

Conducción electrónica en sistemas nanoscópicos

## **Transportando electrones en circuitos de escala molecular**

Carlos A Balseiro y Gonzalo Usaj  
Instituto Balseiro y Centro Atómico Bariloche,  
Comisión Nacional de Energía Atómica

*De la nanotecnología se esperan impactos en la vida diaria tan grandes como los que produjeron el transistor o el láser. En ambos el transporte de los electrones es central para su función; la pregunta es ¿cómo se transportan electrones en sistemas nanoscópicos?*

Comencemos con un poco de historia. Hacia fines del siglo XIX el físico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) desarrolló la teoría cinética de los gases partiendo de una concepción atomística de la materia. Con sorprendente intuición Boltzmann introdujo una descripción probabilística en la que las colisiones entre partículas juegan un papel fundamental. En 1897, el inglés William Thomson (1824-1907) descubrió el electrón y solo tres años después el alemán Paul Drude (1863-1906) construyó su teoría sobre la conducción eléctrica y térmica de los metales. Drude imaginó a los electrones formando un gas de partículas livianas capaces de moverse libremente dentro del metal. Adaptó la teoría cinética de los gases de Boltzmann para describir este gas de electrones y dedujo así las leyes fundamentales del transporte electrónico. Aunque la teoría de Drude contribuyó de forma esencial a la comprensión de los fenómenos de transporte parte de su éxito es, en algún sentido, fortuito: al utilizar una teoría clásica para describir al gas de electrones se cometen errores que, en algunos casos, se cancelan parcialmente.

El desarrollo de la mecánica cuántica obligó a revisar las ideas sobre el transporte electrónico en metales y fue el físico alemán Arnold Sommerfeld (1868-1951) quien reformuló la teoría de Drude incorporando algunos elementos de la entonces nueva teoría cuántica de la materia. ¿Hasta qué punto hay que corregir la teoría clásica si se quiere describir el comportamiento macroscópico de una barra metálica? Hay varios aspectos a considerar, en particular el principio de exclusión enunciado por el físico austriaco Wolfgang Pauli (1900-1958) que establece que no puede haber dos electrones en el mismo estado cuántico (esto puede traducirse diciendo que no puede haber dos electrones en la misma 'situación'). Una de sus consecuencias más notables es que la velocidad típica en un gas de electrones no está dada por la temperatura, como en un gas clásico, sino por la densidad del gas. Esta velocidad típica se llama *velocidad de Fermi* y para un metal convencional es de aproximadamente 1000km/seg. La teoría de Drude corregida

con algunos elementos de la teoría cuántica se conoce como la teoría semiclásica de transporte en metales.

La teoría moderna de transporte en sistemas macroscópicos incorpora estos elementos de la estructura electrónica y utiliza conceptos que hoy están bien justificados: a lo largo del camino que recorre un electrón en un circuito eléctrico, se produce una enormidad de colisiones que generan una dinámica difusiva. Esto quiere decir que, luego de varios choques, la velocidad del electrón es independiente de su estado inicial. En otras palabras, el electrón pierde rápidamente memoria de los detalles de su pasado. Estos choques pueden producir enormes fluctuaciones en la velocidad de las partículas y tanto la resistencia eléctrica como la disipación de energía están directamente relacionadas a estas fluctuaciones.

La capacidad de transportar corriente eléctrica en un metal está determinada por su resistencia eléctrica  $R$ . La célebre ley de Ohm establece:

$$I=GV$$

donde  $I$  es la corriente,  $G=1/R$  es la conductancia y  $V$  la diferencia de potencial. La conductancia depende de la forma del conductor y por lo tanto no es, en general, el mejor indicador de cuán buen conductor es el material que constituye la muestra. En sistemas macroscópicos es conveniente definir una propiedad intrínseca, la conductividad del material. Por ejemplo, a temperatura ambiente el cobre, que es un excelente conductor, tiene una conductividad de 0,64 y el hierro de 0,11 en unidades de  $[\text{microhm cm}]^{-1}$ . La conductividad es mayor para el cobre lo que indica que este conduce la electricidad mejor que el hierro (esto se debe al carácter magnético del último).

Durante las últimas décadas los investigadores se han planteado la siguiente pregunta: si se pudiese reducir sin límite el tamaño de un sistema ¿se llegaría a un punto en el que la ley de Ohm dejaría de ser válida? O más concretamente, ¿el transporte electrónico a través de un nanotubo de carbono o de una molécula orgánica responde a las mismas leyes que el transporte en un cable macroscópico? Como veremos más adelante, los sistemas muy pequeños tienen propiedades particulares que no pueden describirse a la Drude. Es importante destacar que esta inquietud no responde solo a una curiosidad académica sino a una necesidad tecnológica: la miniaturización de los circuitos integrados comerciales hace pensar que pronto se llegará a los límites de validez de las teorías semiclásicas. Esto obligará a diseñar circuitos teniendo en cuenta nuevos regímenes de transporte en escalas nanoscópicas.

Durante la década del 80 se desarrollaron técnicas de laboratorio capaces de reducir el tamaño de los circuitos eléctricos. Ya se pueden 'soldar' contactos eléctricos a moléculas o hacer cables más delgados que una molécula de ADN. Los avances en este campo permiten especular sobre la posibilidad de aprovechar la naturaleza cuántica de los electrones, que en estas escalas de tamaño se ponen claramente de manifiesto, para generar nuevas tecnologías como la electrónica molecular, la espintrónica en semiconductores o la computación cuántica.

Las teorías semiclásicas fallan cuando el tamaño del sistema es menor que alguna de las siguientes longitudes características: i) la longitud de onda de De Broglie, una propiedad cuántica que está asociada a la energía cinética del electrón, ii) el camino libre medio que determina la distancia que el electrón recorre sin chocar. En el primer caso, cuando la longitud de onda de De Broglie es comparable al tamaño del sistema se produce confinamiento y cuantización de la energía (ver el artículo de Hallberg y Fainstein en este número). En el segundo caso, cuando el camino libre medio es mayor que el tamaño del sistema, el transporte es balístico. Los sistemas que son grandes comparados con tamaños atómicos pero menores que alguna de estas longitudes se denominan usualmente *sistemas mesoscópicos* (si sus dimensiones son del orden del micrón) o *sistemas nanoscópicos* (si sus dimensiones son del orden del nanómetro). En la figura 1 se muestran algunos ejemplos de estos sistemas.

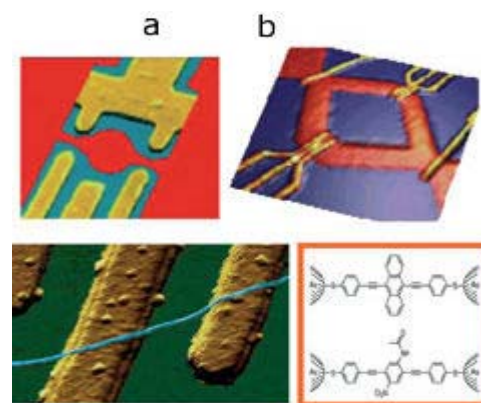


Figura 1. Punto cuántico (arriba, izquierda) formado por un gas de electrones con constricciones, el gas se mueve por la zona roja. Interferómetro (arriba, derecha, ver texto) (extraído de <http://gt.tn.tudelft.nl>). Abajo, un nanotubo de carbono con contactos de oro y, a la derecha, esquema de una molécula con contactos.

## Transporte balístico en sistemas nanoscópicos

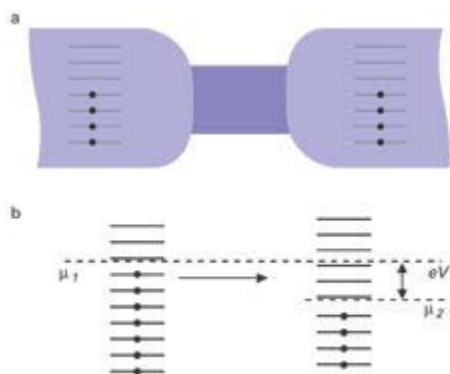


Figura 2. a) Esquema de un conductor nanoscópico con contactos macroscópicos. Los niveles de energía de los electrones en los contactos se representan con líneas. Los niveles de menor energía, ocupados por un electrón, se marcan con un punto. b) Cuando se aplica una diferencia de potencial entre contactos, se produce una caída de potencial en la zona central y los niveles de la izquierda se desplazan en energía respecto de los de la derecha. Los electrones con energía entre  $m1$  y  $m2$  pueden viajar de izquierda a derecha como indica la flecha generando una corriente en el conductor central.

Comencemos con algunos conceptos básicos sobre el transporte en sistemas nanoscópicos. Imaginemos un sistema compuesto por dos contactos macroscópicos unidos por un conductor por el que pueden fluir los electrones como se ilustra en la figura 2a. Debido al principio de exclusión de Pauli, los estados electrónicos (espín incluido) de los contactos estarán ocupados por un solo electrón y a temperaturas bajas estarán ocupados solo los de menor energía. La energía del último nivel ocupado se denomina energía de Fermi y la indicaremos con el símbolo  $\mu$ .

Cuando entre ambos contactos se aplica una diferencia de potencial  $V$ , se produce una caída de potencial en la zona central (incluidos los contactos); el diagrama de energía resultante se muestra esquemáticamente en la figura 2b. Los electrones pueden atravesar la zona central sin cambiar su energía pero debido al principio de exclusión de Pauli solo los electrones con energía  $\mu_2 < E < \mu_1$  podrán fluir de izquierda a derecha. En estas condiciones, la corriente eléctrica se debe solo a los electrones en esa región de energía. Además, como se indica en la figura 2b,  $\mu_1 - \mu_2 = eV$ .

En esta formulación, queda implícito que el sistema se encuentra a muy bajas temperaturas y que en su paso por el conductor central los electrones no chocan intercambiando energía con el sistema. Este planteo contrasta con el planteo original: en la zona central no hay disipación de energía. En este artículo describiremos el transporte electrónico en distintos sistemas utilizando estos conceptos.

## La doble barrera

Muchos de los sistemas nanoscópicos se construyen a partir de semiconductores basados en arseniuro de galio (AsGa) y en arseniuro de galio y aluminio (AsGaAl). Estos sistemas son particulares en varios aspectos. Por un lado las densidades electrónicas son bajas, de manera que la longitud de onda de De Broglie característica es grande y puede ser entonces comparable a algunas de las dimensiones del sistema. Por otra parte, los caminos libres medios son muy grandes, lo que permite la fabricación de dispositivos que funcionan en el régimen balístico.

Uno de los primeros sistemas estudiados, diseñados y fabricados fue la doble barrera. Este dispositivo se fabrica intercalando en un cristal de AsGa delgadas capas de AsGaAl dopado como se muestra en el esquema del recuadro 'Efecto túnel y Efecto túnel resonante'. Estas capas son tan delgadas que pueden tener solo algunos átomos de espesor. El AsGaAl genera una barrera de potencial para los electrones como se describe en el recuadro. La estructura con un nivel resonante actúa como un filtro; es transparente para los electrones que llegan con una energía igual a la del estado resonante, y es opaca para los electrones que llegan con otra energía. El dispositivo se diseña de modo que exista un estado resonante a una energía ligeramente superior a la energía de Fermi como se indica en la figura 3. Cuando se aplica un voltaje entre el contacto de la izquierda y el de la derecha, se genera una caída de potencial en la zona de las barreras como se indica en la figura. Esta caída de potencial hace que la posición relativa del nivel resonante respecto del nivel de Fermi de la izquierda cambie. Consecuentemente, para ciertos voltajes aplicados, el nivel resonante está alineado con los estados ocupados de la izquierda y hay una corriente eléctrica que circula. Para voltajes aplicados grandes el nivel resonante puede quedar por debajo, en energía, de todos los estados de la izquierda. La corriente que se observa como función del voltaje aplicado se muestra también en la figura 3.

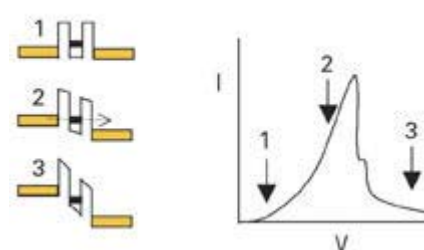


Figura 3. Esquema de doble barrera en AsGa-AsGaAl. En el esquema de la izquierda se muestran tres situaciones con distintos voltajes. En color se indican los niveles ocupados, entre las dos barreras se marca la energía del estado resonante. A la derecha se muestra la característica corriente voltaje. Las flechas indican el voltaje correspondiente a las tres situaciones que se muestran en el dibujo. El pequeño hombro a la derecha del máximo se debe a un efecto

En este dispositivo la relación corriente vs voltaje definitivamente no cumple la ley de Ohm: la corriente  $I$  no es proporcional al voltaje  $V$ . De hecho, hay valores del voltaje para los cuales cuando  $V$  aumenta  $I$  disminuye. Cuando esto ocurre se dice que el sistema tiene una resistencia diferencial negativa. En este dispositivo, la corriente está dominada por la interferencia cuántica debido a que la dimensión espacial del sistema es del orden de la longitud de onda de De Broglie. La primera observación experimental de sistemas con efecto túnel resonante en doble barrera fue anunciada por el japonés Leo Esaki y el grupo de IBM en 1972. En 1973 Esaki recibió el Premio Nobel.

de acumulación de carga.

## Los contactos puntuales

En el estudio de la conductancia en sistemas nanoscópicos aparecieron efectos inesperados. Uno de ellos fue el descubrimiento de la cuantización de la conductancia. Esto se observa claramente en experimentos con contactos puntuales. Aunque los contactos puntuales hoy se pueden fabricar con distintas técnicas y diferentes materiales, aquí nos limitaremos a presentar los construidos en juntas de AsGa-AsGaAl. Dopando un cristal de este material se puede fabricar un sistema en el que los electrones forman una delgada lámina ubicada en la interfaz entre el AsGa y el AsGaAl, la cual se encuentra algunos nanómetros por debajo de la superficie como se indica en la figura 4a.

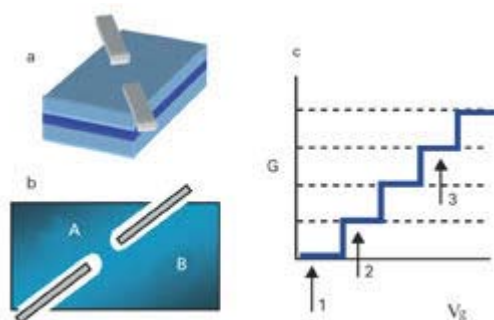


Figura 4.

a) Junta de AsGa-AsGaAl dopado. Los electrones cedidos forman un gas bidimensional (plano azul) confinados en la dirección perpendicular al plano del gas. Las regiones grises representan contactos sobre la superficie.

b) Vista superior de la muestra. Con un voltaje de compuerta se expelen los electrones de la zona blanca.

c) Conductancia como función del voltaje de compuerta. El voltaje de compuerta  $V_g$  es grande y negativo a la izquierda y disminuye hacia la derecha. Cada escalón es de  $2e^2/h$ . Las situaciones indicadas con flechas corresponden a: 1) contacto puntual cerrado, 2) admisión del primer modo transversal y 3) admisión del tercer modo transversal.

Se dice entonces que los electrones forman un gas bidimensional ya que en la tercera dimensión el gas está muy confinado. Sobre la superficie del cristal se colocan electrodos que no están en contacto directo con el gas de electrones. Aplicando un potencial  $V_g$  sobre los electrodos se genera un potencial que repele a los electrones del gas como se muestra en la figura 4b. Con esta técnica se puede 'tallar' a escala nanométrica la forma que adopta el gas de electrones, o más precisamente, de la 'caja' que lo contiene. En particular, en el ejemplo de la figura 4, quedan dos grandes áreas unidas por un pequeño puente o contacto puntual.

Cuando se establece una diferencia de potencial entre las zonas indicadas con las letras A y B en la figura 4b, los electrones deben circular atravesando el contacto puntual. La corriente entre dichos puntos se describe en el recuadro '[Cuantización de la conductancia](#)'; aquí solo resumimos el resultado final. Si el voltaje de compuerta  $V_g$  es muy grande y negativo, el contacto se corta: los electrones no pueden pasar de la zona A a la B debido a los campos eléctricos generados por los electrodos y la conductancia es cero. Esta situación corresponde al punto 1 en la figura 4c. Si  $V_g$  disminuye, se forma un contacto muy angosto que se puede representar por un hilo unidimensional; en este caso, la conductancia es  $2e^2/h$  y corresponde a la situación indicada con el número 2 en la figura. Esta cantidad, que depende solo de constantes universales, se denomina cuanto de conductancia. Si  $V_g$  disminuye aún más, el canal se ensancha y admite más de un modo transversal generando una conductancia que es un número entero de cuantos de conductancia (esto ocurre cuando el ancho del canal es un número entero de veces la longitud de onda de De Broglie). Es notable que a pesar de lo simple del argumento que da cuenta de la cuantización de la conductancia, este fenómeno no hubiera sido predicho al momento en que se descubrió experimentalmente.

## Focalización de electrones

Combinando una serie de contactos puntuales se pueden diseñar circuitos simples. Un ejemplo es el circuito de la figura 5 implementado recientemente en la Universidad de Harvard. Este dispositivo ha sido pensado para trabajar en presencia de un campo magnético. Un campo magnético ejerce una fuerza sobre cualquier partícula cargada que es perpendicular a la dirección del campo y a la velocidad de la partícula (fuerza de Lorentz). Consecuentemente, en una descripción clásica, un electrón en presencia de un campo magnético describiría una órbita circular de radio  $r_c$ . Dicho radio resulta inversamente proporcional a la magnitud del campo magnético.

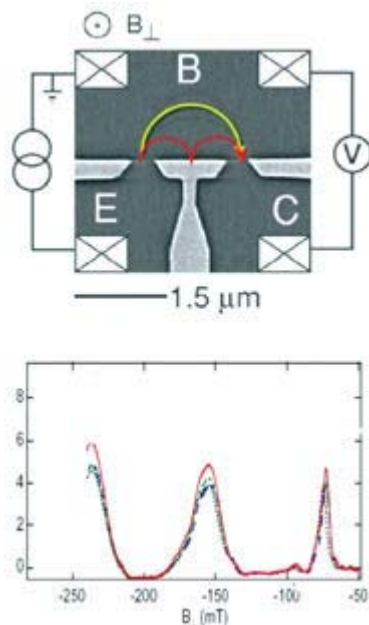


Figura 5.

Experimento de focalización de electrones. El panel de arriba muestra una fotografía del dispositivo. Para ciertos valores del campo magnético, los electrones emitidos por el contacto de la izquierda son focalizados en el contacto de la derecha (extraído de <http://marcuslab.harvard.edu>). Allí se acumulan y generan una diferencia de potencial  $V$  que se mide con un voltímetro. De este modo,  $V$  muestra un máximo (panel de abajo) para aquellos valores de campo que satisfacen  $n^2 r_c = d$ , donde  $d$  es la distancia entre contactos y  $n$  un número entero.

En el dispositivo de la figura, se establece una corriente eléctrica entre las zonas E y B a través del contacto de la izquierda. De acuerdo con la visión clásica, los electrones sujetos a la fuerza de Lorentz describen una órbita circular y, si el radio de esta órbita es el adecuado, llegan al segundo contacto e ingresan a la zona C donde se acumulan. Esta acumulación de carga se mide con un voltímetro. El campo magnético permite entonces focalizar a los electrones 'emitidos' por el primer contacto, en el segundo. Como se ilustra en la figura, esta focalización puede ocurrir también a campos grandes luego de uno o más rebotes en la superficie. El experimento de focalización muestra que en este sistema los electrones pueden viajar varios micrones sin dispersarse y que las reflexiones en la superficie son especulares. Los resultados se pueden interpretar en términos de las trayectorias clásicas pero esto nos plantea algunas preguntas básicas: ¿hasta qué punto, en experimentos de transporte en sistemas que estén a mitad de camino entre los nanoscópicos y los clásicos, es posible valerse de una imagen clásica para interpretar los resultados? La respuesta depende de varios factores, entre otros las dimensiones y la topología de la muestra. En lo que resta de la sección ilustraremos cómo, en el presente caso, se puede recuperar la imagen clásica a partir de un cálculo cuántico.

Las soluciones de la ecuación de Schrödinger nos permiten calcular cómo se transmite un electrón entre dos puntos de la muestra. En la figura 6a se presenta un mapa de color en el que se muestra la transmisión para un electrón que se inyecta, con una energía determinada, en el origen de coordenadas. El origen representa el contacto puntual que 'emite' los electrones. El resultado no es simplemente una órbita circular pero puede interpretarse como una superposición de órbitas circulares. Esta superposición es una consecuencia del principio de incertidumbre de la mecánica cuántica: cuando se inyecta un electrón con una coordenada bien definida, su impulso queda indeterminado. En el caso de la figura, para el electrón inyectado hay un abanico de posibles impulsos, cada uno de los cuales da lugar a una trayectoria distinta. Se puede representar un contacto más ancho inyectando el electrón a lo largo de una línea (ver figuras 6b, 6c y 6d). En este caso la indeterminación de la posición inicial del electrón aumenta lo que permite definir mejor su impulso. Cuando el ancho del contacto puntual es del orden o mayor que la longitud de onda de De Broglie asociada al electrón inyectado, la incerteza en el impulso es chica y se recupera una imagen de la trayectoria clásica (ver figura 6d). En particular, se puede notar que el electrón rebota en la superficie y continúa su órbita semicircular.

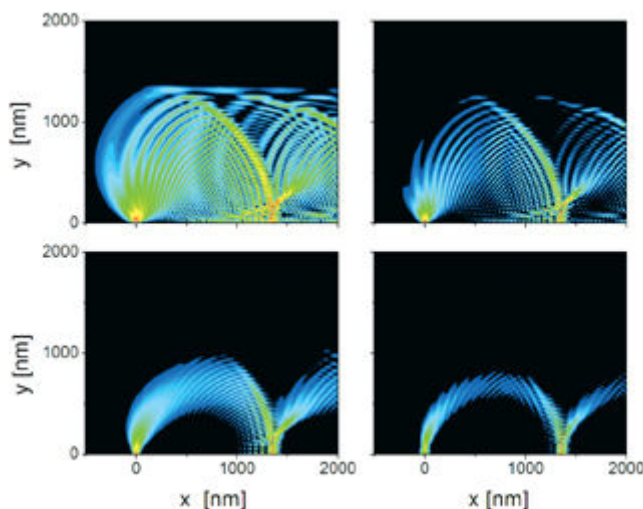


Figura 6.  
Mapa de color de la probabilidad de transmisión de un electrón inyectado en el origen con una incerteza en la posición de 5nm (a), 15nm (b), 65nm (c) y 100nm (d).

Cabe mencionar que en todos los casos de la figura hay un buen grado de focalización a una distancia  $2r$  del origen, esto se debe a la interferencia cuántica de las distintas trayectorias. En el siguiente ejemplo se presenta un dispositivo diseñado precisamente para estudiar la interferencia cuántica entre distintas trayectorias.

### El interferómetro de Aharonov–Bohm

Uno de los fenómenos que pone claramente de manifiesto la naturaleza ondulatoria de la materia es la interferencia y el ejemplo paradigmático es el experimento de las dos ranuras de Young (ver recuadro '[El experimento de las dos ranuras de Young](#)'). La posibilidad de realizar circuitos de dimensiones cada vez más pequeñas permitió implementar el experimento de Young utilizando nanoestructuras. Hoy se han construido con distintas técnicas circuitos nanoscópicos como el que se muestra en la figura 1b y que se idealiza en la figura 7. Estos circuitos consisten de un anillo conectado a terminales que se utilizan para inyectar corrientes y medir voltajes. Si los electrones pueden circular por el anillo sin que ocurran choques inelásticos, esta configuración es semejante a la propuesta por Young para la luz.

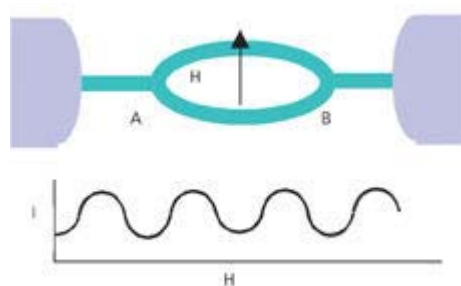


Figura 7. Anillo de Aharonov–Bohm. Una corriente de electrones circula de izquierda a derecha, ingresando al anillo por el punto A y saliendo de este por el punto B. A voltaje constante, la corriente oscila con el campo magnético aplicado como se muestra en el gráfico inferior.

De acuerdo con la mecánica cuántica, un electrón que arriba al punto A desde la izquierda, pasa 'simultáneamente' por ambos brazos del anillo y ambos caminos interfieren al llegar al punto B. Un flujo magnético  $H$  que atraviese el anillo cambia las fases relativas que adquiere el electrón al pasar por ambos caminos y, consecuentemente, la interferencia. Esto hace que la corriente como función del flujo magnético oscile como se muestra en la figura 7. Estas oscilaciones han sido observadas en anillos hechos de AsGa. Estos circuitos que funcionan como interferómetros se utilizan también insertando en una rama del anillo distintos objetos como pueden ser barreras de potencial o puntos cuánticos (como el de la figura 1). El resultado de la interferencia puede dar información sobre cómo circula la corriente a través del objeto insertado.

Es importante resaltar que la interferencia no ocurre entre dos electrones sino que se trata de la interferencia de dos caminos de un único electrón. En otras palabras, si la corriente fuese tan pequeña como para que en cualquier instante hubiese a lo sumo un electrón circulando por el anillo, el efecto de interferencia persiste. Pero, ¿es posible realizar este experimento en el que los electrones pasan de a uno?, ¿se pueden controlar y medir corrientes tan pequeñas? Actualmente se puede y esto nos lleva a

nuestro último ejemplo: los llamados puntos cuánticos o transistores de un electrón.

## Los puntos cuánticos

En el artículo de Fainstein y Hallberg, en este número, se definieron los puntos cuánticos. Aquí solo recordaremos algunos aspectos importantes de estos sistemas: uno de ellos es que los electrones del punto cuántico están confinados en una región espacial tan pequeña que cuando un electrón ingresa a la zona, inhibe la entrada de otros. Este fenómeno se conoce como el bloqueo de Coulomb y se debe a la interacción entre electrones. Sin embargo, el número de electrones confinados se puede cambiar. En la configuración de la figura 8, cambiando el potencial  $V_g$  del electrodo indicado con la letra g se altera la energía potencial de los electrones y de esta manera se cambia el número de electrones contenidos en el punto cuántico. Estos cambios ocurren cada vez que se disminuye la energía de potencial hasta superar el bloqueo de Coulomb. Los electrones confinados en el punto pueden, en principio, entrar y salir de este por las pequeñas ranuras que actúan como una delgada barrera de potencial. De esta forma, los electrones pueden transitar del semiplano superior al inferior de la figura 8 atravesando el punto cuántico.

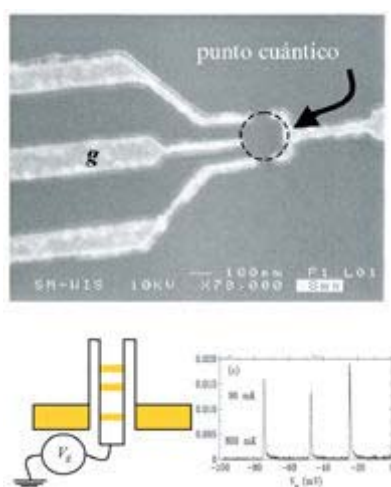


Figura 8.

a) Fotografía de un punto cuántico construido en AsGa (extraído del trabajo de D Goldhaber-Gordon y colaboradores). Las zonas claras son los electrodos litografiados sobre la superficie.

b) Esquema de niveles del punto cuántico. En amarillo los niveles ocupados de los gases de electrones que hay a ambos lados del punto. La zona central es el punto cuántico propiamente dicho con sus niveles de energía. Con el potencial  $V_g$  se corren los niveles confinados en el punto cuántico. A la derecha la conductancia como función de  $V_g$ . Los picos corresponden a situaciones en las que se alinea un nivel del punto cuántico con el nivel de Fermi del gas.

En general, la conductancia del punto cuántico es muy chica. Utilizando el voltaje de compuerta  $V_g$  se cambia la energía de los niveles confinados en el punto cuántico. Cuando un nivel coincide con la energía de Fermi de los contactos se produce el efecto túnel resonante y la conductividad es grande. Así, como se muestra en la figura, la conductancia como función de  $V_g$  muestra picos muy marcados. Para pasar de un pico al siguiente  $eV_g$  debe cambiar de modo de superar el bloqueo de Coulomb. Si se elige el potencial  $V_g$  de modo de estar en un pico de la conductancia, esta es grande. Cerca de ese valor, pequeñas variaciones de  $V_g$  producen un cambio muy grande en  $G$  y consecuentemente de la corriente. Esta es precisamente la acción de un transistor. Uno de los aspectos notables de estos dispositivos es que, debido al bloqueo de Coulomb, los electrones deben pasar de a uno por el punto cuántico. Es precisamente por esta razón que estos dispositivos suelen llamarse transistores de un electrón.

## Consideraciones finales

En resumen, hemos presentado ejemplos de dispositivos nanoscópicos en los que la corriente está determinada por la estructura geométrica y la naturaleza cuántica de los electrones. Entre los ejemplos se mencionó la doble barrera. Este dispositivo actúa con los electrones de manera similar a lo que hacen los filtros ópticos con la luz. Se mencionó cómo se construyen gases de electrones bidimensionales y a partir de allí cómo se fabrican contactos puntuales con formas de pequeños hilos en los que se confinan las funciones de onda en una dimensión, y finalmente puntos cuánticos en donde el confinamiento es en las tres dimensiones. Estos ejemplos permiten visualizar hasta qué punto hoy se puede hacer ingeniería de funciones de onda con el objetivo de diseñar dispositivos con propiedades predefinidas basadas en la naturaleza cuántica de los electrones. Se ha logrado controlar y medir corrientes tan pequeñas como las producidas por un solo electrón que atraviesa un punto cuántico y construir circuitos tan pequeños que

permiten observar la interferencia cuántica de un electrón que circula simultáneamente por dos ramas del circuito.

Han quedado áreas enteras sin mencionar, entre otras la electrónica molecular en donde se hace circular corrientes eléctricas por una molécula, en algunos casos moléculas orgánicas como proteínas o ADN, o moléculas más simples a las que se le pueden 'soldar' contactos macroscópicos. Otra de las áreas en las que hay una gran actividad es la denominada espintrónica, en donde se controla el espín de los electrones que llevan las corrientes eléctricas. Controlando simultáneamente la carga y el espín de los electrones se podría implementar una nueva clase de electrónica.

La miniaturización de la electrónica comercial llegará a un punto en el cual los efectos cuánticos se pongan claramente de manifiesto y, probablemente, una parte de la electrónica del futuro esté basada en alguno de los fenómenos que hoy se estudian en el laboratorio.



*Carlos A. Balseiro*

Doctor en Física, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo. Profesor Titular, Universidad Nacional de Cuyo, Instituto Balseiro. Investigador CNEA - Investigador Principal, CONICET. [balseiro@cab.cnea.gov.ar](mailto:balseiro@cab.cnea.gov.ar)



*Gonzalo Usaj*

Doctor en Física, Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba. Jefe de Trabajos Prácticos, Universidad Nacional de Cuyo, Instituto Balseiro. Investigador Asistente, CONICET. [usaj@ca.cnea.gov.ar](mailto:usaj@ca.cnea.gov.ar)

### *Lecturas sugeridas*

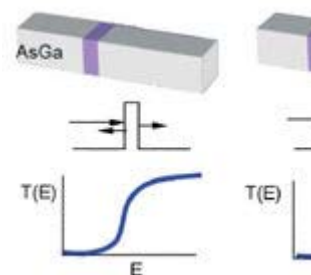
*PASTAWSKI H M AND MEDINA E, 2001, Rev. Mex. Física 47s1, 1-23, <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0103219>*

*A LOPEZ DÁVALOS Y J I CASTRO, 1993, 'La cola del pavo real, el magnetismo del corazón y otros entretenimientos', Ciencia Hoy, 22: 26-38.*

*Un video del experimento en el esquema de doble rendija de Young puede verse en <http://www.hqrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.cfm>*

## Efecto túnel y efecto túnel resonante

**Efecto túnel:** De acuerdo con la mecánica cuántica, un electrón que viaja libremente se puede describir con una onda. La longitud de onda de De Broglie asociada al electrón está determinada por su energía cinética. La teoría cuántica establece que cuando un electrón incide sobre una barrera de potencial, es reflejado con probabilidad  $R$  y transmitido con probabilidad  $T$ . La probabilidad de transmisión puede ser distinta de cero aun si la energía cinética del electrón incidente es menor que la altura de la barrera de potencial. Este fenómeno se conoce como efecto túnel y ha sido observado tanto en fenómenos naturales, como el decaimiento nuclear, como en experiencias de laboratorio. Cuando la energía del electrón incidente supera la altura de la barrera la probabilidad de transmisión  $T$  es prácticamente uno.





**Efecto túnel resonante:** Este efecto ocurre en sistemas con barreras dobles. Un electrón incidente puede ser reflejado y transmitido en la primera barrera, lo mismo ocurre con la componente transmitida cuando incide sobre la segunda barrera. De esta forma se producen reflexiones múltiples con ondas que se transmiten y reflejan luego de varias 'idas y venidas' entre las barreras. Todas las ondas reflejadas hacia atrás pueden interferir destructivamente y consecuentemente el efecto final es que no hay reflexión neta. Simultáneamente, las ondas transmitidas hacia adelante interfieren constructivamente y el electrón incidente se transmite con probabilidad uno, aun cuando su energía sea menor que la altura de las barreras. Esto ocurre solo cuando la longitud de onda de De Broglie del electrón incidente está debidamente sintonizada con la forma de las barreras y del espaciado entre ellas. Cuando esto ocurre se dice que la energía del electrón incidente coincide con la energía de un 'nivel resonante'.

Figura I. En la parte superior se muestra una muestra de AsGa con una o dos barreras de AsGaAl intercaladas. En el centro se muestra un esquema de la energía potencial que representa ondas que inciden y se transmiten. Abajo, se muestra un gráfico de la probabilidad de transmisión  $T$  de la energía del electrón incidente. En el caso de una barrera  $T$  crece rápidamente cuando  $E$  supera la altura de la barrera. En el caso de dos barreras  $T$  tiene un pico cuando la energía del electrón coincide con la energía de un nivel resonante'.

