

## Ensayo/ Assay

### Premio Nobel de Física 2025: los galardonados, el motivo, el legado

#### Nobel Prize in Physics 2025: the laureates, the reason, the legacy

El año 2025 fue proclamado por la Asamblea General de las Naciones Unidas como el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas para conmemorar los 100 años de la mecánica cuántica y su importancia y aplicaciones en la vida diaria. El Premio Nobel de Física 2025 fue otorgado a John Clarke, Michel H. Devoret y John M. Martinis por el “descubrimiento del efecto túnel macroscópico de la mecánica cuántica y la cuantización de la energía en un circuito eléctrico”, y cobra especial relevancia por haberse otorgado en este año. Según palabras de uno de los galardonados, el Prof. Clarke, el Nobel reconoce cómo los principios fundamentales de la mecánica cuántica, establecidos hace 100 años, se extienden a sistemas visibles a escala humana, un avance que sentó las bases de la tecnología cuántica actual y su aplicación práctica en muchos equipos de alta tecnología, abriendo el sendero hacia la computación cuántica, es decir, el uso práctico de estados cuantizados en forma de cúbits (unidad básica de información en la computación cuántica - superconductora). Los experimentos que condujeron a estos resultados se realizaron en la Universidad de California Berkeley en 1984 y 1985, siendo Clarke el director del laboratorio, Martinis estudiante de doctorado y Devoret investigador postdoctoral. En el laboratorio de Clarke se investigaba en ese entonces en los campos de la superconductividad y la electrónica superconductora, explorando los efectos cuánticos en circuitos superconductores.

Los galardonados tienen en común una trayectoria académica y científica similar. Clarke, nacido en 1942 en Cambridge, Reino Unido, obtuvo en el laboratorio de Cavendish de la Universidad de Cambridge su licenciatura en Física en 1964 y su doctorado en 1968,



John Clarke, Michel H. Devoret y John M. Martinis.  
Foto tomada de Physics Today <https://doi.org/10.1063/pt.axiw.hoep>

en tanto que el postdoctorado (1969) lo obtuvo en la Universidad de California en Berkeley, donde continuó su carrera académica y científica como profesor. La investigación de Clarke se ha centrado desde el inicio de sus estudios de física en la superconductividad y la electrónica superconductora, en particular el desarrollo y la aplicación de los dispositivos superconductores de interferencia cuántica SQUID (*Superconductor Quantum Interference Device*). Fascinado por los SQUID, su trabajo reveló que la cuantización de la energía y el efecto túnel podían aprovecharse en dispositivos de ingeniería, conectando de forma fundamental la teoría cuántica con la tecnología cuántica. Sus contribuciones abarcan desde los fundamentos de los dispositivos cuánticos hasta aplicaciones multidisciplinarias que abarcan campos como la medicina (diagnóstico médico), la geofísica, la cosmología, la física de partículas, la información cuántica e, incluso, la búsqueda de materia oscura. El trabajo pionero de Clarke le ha valido numerosos reconocimientos y membresías.

Michel H. Devoret nació en París, Francia, en 1953; se doctoró en física de la Universidad de Paris-Orsay (1982) en el campo de la investigación en física cuántica molecular. Hizo su posdoctorado en el laboratorio de Clarke, en donde midió por primera vez los niveles cuánticos mesoscópicos de una juntura Josephson. Posteriormente regresó a la Universidad de Paris-Saclay, donde fundó el grupo de *Quantronics (QUANTum physics and electRONICS)* en el IRAMIS-CEA. Allí alcanzó grandes logros como la invención de la bomba de electrones, el desarrollo de un bit cuántico superconductor, la primera medición del efecto de la valencia atómica en la conductancia de un solo átomo y la primera observación de las franjas de Ramsey de un átomo artificial superconductor (quantrionio), entre otros. Actualmente Devoret es profesor de física experimental de estado sólido con énfasis en la electrónica mecanocuántica en el Instituto Cuántico de Yale. También es profesor en la Universidad de California, Santa Bárbara.

John Martinis nació en San Pedro, California, en 1958. Obtuvo su doctorado en 1987 en el laboratorio de Clarke en Berkeley, con una tesis motivada por una charla del físico teórico Anthony Leggett en la que especulaba teóricamente si el efecto túnel podía ocurrir en objetos macroscópicos, un reto que aceptó como tema de su tesis doctoral. Hizo su posdoctorado en el Comisariado de Energía Atómica de Saclay (Francia), donde continuó su investigación sobre el efecto Josephson; trabajó en la división de tecnología electromagnética del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Boulder (Colorado), y en el 2004 se vinculó a la Universidad de California, Santa Bárbara, centrando su labor en la computación cuántica (2014-2019), para luego incorporarse al equipo de computación cuántica de Google; allí participó en el avance que llevó a la declaración de “supremacía cuántica” de esa empresa tecnológica. Es cofundador y actual director de tecnología de Qolab, *startup* de computación cuántica que se ha enfocado en el desarrollo de cúbits.

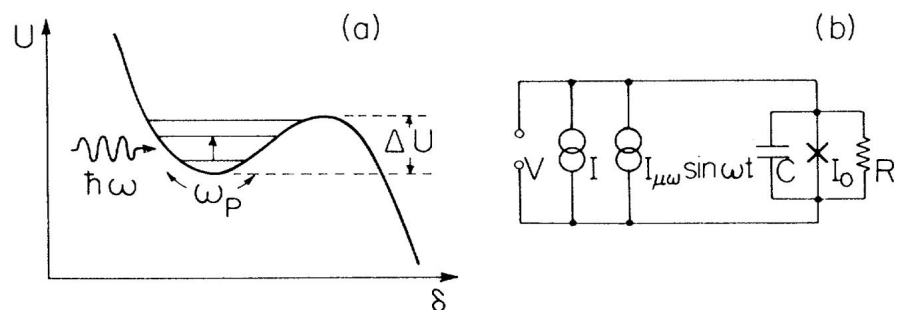
Como se mencionó anteriormente, el vínculo de Clarke con la superconductividad se inició siendo estudiante, bajo la tutoría de Brian Pippard. Su proyecto requería desarrollar un voltímetro extremadamente sensible, capaz de detectar un picovoltio. Casualmente, Clarke había asistido a un seminario que impartió Brian Josephson en 1964 sobre la cuantificación del flujo magnético en un bucle superconductor y el tunelamiento que hacen los pares de Cooper de un superconductor a otro a través de una barrera aislante sin generar voltaje en ella; el flujo de pares de Cooper constituye una «super corriente», la cual genera una diferencia de fase entre las fases de los parámetros de orden en los dos superconductores. Dos junturas Josephson conectadas en paralelo en un circuito superconductor constituyen el corazón de un SQUID, lo cual se desarrolló experimentalmente en el laboratorio de investigación de Ford. La super corriente crítica que un SQUID puede soportar, bajo la acción de un campo magnético aplicado, oscila con un período dado por el cuanto de flujo magnético. A Pippard y Clarke se les ocurrió la idea de usar este dispositivo para lograr un voltímetro, acoplado inductivamente una bobina superconductora al SQUID; así, una corriente que pasara por la bobina produciría oscilaciones en la corriente crítica

del SQUID. Si se conectara una resistencia en serie con la bobina se crearía un voltímetro que, según cálculos sencillos, debería tener una sensibilidad del orden de femtovoltios por segundo. En una entrevista (**Pulizzi, 2011**) Clarke afirma que este fue un punto de inflexión en su carrera, pues marcó el rumbo de la investigación que ha seguido durante casi cinco décadas. Clarke se trasladó luego de Cambridge a la Universidad de California en Berkeley, pero siguió trabajando con los SQUID.

El punto esencial es que los SQUID son detectores extremadamente sensibles de señales magnéticas y eléctricas de cualquier origen y convierten un experimento impracticable en algo extremadamente viable (**Clarke, 1971**). Ya en 1986 Clarke nos hablaba del posible uso de los SQUID (**Clarke, 1986**), por ejemplo en biomagnetismo, pues pueden detectar los campos magnéticos débiles que emanan del cerebro humano, así como los movimientos submicroscópicos de los detectores de ondas gravitacionales. Debe tenerse en cuenta que los SQUID operan a temperaturas de helio líquido (4K) y que su energía de ruido aumenta con la temperatura absoluta, de modo que son más silenciosos a 1K que a 4 K o a 77 K.

Antes de los experimentos de los galardonados, se conocía el efecto túnel, el efecto Josephson (Premio Nobel de Física en 1973) en superconductores, los saltos de Shapiro (observados hacia 1968), y se sabía que tanto el efecto túnel como la superposición ocurrían a escala atómica, pero no se habían observado en sistemas macroscópicos. A finales de la década de 1970, Anthony Leggett (Premio Nobel de Física en 2003 por su trabajo teórico sobre superconductores) había predicho teóricamente que, a temperaturas extremadamente bajas, estados macroscópicamente distintos de los superconductores podrían exhibir el comportamiento mecánico cuántico de efecto túnel. Hubo intentos de observar el efecto. En la década de 1980, Martinis recuerda que se tomaron muy en serio la pregunta de Legget y se propusieron demostrarlo.

Para la observación del efecto túnel cuántico macroscópico el trío realizó un experimento riguroso en junturas Josephson a temperaturas de milikelvin (para reducir el ruido). En 1984 observaron (**Devoret et al., 1984**) en una unión Josephson polarizada por corriente  $I$ , y bajo la acción de una perturbación de microondas débil, que cuando la frecuencia de microonda  $\omega$  se aproxima a la frecuencia del plasma de la juntura  $\omega_p$ , aparece un nuevo fenómeno de activación resonante que saca al sistema del estado de voltaje cero. Concluyeron en ese artículo que el efecto proporciona una medición *in situ* de los parámetros de la juntura, información muy útil para investigar el efecto cuántico macroscópico. Un año después (**Martinis et al., 1985**) presentaron la primera observación de niveles de energía cuantizados para la variable macroscópica (la diferencia de fase  $\delta$ ) en una juntura Josephson polarizada por corriente en su estado de voltaje cero, como se esquematiza en la **Figura 1**.



**Figura 1. a)** Gráfica que muestra la dependencia del potencial  $U$  con la variable macroscópica  $\delta$ ; se indican los niveles de energía del pozo con la frecuencia del plasma  $\omega_p$ , la energía de la microonda  $\hbar\omega$ , y la energía del salto cuántico  $\Delta U$ . **b)** Este es un esquema del circuito equivalente de la juntura Josephson con corriente de polarización  $I$  y perturbación de microondas  $I_{\mu\omega}$ . Figura extraída de la referencia **Martinis et al.** (1985), licencia RNP/25/NOV/098547 de la revista *Physical Review Letters*

Los investigadores observaron diferentes posiciones resonantes en las cuales la juntura Josephson (polarizada por corriente y bajo acción de microondas) escapa del voltaje cero, posiciones que concuerdan cuantitativamente con un cálculo mecánico cuántico basado en los parámetros de la juntura medidos según lo reportado en 1984. En esta configuración, los pares de Cooper del sistema actúan como una sola partícula. Concluyeron que estos resultados representaban evidencia de la naturaleza cuántica de la variable macroscópica  $\delta$  y encontraron que la coherencia cuántica entre un estado excitado y el estado fundamental (voltaje cero) puede mantenerse durante tiempos de hasta 40 ns, dependiendo del nivel energético. Al estudiar el régimen térmico (por debajo de 25 mK) de la tasa de escape desde el estado de voltaje cero encontraron que dicha tasa de escape es independiente de la temperatura (por debajo de 25 mK), cuyo valor coincide con la predicción a temperatura cero para el efecto de túnel cuántico macroscópico (**Devoret et al.**, 1985). Se puede afirmar, entonces, que las leyes cuánticas gobiernan no solo las partículas a nivel atómico, sino también estados colectivos en sistemas superconductores macroscópicos.

En opinión de Daniel Domínguez, María José Sánchez y Leandro Tosi (Instituto Balseiro, Argentina), expertos en el campo, la tunelización cuántica macroscópica y la cuantificación de energía en circuitos superconductores han sentado las bases para el uso práctico de estados cuantizados en forma de cúbits, “Ahí la genialidad fue que utilizaron circuitos superconductores, que son muy coherentes, sin disipación, y junturas Josephson que permiten que los niveles sean como los de un átomo artificial; demostraron que el estado del circuito cuántico podría describirse con una función de onda macroscópica, en el sentido que el sistema es mucho mayor que un solo átomo”. Según el director ejecutivo del American Institute of Physics, el premio es un ejemplo de cómo la teoría rigurosa ligada a la experimentación transforma el conocimiento básico en un conjunto de herramientas cuánticas diseñadas para diversas aplicaciones. Este logro histórico inspira a promover contribuciones que sean a la vez conceptualmente claras, experimentalmente rigurosas y tecnológicamente facilitadoras, a medida que vamos pasando de «la ciencia es cuántica» a «la cuántica es ciencia y tecnología», en palabras del editor en jefe de Applied Physics Letter Quantum. Olle Eriksson, físico de la Universidad de Uppsala (Suecia) y presidente del Comité Nobel de Física, afirma que “Es maravilloso celebrar cómo la mecánica cuántica, con un siglo de antigüedad, ofrece continuamente nuevas sorpresas; la mecánica cuántica es la base de toda la tecnología digital”. El trabajo del trío es un ejemplo de “cómo la ciencia guiada por la curiosidad, construida sobre el conocimiento acumulado de generaciones, es la que traza el camino hacia las revoluciones tecnológicas del futuro”, según Ramón Aguado (Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC). Robert Schoelkopf de Yale afirma que hoy en día hablamos de cuántica 1.0 y cuántica 2.0; la primera revolución cuántica tuvo lugar a principios del siglo XX cuando se intentaba comprender qué sucede en la escala de los átomos individuales. El trabajo de Clarke, Devoret y Martinis es la raíz de la cuántica 2.0”.

El legado de este experimento ha sido trascendental. Aquel efecto creado en Berkeley, llamado por algunos “átomo artificial”, se convirtió en el primer ladrillo para desarrollar un cúbits. El legado ha tenido unos avances espectaculares en apenas 25 años, por ejemplo, se han observado cúbits que mantienen su coherencia cuántica hasta varios milisegundos.

Por último, deseo transmitir a la comunidad científica y académica, tal como lo considera Clarke, la importancia de la formación básica y del trabajo colaborativo multidisciplinario. Las aplicaciones de la mecánica cuántica tanto a nivel subatómico como macroscópico requieren de científicos y de ingenieros en diferentes disciplinas con fundamentación cuántica, tal como lo plantean diversos autores (**Rainò et al.**, 2021).

**Maria Elena Gómez**

Miembro de Número

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

## Referencias

- Clarke, J.** (1971). Electronics with superconducting junctions. *Physics Today*, 3037. <https://doi.org/10.1063/1.3022881>
- Clarke, J.** (1986). SQUIDs brains and gravity waves. *Physics Today*, 30-44. <https://doi.org/10.1063/1.881054>
- Devoret, M.H., Martinis, J.M., Esteve, D., Clarke, J.** (1984). Resonant Activation from the Zero-Voltage State of a Current Biased Josephson Junction. *Physical Review Letters*, 53(13), 1260-1262. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.53.1260>
- Devoret, M.H., Martinis, J.M., Clarke, J.** (1985). Measurements of Macroscopic Quantum Tunneling out of the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction. *Physical Review Letters*, 55(18), 1908-1911. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1908>
- Martinis, J.M., Devoret, M.H., Clarke, J.** (1985). Energy-Level Quantization in the Zero-Voltage State of a Current Biased Josephson Junction. *Physical Review Letters*, 55(15), 1543-1546. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1543>
- Pulizzi, F.** (2011). Interview: SQUIDs for everything. *Nature Materials*, 10, 262-263. <https://doi.org/10.1038/nmat2996>
- Rainò G., Novotny, L., Frimmer, M.** (2021). Quantum engineers in high demand. *Nature Materials*, 20, 1449. <https://doi.org/10.1038/s41563-021-01080-6>