**CONFINAMIENTO CUÁNTICO**

  Cuando los electrones en un material se encuentran restringidos a moverse en una región muy pequeña del espacio se dice que están confinados. Y cuando esta región es tan pequeña que es comparable a la longitud de onda asociada al electrón (llamada longitud de De Broglie), entonces comienza a observarse lo que se denomina “comportamiento cuántico”. Longitudes típicas son del orden de décimas de micrón al nanómetro (o sea, de aproximadamente 0.0001mm a 10-9m o una millonésima de mm). No sólo pasa con los electrones, sino también, como veremos luego, con la luz y el sonido. Un ejemplo conocido de confinamiento cuántico son los electrones de los átomos, especialmente los que están más cerca del núcleo. Éstos están atrapados por la interacción electromagnética ya que el electrón tiene carga eléctrica negativa y el núcleo positiva.

Tanto la luz como la materia, en realidad no se comportan ni como onda ni como partícula, sino que se necesita una teoría completamente diferente. Así surgió la Mecánica Cuántica, que es la base del funcionamiento de la electrónica moderna. Una de sus características es asociar una partícula, por ejemplo el electrón, con una función de onda.

En la figura 1 vemos un ejemplo de una partícula (que podría ser un electrón) confinada en una región muy pequeña del espacio que llamaremos *caja*. La Mecánica Cuántica nos dice que esta partícula no puede encontrarse en cualquier estado, sino que su función de onda asociada debe tener nodos (ser cero) en las paredes de la caja. El estado de más baja energía se corresponde con la onda más simple, siendo los estados más energéticos los que tienen más nodos en el interior de la caja cuántica, o, equivalentemente, las ondas con frecuencias más grandes. Las energías tienen valores determinados y se dice que están “cuantizadas” o “discretizadas”.

Figura 1: Un electrón en una caja nanómétrica. Aquí mostramos la función de onda y(x) que representa al electrón. La probabilidad de encontrar al mismo en cualquier lugar dentro de la caja es |y(x)|2. Las energías E correspondientes a cada estado, representado por el índice *n,* están dadas a la derecha. Como el electrón no puede tener cualquier estado o energía, se dice que los estados están “cuantizados”.

Hasta hace unos 20 años, la ciencia de materiales básicamente consistía en utilizar los elementos que la naturaleza provee (hierro, silicio, etc.), y desarrollar nuevos compuestos mezclando estos elementos de manera inteligente. Desde entonces, además de esto, los científicos han aprendido a hacer nuevos dispositivos fabricando estructuras artificiales en las que los átomos se depositan capa por capa y luego se estructuran lateralmente siguiendo arquitecturas prediseñadas. Esto, que es una de las bases de la nanociencia y la nanotecnología, permite fabricar con gran libertad e imaginación sistemas con propiedades novedosas, diferentes a las de sus componentes. En efecto, gracias a estos avances tecnológicos, es posible fabricar sistemas nanométricos artificiales en donde se pueden observar claramente los efectos del confinamiento cuántico en dos, una y cero dimensiones, 2D, 1D y 0D respectivamente. Como ejemplo en 2D podemos mencionar los pozos cuánticos, en 1D los alambres cuánticos y en 0D los puntos cuánticos. En lo que sigue describiremos primero ejemplos de confinamiento de electrones en nanoestructuras. En una segunda parte discutiremos como esto se puede extender para confinar, también, a la luz y a las vibraciones (sonido) en sólidos.

 **PUNTOS CUÁNTICOS:**

Un punto cuántico es un dispositivo artificial muy pequeño o una región del espacio de dimensiones muy pequeñas, desde algunas decenas de nanómetros a algunos micrones, que es capaz de confinar electrones en las tres dimensiones espaciales (por eso se llama cero-dimensional). Usualmente están fabricados con material semiconductor y pueden albergar desde ninguno a varios miles de electrones (ver Fig. 3). Los electrones que están adentro se repelen, cuesta energía introducir electrones adicionales, y obedecen el principio de exclusión de Pauli, que prohíbe que dos electrones ocupen el mismo estado cuántico simultáneamente. En consecuencia, los electrones en un punto cuántico forman órbitas de una manera muy similar a las de los átomos y en algunos casos se los denomina “átomos artificiales”. También presentan comportamientos electrónicos y ópticos similares a los átomos.

A diferencia con los átomos naturales, los puntos cuánticos no tienen núcleo y pueden conectarse fácilmente a circuitos para estudiar sus propiedades o usarlos como dispositivos electrónicos. También pueden fabricarse embebidos en un material tridimensional. Como, según el diseño, se puede lograr que los electrones pasen de a uno por estos sistemas, se los denomina también “transistores de un electrón”. La aplicación potencial es además en la computación cuántica, el almacenamiento de información para computadoras tradicionales, en biología, óptica y en optoelectrónica.

.



Figura 3: Diferentes tipos de puntos cuánticos. Arriba: puntos verticales; abajo: puntos laterales. Aquí mostramos el circuito típico usado para definir un punto cuántico. La zona azul representa una superficie metálica por donde circula la carga, obtenida formando un pozo cuántico usando dos materiales semiconductores usuales (arseniuro de galio y arseniuro de galio y aluminio, indicados en la figura). Las zonas claras representan los contactos donde se aplican los potenciales de compuerta (que cambia el número de electrones en el punto) y los contactos emisor y colector (que inducen el paso de la corriente). Fueron diseñados usando litografía de electrones y luego depositando cromo y oro. Las flechas rojas indican el camino seguido por los electrones en su paso por el punto cuántico.

**HILO CUÁNTICO.**

En [física de la materia condensada](http://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%ADsica_de_la_materia_condensada), un **hilo cuántico** es un [alambre](http://es.wikipedia.org/wiki/Alambre) [conductor](http://es.wikipedia.org/wiki/Conductor_el%C3%A9ctrico) [eléctrico](http://es.wikipedia.org/wiki/Electricidad) en el que los efectos [cuánticos](http://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica) afectan las propiedades del transporte. Debido al confinamiento de [electrones](http://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n) de conducción en la dirección transversal del alambre, su energía transversal es [cuantizada](http://es.wikipedia.org/wiki/Cuantizaci%C3%B3n) en una serie de valores discretos  (energía de "estado fundamental", con valor bajo),,... (Ver [partícula en una caja](http://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADcula_en_una_caja), [oscilador armónico cuántico](http://es.wikipedia.org/wiki/Oscilador_arm%C3%B3nico_cu%C3%A1ntico)). Una consecuencia de esta [cuantización](http://es.wikipedia.org/wiki/Cuantizaci%C3%B3n) es que la fórmula clásica para calcular la [resistencia](http://es.wikipedia.org/wiki/Resistividad) eléctrica de un alambre:



(Donde  es la resistencia,  es la longitud, y  es el área seccionada transversalmente del alambre), no es válida para los hilos cuánticos.

En lugar de ello, para calcular la resistencia de un alambre tiene que ser realizado un cálculo exacto de las energías transversales de los electrones confinados. Siguiendo desde la cuantización de la energía del electrón, la resistencia también se encuentra que debe ser cuantizada.

Para un material dado, la importancia de la cuantización es inversamente proporcional al diámetro del [nanohilo](http://es.wikipedia.org/wiki/Nanohilo). De un material a otro, es dependiente de las propiedades electrónicas, especialmente en la masa efectiva de los electrones. En palabras simples esto significa que, dentro de un material dado, dependerá de cómo interactúan los electrones de conducción con los átomos. En la práctica, los semiconductores muestran claramente la cuantización de la conductancia en grandes dimensiones transversales de alambre (100 [nm](http://es.wikipedia.org/wiki/Nan%C3%B3metro)), porque debido al confinamiento, los modos electrónicos están espacialmente extendidos. Como resultado, sus [longitudes de onda de fermi](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Longitud_de_onda_de_fermi&action=edit&redlink=1) son grandes y por lo tanto tienen bajas [separaciones de energía](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Separaci%C3%B3n_de_energ%C3%ADa&action=edit&redlink=1). Esto significa que solo pueden ser resueltas a temperatura criogénica (pocos kélvines) donde la energía de excitación térmica es más baja que la separación de energía inter-modo.

Para los metales, la cuantización correspondiente a los estados más bajos de energía solo se observa en alambres atómicos. Por lo tanto, su longitud de onda correspondiente es extremadamente pequeña, teniendo una separación de energía muy grande que hace una resistencia de cuantización perfectamente observable a temperatura ambiente.

**NANOTUBOS DE CARBONO COMO HILOS CUÁNTICOS**

Es posible hacer hilos cuánticos de [nanotubos de carbono](http://es.wikipedia.org/wiki/Nanotubo_de_carbono) [metálicos](http://es.wikipedia.org/wiki/Metal), por lo menos en cantidades limitadas. Las ventajas de hacer los alambres de nanotubos de [carbono](http://es.wikipedia.org/wiki/Carbono) incluyen su alta conductividad eléctrica (debido a una alta movilidad), peso ligero, [diámetro pequeño](http://es.wikipedia.org/wiki/Nanotecnolog%C3%ADa), baja reactividad química, y alta fuerza de [tensión](http://es.wikipedia.org/wiki/Tensi%C3%B3n_mec%C3%A1nica). La desventaja principal (al [2005](http://es.wikipedia.org/wiki/2005)) es el costo.

Se ha afirmado que es posible crear hilos cuánticos macroscópicos. Con una cuerda de nanotubos de carbono, no es necesario que ninguna fibra individual recorra la longitud completa de la cuerda, puesto que el [efecto túnel](http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_t%C3%BAnel) cuántico permitirá que los electrones salten de un filamento a otro. Esto hace a los alambres cuánticos interesantes para las aplicaciones comerciales.

En abril de 2005, la [NASA](http://es.wikipedia.org/wiki/NASA) invirtió $11 millones con la [Universidad de Rice](http://es.wikipedia.org/wiki/Universidad_de_Rice), por un lapso de cuatro años, para desarrollar hilo cuántico con una conductividad 10 veces mejor que el [cobre](http://es.wikipedia.org/wiki/Cobre) con un sexto del peso. Sería hecho con nanotubos de carbono y ayudaría a reducir el peso de la siguiente generación de [transbordadores espaciales](http://es.wikipedia.org/wiki/Transbordador_espacial), pero también puede tener un rango amplio de aplicaciones.