

Grandes túneles cuánticos: el Premio Nobel de Física 2025

CARLOS A. GONZÁLEZ GUTIÉRREZ Y W. LUIS MOCHÁN

Los Dres. Carlos A. González Gutiérrez y W. Luis Mochán son investigadores en el Instituto de Ciencias Físicas (ICF) de la UNAM. El Dr. Mochán es integrante de la Academia de Ciencias de Morelos. Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

El Premio Nobel de Física 2025 le será otorgado a John Clarke, Michel H. Devoret y John M. Martinis, por su descubrimiento del *tunelamiento cuántico macroscópico* y la *cuantización de la energía en un circuito eléctrico* [1]. En este artículo le contamos de qué se trata esta historia.

Energía

Coloque una canica cerca del borde de un plato hondo sopero, suéltela y observe. Notará que la canica baja acelerando hacia el fondo del plato para subir al borde opuesto disminuyendo su velocidad hasta detenerse del todo (Figura 1). Después iniciará un movimiento similar de regreso. Esto se repetirá varias veces, pero llegando cada vez a una altura menor hasta quedar finalmente descansando en el fondo del plato, del que no escapará.

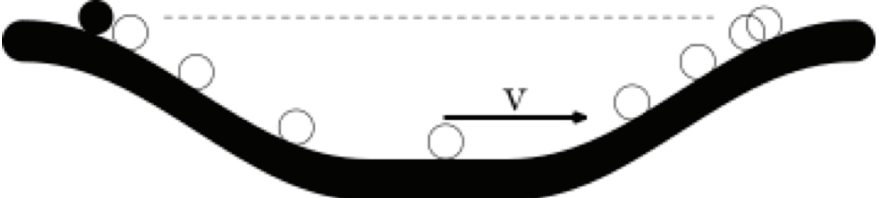


FIGURA 1. CORTE de un plato hondo sopero en el que rueda una canica desde un borde hasta el borde opuesto. Se ilustra la altura inicial y la velocidad en el fondo del plato.

Esta simple experiencia ilustra una ley fundamental, la *conservación de la energía*. Al inicio la canica tiene *energía potencial* gravitacional, parte de la cual se convierte en *energía cinética*, energía de movimiento; la canica se mueve más rápidamente mientras más baja. Luego, al ascender, convierte su energía cinética en energía potencial, moviéndose cada vez con mayor lentitud hasta finalmente detenerse al regresar a la altura inicial. Las cosas son un poco más complicadas, pues conforme la canica rueda, golpea al plato produciendo sonido y calentándose, por lo que parte de su energía se disipa en energía acústica y térmica, impidiendo que llegue exactamente a la altura original. De experimentos como éste y muchos otros similares se deduce que existen varias formas de energía, pero la *energía total* de un sistema se *conserva*.

Para simplificar la vida concentrémonos en la energía potencial, que depende de la configuración (posición, orientación, etc.), y la energía cinética, que depende del movimiento. La energía potencial puede ser gravitacional, como en el ejemplo previo, o puede ser elástica (cuando se almacena en un resorte comprimido o en una liga estirada), podría ser eléctrica (cuando juntemos cargas que se repelan), o puede tener cualquier otro origen, pero se describe por una

función $U(x)$ que depende de alguna manera de la configuración x del sistema, como podría ser la posición. Podríamos describir la energía potencial del sistema mediante una gráfica (Figura 2).

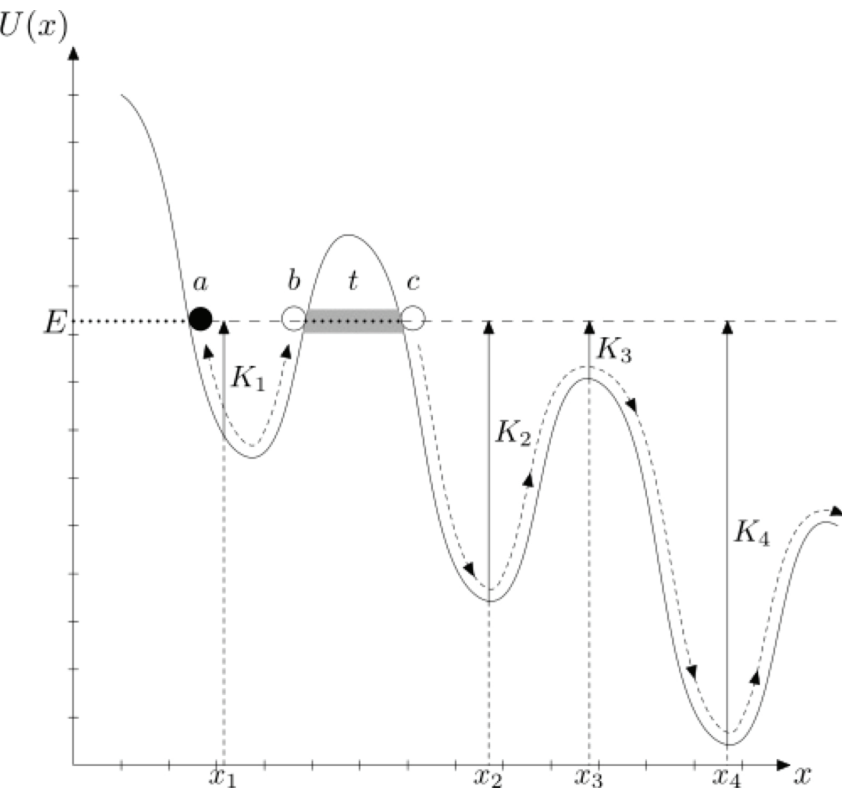
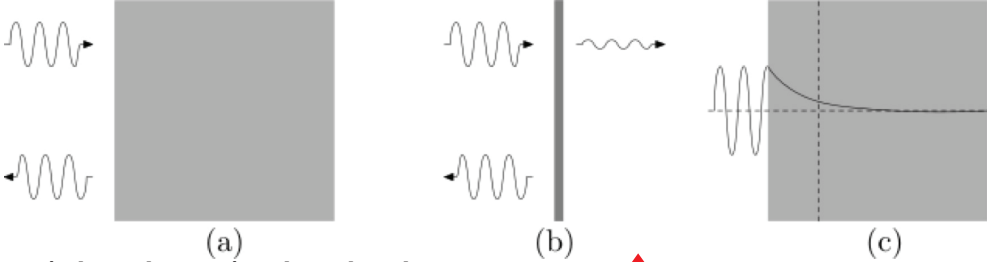


FIGURA 2. GRÁFICA de la energía potencial U de algún sistema como función de su configuración x . Se ilustra con una línea horizontal (a trazos en unas regiones y punteada en otras) una posible energía total E . La diferencia entre ésta y la curva $U(x)$ es la energía cinética K correspondiente a la configuración x la cual se ilustra para algunas configuraciones x_i con flechas verticales. El sistema podría estar atrapado entre las configuraciones a y b , conocidas como puntos de retorno. Con la misma energía, si el sistema estuviera en la configuración c podría evolucionar hacia la derecha sin detenerse ni regresar. Se muestra con una línea sombreada un túnel t entre b y c .

Recordemos que la energía cinética de una partícula es proporcional al cuadrado de su velocidad, y que el cuadrado de un número es una cantidad positiva (más por más es más y menos por menos también da más). Por lo tanto, la energía

cinética es positiva y la energía potencial es menor a la energía total; el sistema *tiene prohibido* incursionar en regiones en las que su energía potencial supere a su energía total (Figura 3)! Así, una



partícula con la energía E ilustrada en la fig. 2 sólo podría hallarse en el *valle* de la energía potencial del lado izquierdo, entre los *puntos de retorno* a y b , o en cualquier punto a la derecha del punto c , pero la *cima* entre b y c estaría vedada, así como la región a la izquierda de a (líneas horizontales punteadas).

Ondas

Tome ahora una pieza de metal como una cucharera e intente ver a través de ella. Notará que es imposible. La luz no puede penetrar en el metal; los metales son opacos. ¿Por qué? La luz *visible* es una *onda electromagnética*, un campo eléctrico y un campo magnético que oscilan con una frecuencia que va de 400 a 790 terahertz (THz) (1 THz significa un millón de millones de oscilaciones cada segundo). Los metales tienen electrones que son acelerados por el campo electromagnético hasta que inducen un campo igual en magnitud pero opuesto al campo externo, *apantallándolo*, conduciendo a un campo *total* nulo, eliminando así la luz de su interior. Pero hay de luces a luces. Un metal se vuelve transparente si lo iluminamos con luz cuya frecuencia ν sea mayor a la llamada frecuencia del plasma ν_p del metal. Esto se debe a que si las oscilaciones se repiten en tiempos demasiado cortos, los electrones no alcanzan a moverse lo suficiente para apantallar al campo antes de que éste cambie de valor; el apantallamiento se queda rezagado. La frecuencia de plasma típica es mayor a los mil THz, que corresponde a luz ultravioleta, invisible a nuestros ojos. Por esto percibimos a los metales como opacos; toda la luz *visible* que llega a su superficie se refleja (Figura 3). Aprovechemos esto para fabricar espejos con vidrios lisos metalizando una de sus superficies.

Ondas evanescentes

Consiga una bolsa plástica metalizada como las que se usan para papas fritas o para envolver regalos. Colóquela, vacía y limpia, sobre una mesa, e ilumínela por el lado plateado. Verá que refleja la luz como si fuera un espejo. La capa metálica impide el paso de la luz, provocando su reflexión. Ahora espere a la obscuridad de la noche, cubra sus ojos con la bolsa y volteé la vista hacia algún foco encendido. Notará que un poco de su luz atraviesa la delgada película metálica y llega a sus ojos. En verdad, la luz *sí* puede penetrar en un metal, pero sólo una distancia muy pequeña, menos que una milésima de milímetro. Si la película metálica fuera más delgada que esta distancia, un poco de luz podría atravesarla. En el interior del metal *sí* puede haber luz, pero no en forma de una onda ordinaria, sino de una onda *evanescente*, esto es, que decae en una distancia corta

FIGURA 3. LA energía total de una partícula no puede ser menor que la energía potencial. Análogamente, la luz no puede traspasar un metal si su frecuencia ν es menor que la frecuencia de plasma ν_p del metal.

FIGURA 4. LA luz visible que incide en un metal (a) es totalmente reflejada pues no se puede propagar en su interior, pero si incide en una película suficientemente delgada (b) se puede transmitir un poco, pues en el interior de la lámina delgada sí existe un campo electromagnético, pero es evanescente, como en (c).

Partículas cuánticas

Hemos visto anteriormente que hay regiones que ni una partícula clásica (como una canica) ni una onda (como la luz) pueden penetrar. Sin embargo, vimos que las ondas *sí* pueden atravesar *regiones prohibidas* cuando éstas son suficientemente delgadas. El motivo es que las ondas en verdad *sí* penetran en estas regiones, pero lo hacen como *ondas evanescentes* que decaen en una distancia pequeña. De acuerdo a la mecánica cuántica, esa teoría que revolucionó nuestra comprensión de la naturaleza en pequeñas escalas y cuyo centenario celebramos este año [2], *las ondas se comportan como partículas y las partículas se comportan como ondas*. Así, un electrón se comporta como una onda con una *longitud de onda* pequeña, típicamente del tamaño de un átomo y miles de veces menores a la de la luz. Una consecuencia del comportamiento ondulatorio de un electrón es que puede escapar de barreras, atravesando regiones clásicamente prohibidas, como la cumbre entre b y c en la fig. 2, cuando la distancia entre b y c sea muy chica.

Tunelamiento

El fenómeno anterior se llama *tunelamiento*; las partículas cuánticas pueden atravesar barreras como si fueran montañas en cuyo interior se abriera un túnel (línea gris indicada por la letra t en la fig. 2), sin tener que ascender hasta la cima. El tunelamiento de electrones ocurre en distancias tan pequeñas como el tamaño de los átomos, pero explica muchos aspectos de la naturaleza química de la materia. Por ejemplo, explica cómo los electrones pueden escapar de ciertos átomos y ser atrapados por otros en el proceso de formar enlaces químicos. Además, el tunelamiento ha permitido desarrollar microscopios como el de *tunelamiento de barrido* (*scanning tunneling microscope*, STM, Figura 5) que han permitido *ver* átomos individuales en la superficie de sólidos y ver la *función de onda* de sus electrones [3]. Con el microscopio de tunelamiento incluso se han podido hacer animaciones de dibujos hechos con átomos individuales [4]. Algunos núcleos atómicos pesados pierden partículas debido al tunelamiento, fisionándose en fragmentos, lo cual explica la radiactividad.

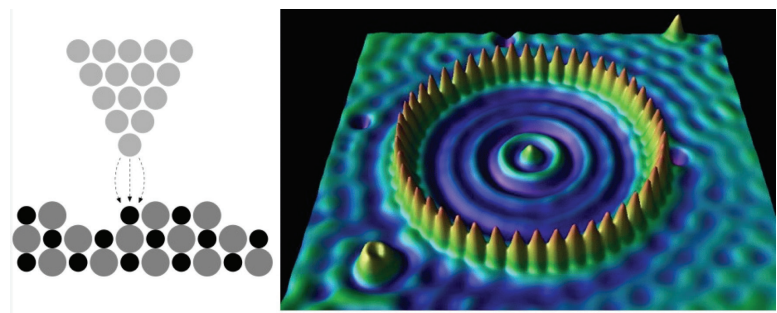


FIGURA 5. IZQUIERDA: Microscopio de tunelamiento de barrido STM. Los electrones pasan por tunelamiento desde el átomo en la punta de una aguja conductora muy afilada (arriba) a algún átomo de la superficie (abajo). Variando la posición sobre la superficie y controlando la altura de la aguja y la corriente eléctrica de tunelamiento se pueden hacer mapas de gran precisión de la superficie. Derecha: Corral cuántico preparado y observado con un microscopio de tunelamiento [2]. Cada montaña en el círculo corresponde a un átomo colocado sobre una superficie.

material, como una formación militar que no se desordena. Los pares de Cooper son partículas cuánticas que pueden atravesar barreras de potencial y dar lugar al tunelamiento.

La Unión de Josephson

Si dos materiales superconductores se separan por una barrera muy delgada de material aislante, los pares de Cooper pueden *tunear* de un lado al otro sin disipar energía; la barrera no ofrece resistencia a los pares de Cooper, a pesar de corresponder a un material naturalmente aislante. Éste es el *efecto Josephson* [4]. A un dispositivo formado por un superconductor, un aislante y un superconductor se le conoce como *unión o juntura de Josephson*, en honor a Brian Josephson quien las describió en 1962. Si pasamos una corriente eléctrica a través de este dispositivo, el estado de todos los pares de Cooper se puede describir a través de una ecuación de movimiento parecida a la segunda ley de Newton para una sola partícula, fuerza es masa por aceleración, $F=ma$, justo como la canica de la que hablamos al inicio, con la diferencia de que el papel de la posición de la partícula corresponde a una variable que describe al estado colectivo de todos los pares de Cooper. La forma del potencial correspondiente resulta muy parecida al corte transversal de un *lavadero* para tadar manualmente la ropa, inclinado y con ondulaciones similares a las de la fig. 2. Queremos enfatizar que la *partícula* a la que nos referimos aquí y en adelante representa el estado macroscópico de millones de millones de pares de Cooper en el material superconductor. Controlando la corriente aplicada a la unión de Josephson podemos controlar la forma del potencial, pasando de un estado donde la partícula está atrapada entre dos puntos a un estado donde la partícula se puede mover a lo largo del potencial. En el estado donde la partícula está atrapada, como en el lado izquierdo de la fig. 2, no hay voltaje a través de la junta. En el estado donde *sí* se puede mover, como si disminuyéramos la altura de la primera cumbre en la fig. 2 por abajo de la energía E , se produce un voltaje proporcional a la velocidad. Medir el voltaje permite detectar si la partícula está atrapada o está en movimiento [6].

Alrededor de 1980 el físico teórico y premio Nobel de Física Anthony Leggett se preguntó si esta *partícula* macroscópica clásica (formada por numerosísimas partículas cuánticas acopladas) podría manifestar algún comportamiento cuántico. Como hemos visto, si se comportara como partícula cuántica podría escapar de pozos de potencial atravesando barreras mediante el efecto túnel, como si pasara del punto b al c en

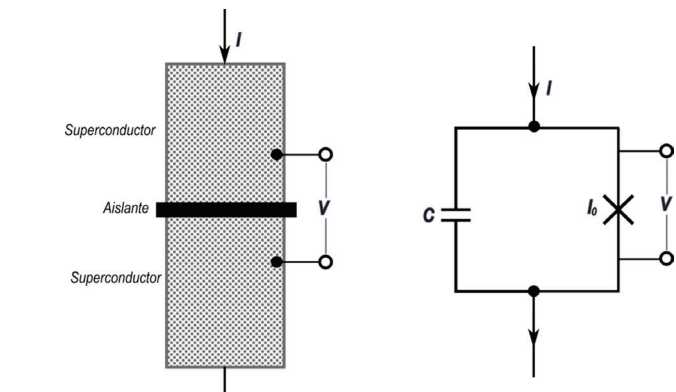


FIGURA 6. IZQUIERDA: diagrama esquemático de una unión de Josephson. El paso de la corriente I a través de la unión se puede controlar de tal forma que los pares de Cooper pueden pasar del superconductor de arriba al de abajo sin generar una diferencia de potencial V (partícula atrapada). Una vez que la corriente aplicada alcanza un valor crítico I_c , se produce una diferencia de potencial medible (partícula en movimiento). Derecha: circuito eléctrico equivalente a la unión de Josephson. Dicho circuito posee una capacitancia intrínseca C , debido a que la unión está formada por dos electrodos separados por una barrera aislante formando naturalmente un condensador eléctrico. La unión de Josephson es representada por el símbolo en forma de cruz en el circuito eléctrico.

la fig. 2, y así generar un voltaje medible en una junta Josephson. Sería necesario garantizar que la partícula no gane energía robándola a sus alrededores y saltando por arriba de la barrera de potencial.

Para evitar esto, entre 1984 y 1985 los investigadores y ganadores del premio Nobel de Física de este año, J. Clark, M. Devoret y J. Martinis realizaron experimentos a muy bajas temperaturas usando un dispositivo como el mostrado en la fig. 6. En estos experimentos incrementaron poco a poco la corriente, registrando el valor para el cual aparecía un voltaje. Repitieron esto alrededor de cien mil veces a distintas temperaturas, obteniendo el umbral de la corriente eléctrica en el cual escapaba la partícula. El resultado fue que, al reducir la temperatura hasta un valor crítico, la corriente umbral comenzó a aumentar rápidamente debido al tunelamiento de la partícula macroscópica asociada al estado de los pares de Cooper que componen el dispositivo y que habría entrado al régimen cuántico. En este régimen cuántico macroscópico dicha partícula podría ocupar simultáneamente dos estados cuánticos distintos, dos configuraciones distintas de los pares de Cooper, como el famoso *gato de Schrödinger* que se halla en una superposición de vida y muerte a la vez. Los ganadores del premio Nobel también demostraron que la energía de la partícula macroscópica estaba cuantizada y no podía tomar más que ciertos valores, sin poder tomar valores intermedios. Esto confirma las predicciones de la teoría cuántica ¡pero aplicada ahora a sistemas macroscópicos!

El premio Nobel de física 2025 y la computación cuántica
La unión de Josephson que acabamos de describir no es más que

un circuito eléctrico (Figura 6). Sin embargo, los experimentos de Clark, Devoret y Martinis demostraron que, bajo las condiciones adecuadas, dicho circuito puede comportarse como un átomo o una molécula real, mostrando efectos cuánticos como el tunelamiento y la cuantización de la energía. Estos resultados sentaron las bases para construir *átomos artificiales* con propiedades cuánticas basados en circuitos superconductores macroscópicos. Dichos átomos constituyen la unidad fundamental de información cuántica, el bit cuántico o *qubit*, que puede estar simultáneamente en una superposición de dos estados cuánticos que representen a los dígitos binarios 0 y 1 , a diferencia de los bits clásicos que sólo pueden estar en el estado que representa al 0 o en el correspondiente al 1 , pero nunca en una superposición de los dos. El uso de compuertas cuánticas superconductoras ha conducido a una de las arquitecturas más prometedoras para la implementación de la computación cuántica y actualmente lidera el desarrollo de procesadores cuánticos a gran escala [7].

Bibliografía

1. The Nobel Prize, Popular Information, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/popular-information/>
2. Confinement of Electrons to Quantum Corrals on a Metal Surface, A. F. Crommie, C. P. Lutz, and D. M. Eigler, Science 262 (1993) 5131, 218-220 DOI:10.1126/science.262.5131.218.
3. IBM, A boy and his atom, <https://www.youtube.com/watch?v=oSCX78-8-q0&list=PLaFe0BJi-ho2pbULC7W4UpxFGARh7oD7i>
4. R. P. Feynman, The Feynman Lectures on Physics, Vol. III Cap. 21, https://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_21.html
5. El Gran Colisionador de Hadrones: Historias del laboratorio más grande del mundo, Gerardo Herrera Corral, (Ediciones Proceso, México, 2013).
6. The Nobel Prize, Advanced Information, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/advanced-information/>
7. Superconducting Circuits for Quantum Information: An Outlook, M. H. Devoret and R. J. Schoelkopf, Science 339 (2013) 6124, 1169-1174 DOI:10.1126/science.1231930

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos.