cambio en la fase del estado cuántico del átomo. Si pensamos en el estado cuántico como una onda, las crestas y los valles de la onda pueden ser desplazados. Este cambio de fase puede medirse cuando el átomo sale de la cavidad, revelando así la presencia o ausencia de un fotón dentro de la cavidad. Si no hay fotón, no hay cambio de fase. Haroche puede medir de esta forma un solo fotón sin destruirlo.

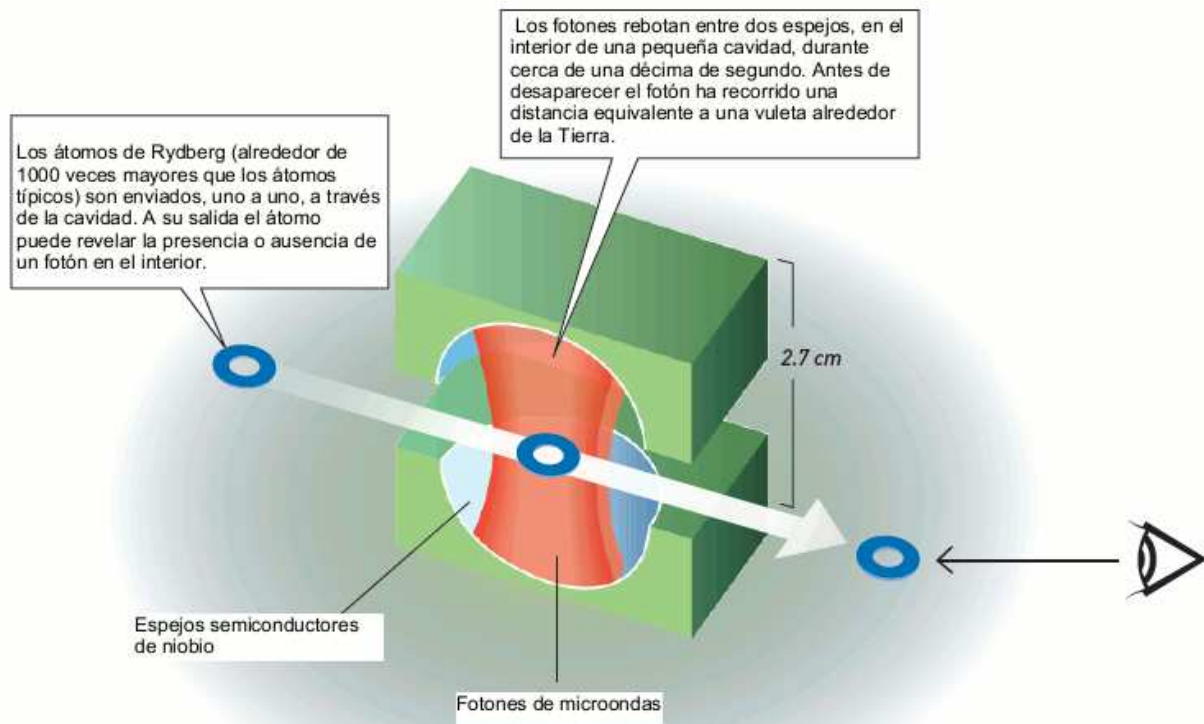


Figura 3. En el laboratorio de Serge Haroche, en París, en el vacío y a una temperatura cercana al cero absoluto los fotones de microondas rebotan entre dos espejos. Los espejos tienen un poder de reflexión tal alto que un fotón puede permanecer entre ambos sin ser absorbido durante casi una décima de segundo. Durante este tiempo pueden efectuarse muchas manipulaciones cuánticas con él sin destruirlo.

Con un método similar Haroche y su grupo consiguen contar los fotones dentro de la cavidad, como un niño cuenta canicas en un tazón. Esto puede parecer fácil, pero requiere una habilidad y destreza extraordinaria porque los fotones, a diferencia de las canicas, son destruidos inmediatamente por el contacto con el mundo exterior. A partir de sus métodos para contar fotones Haroche y colaboradores han diseñado métodos para seguir la evolución de un estado cuántico individual en tiempo real, paso a paso.

Paradojas de la mecánica cuántica

La mecánica cuántica describe un mundo microscópico invisible para nuestros ojos donde las cosas suceden de forma contraria a las expectativas y experiencias que tenemos sobre los fenómenos físicos en el mundo macroscópico, clásico. La incertidumbre o aleatoriedad es inherente a la física en el mundo cuántico. Un ejemplo de este extraño comportamiento es la superposición de estados, ya que una partícula cuántica puede estar simultáneamente en varios estados diferentes. Normalmente no pensamos que una canica pueda estar simultáneamente aquí y allí, pero este sería el caso si se tratara de una canica cuántica. La superposición de estados nos dice que si tratamos de medir su posición tenemos la misma posibilidad de que la canica se encuentre aquí o allá.

¿Por qué nunca somos conscientes de estas extrañas facetas de nuestro mundo? ¿Por qué no observamos canicas en una superposición en nuestra vida diaria? El físico austriaco y Premio Nobel (Física, 1933) Erwin Schrödinger se planteó esta pregunta. Como muchos otros pioneros de la teoría cuántica, intentó comprender e interpretar sus implicaciones. A finales de 1952, escribió: "Nosotros nunca experimentamos con únicamente un electrón, átomo o (pequeña) molécula. Cuando alguna vez, mediante un experimentos mental, lo hacemos, invariablemente llegamos a consecuencias ridículas..."

Con el fin de ilustrar las consecuencias absurdas de moverse entre el micro mundo de la física cuántica y nuestro macro mundo cotidiano, Schrödinger describe un experimento con un gato co-

mo protagonista. El gato de Schrödinger está completamente aislado del mundo exterior dentro de una caja. La caja también contiene una botella de mortal cianuro que es liberado si alguno de los átomos radiactivos, que también están en el interior de la caja, se desintegra.

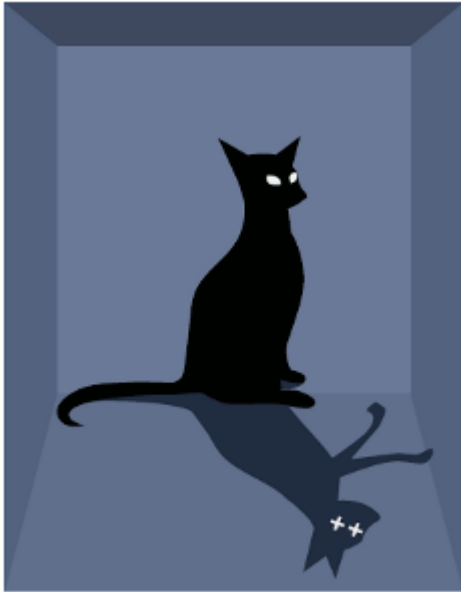


Figura 4. El gato de Schrödinger.

En 1935 el físico austriaco, y Premio Nobel de Física, Erwin Schrödinger, propuso un experimento mental en el que se situaba un gato en el interior de una caja para ilustrar lo absurdo que puede ser el mundo cuántico mirado desde nuestro mundo macroscópico. Los sistemas cuánticos, partículas, átomos o cualquier otra cosa del mundo de lo muy pequeño, pueden existir en dos estados a la vez, lo que se conoce en física con el nombre de superposición de estados.

En el experimento mental de Schrödinger el gato situado en el interior de la caja se encuentra en un estado que es la superposición de vivo y muerto. Si ahora tratamos de observar lo que sucede en el interior, corremos el riesgo de matarlo, ya que la superposición cuántica es sumamente sensible a la interacción con el entorno y el mínimo intento de observación hace que se produzca un "colapso" en el estado del gato hacia una de las posibilidades: vivo o muerto.

de la otra. El entrelazamiento de los campo de microondas y los átomos de Rydberg permitió a Haroche visualizar dentro de su cavidad el equivalente a los estados cuánticos de vida y muerte del gato, siguiendo paso a paso, átomo a átomo, como ocurre la transición desde la superposición cuántica de estados a un estado bien definido de la física clásica.

La desintegración radiactiva se rige por las leyes de la mecánica cuántica, según las cuales el material radiactivo se encuentra en un estado de superposición de los estados correspondientes a la desintegración y la no desintegración. El gato, en consecuencia, también debe estar en un estado de superposición de los estados vivo y muerto. Ahora, si echamos un vistazo dentro de la caja, corremos el riesgo de matar al gato ya que la superposición cuántica es sensible a la interacción con el entorno y al menor intento de observación el estado cuántico del gato "colapsa" a uno de los dos posibles: muerto o vivo. En opinión de Schrödinger este experimento mental conduce a una conclusión absurda. Según se dice, el propio Schrödinger intentó, más tarde, disculparse por añadir más confusión al mundo cuántico.

Los laureados con el Nobel de 2012 han sido capaces de mapear el estado cuántico del gato. Gracias a sus creativos experimentos han conseguido mostrar con gran detalle cómo el acto de medir causa el colapso del estado cuántico haciéndolo perder su carácter de superposición. En lugar del gato de Schrödinger, Haroche y Wineland atrapan partículas cuánticas y las colocan, como el gato, en superposición de estados. Estos objetos cuánticos no son realmente macroscópicos como un gato, pero siguen siendo bastante grandes para los estandars cuánticos.

Dentro de la cavidad de Haroche los fotones se sitúan simultáneamente en estados con fases opuestas, algo similar a un cronómetro cuya aguja girara hacia la derecha y hacia la izquierda simultáneamente. El campo de microondas dentro de la cavidad es sondeado a continuación con átomos de Rydberg. El resultado es otro extraño efecto cuántico llamado *entrelazamiento*. El entrelazamiento también había sido descrito por Erwin Schrödinger y puede ocurrir entre dos o más partículas cuánticas que no estando en contacto directo pueden permanecer ligadas entre ellas. Cualquier cambio en las propiedades de una de ellas afecta inmediatamente a las

Al borde de una nueva revolución en los ordenadores

Una posible aplicación de las trampas de iones con la que sueñan muchos científicos es el ordenador cuántico. En las actuales computadoras clásicas la unidad más pequeña de información es el bit que toma el valor 1 ó 0. En una computadora cuántica, sin embargo, la unidad básica de información – un bit cuántico o *qubit* – puede ser 1 y 0 al mismo tiempo. Dos bits cuánticos simultáneamente pueden tomar cuatro valores – 00, 01, 10 y 11 – y cada qubit adicional duplica la

cantidad de estados posibles. Para n bits cuánticos hay 2^n estados posibles y un ordenador cuántico de sólo 300 qubits podría contener 2^{300} valores al mismo tiempo, más que el número de átomos en el universo.

El grupo de Wineland fue el primero en el mundo en realizar una operación cuántica con dos bits cuánticos. Puesto que se han realizado operaciones de control con uno o pocos qubits, no hay en principio ninguna razón para creer que no sería posible lograr tales operaciones con muchos más qubits. Sin embargo, construir un ordenador cuántico presenta un enorme desafío práctico. Tiene que satisfacer dos requisitos opuestos: los qubits deben estar adecuadamente aislados de su entorno para no destruir sus propiedades cuánticas y, a la vez, deben ser capaces de comunicarse con el mundo exterior con el fin de transmitir los resultados de sus cálculos. Quizás el ordenador cuántico se construya en este siglo. Si es así, cambiará nuestras vidas de manera radical, de la misma forma que el ordenador clásico transformó la vida en el siglo pasado.

Nuevos relojes

David Wineland y su equipo de investigadores también han utilizado iones en una trampa para construir un reloj que es cien veces más preciso que los relojes atómicos de cesio que actualmente son el estándar para la medición del tiempo. Medimos el tiempo ajustando o sincronizando todos los relojes con un estándar. Los relojes de cesio funcionan en el rango de las microondas, mientras que los relojes de iones de Wineland usan luz visible (de ahí su nombre: relojes ópticos). Un reloj óptico puede constar de uno o dos iones en una trampa. De los dos iones, uno se utiliza como reloj y el otro se utiliza para leer el reloj sin alterar su estado cuántico, lo que provocaría su destrucción. La precisión de un reloj óptico es mejor que una parte en 10^{17} , lo que significa que si hubiéramos comenzado a medir el tiempo al comienzo del universo, en el Big Bang, hace 14 000 millones de años, el reloj óptico sólo habría atrasado unos cinco segundos.



Figura 5. Reloj óptico. Una aplicación práctica de iones en una trampa sería la posibilidad de construir un reloj cien veces más preciso que los actuales relojes de cesio (relojes atómicos), frecuentemente usados como estándares de tiempo. Se utilizan dos iones, uno es usado como reloj y el otro se emplea para leer el reloj sin alterar su estado cuántico, lo que causaría su destrucción.

Con una medición precisa de tiempo, algunos fenómenos extremadamente sutiles y hermosos de la naturaleza se han observado, como cambios en el flujo del tiempo o diminutas variaciones de gravedad en el entramado espacio-tiempo. Según la teoría de la relatividad de Einstein el tiempo es afectado por el movimiento y la gravedad. Cuanto mayor sea la velocidad y más intensa la gravedad, más lento será el paso del tiempo. No somos conscientes de estos efectos, pero forman parte de nuestra vida cotidiana. La navegación con el GPS depende de la exactitud de recepción de las señales de satélites cuyos relojes han sido minuciosamente calibrados teniendo en cuenta que la gravedad es algo más débil varios cientos de kilómetros sobre la superficie terrestre. Con un reloj óptico es posible medir la variación del tiempo cuando la velocidad varía en menos de 10 metros por segundo, o cuando se altera la gravedad como consecuencia de una diferencia de altura de sólo 30 centímetros.

LINKS AND FURTHER READING

Additional information on this year's Prizes, including a scientific background article in English, may be found at the website of the Royal Swedish Academy of Sciences, <http://kva.se>, and at <http://nobelprize.org>. They also include web-TV versions of the press conferences at which the awards were announced. Information on exhibitions and activities related to the Nobel Prizes and the Prize in Economic Sciences may be found at www.nobelmuseum.se. *Popular science articles*
Monroe, C. R. and Wineland, D. J. (2008) Quantum Computing with Ions, *Scientific American*, August.
Yam, P. (1997) Bringing Schrödinger's Cat to Life, *Scientific American*, June.

THE LAUREATES

SERGE HAROCHE

French citizen. Born 1944 in Casablanca, Morocco. Ph.D. 1971 from Université Pierre et Marie Curie, Paris, France. Professor at Collège de France and Ecole Normale Supérieure, Paris, France.

www.college-de-france.fr/site/en-serge-haroche/biography.htm

DAVID J. WINELAND

U.S. citizen. Born 1944 in Milwaukee, WI, USA. Ph.D. 1970 from Harvard University, Cambridge, MA, USA. Group Leader and NIST Fellow at National Institute of Standards and Technology (NIST) and University of Colorado Boulder, CO, USA.

www.nist.gov/pml/div688/grp10/index.cfm