

## MECANICA CUANTICA DE SISTEMAS MESOSCOPICOS

*por Arturo López Dávalos*

Centro Atómico Bariloche-Instituto Balseiro

Quiero comenzar por agradecer a esta prestigiosa Academia por el honor que me confiere al incorporarme hoy. Debo dejar constancia que entiendo esto no como un honor personal sino como un homenaje a un sistema de educación y de producción científica y técnica instalado en Bariloche por el Dr. José Balseiro y sostenido durante todos estos años por la Comisión Nacional de Energía Atómica.

Voy a exponer sobre un tema que para mí tiene un gran atractivo ya que su avance va ligando paso a paso los progresos que se hacen en los aspectos teóricos, con los adelantos de la tecnología que posibilitan la fabricación de los sistemas sobre los que se hacen los respectivos estudios. Si bien en el país hasta hoy sólo se ha avanzado en los aspectos teóricos, hay planes y proyectos para implementar la fabricación de estos sistemas en el mediano plazo.

La mecánica cuántica ha sido diseñada para explicar los fenómenos físicos que ocurren a escala microscópica o a nivel atómico. Esta escala de tamaños está determinada por el diámetro de un átomo que típicamente es del orden 1 angstrom, es decir  $10^{-10}$  metros. Si usamos el radio atómico como unidad de medida tendremos que 1 nanómetro ( $10^{-9}$  metros) equivale a 20 veces esa unidad atómica y un micrón ( $10^{-6}$  metros) corresponde a 20000 veces la unidad atómica. El rango de lo que podemos llamar el mundo microscópico comienza por debajo de

un radio atómico y se interna hacia lo más pequeño, donde se encuentra el escenario del mundo nuclear y subatómico. Hacia afuera llega hasta unos 10 ó 20 radios atómicos, donde se desarrolla la física de las moléculas y de las macromoléculas. Más allá de eso comienza un mundo de dimensiones intermedias que se extiende hasta los 20000 radios atómicos donde podemos poner el límite de lo que usualmente llamamos el mundo macroscópico.

Esa región intermedia define lo que entendemos por los sistemas mesoscópicos (del griego mesos, medio). El mundo mesoscópico se extiende por aproximadamente tres órdenes de magnitud desde  $10^{-9}$  metros hasta  $10^{-6}$  metros.

Este mundo puede ser hoy explorado gracias a los avances de la tecnología que permiten la fabricación de sistemas metálicos o semiconductores de esas dimensiones. Las técnicas de fabricación se basan en la fotolitografía, que evapora los materiales constitutivos del sistema que se quiere construir, usando máscaras para definir aquellas partes del diseño donde no debe depositarse el material. Para lograr definir diseños donde las líneas tienen dimensiones mesoscópicas, debe usarse luz cuya longitud de onda sea menor que esas dimensiones. Si recordamos que la luz visible tiene una longitud de onda entre 400 y 750 nanómetros, vemos que resulta inadecuada. Por eso se utilizan Rayos X o luz ultravioleta. En algunos casos también se puede "tallar" la máscara o directamente la forma definitiva sobre una delgada lámina del material mediante un "cincel" constituido por un haz de electrones o de iones, que es comandado por

Conferencia pronunciada durante su incorporación, como Académico Correspondiente en San Carlos de Bariloche, el día 13 de Junio de 1991.

una computadora, como en un microscopio electrónico. Estos métodos surgieron de la necesidad de lograr cada vez menores tamaños en la industria electrónica, que apuntan a lograr circuitos electrónicos más compactos a fin de aumentar su velocidad de respuesta. Es así que se ha llegado ya a sistemas, que todavía se encuentran en la etapa experimental, cuya capacidad de respuesta está en el orden del Femtosegundo, es decir  $10^{-15}$  segundos. Si recordamos que la velocidad de la luz es de  $3 \times 10^{10}$  m/seg, veremos que ese es el tiempo necesario para que una señal luminosa atraviese  $10^{-5}$  metros, es decir una décima de micrón.

Una de las propiedades interesante de estos sistemas mesoscópicos es que en condiciones adecuadas, los electrones que forman parte de su estructura dan lugar a manifestaciones que son típicas de la mecánica cuántica (MQ). Estrictamente hablando aún a escala macroscópica las propiedades de los materiales son una consecuencia de la MQ. Es así que casi ninguna de las propiedades que posee un material, de los más comunes que conocemos, puede ser explicada sin recurrir a esta teoría.

En particular la cohesión de un material, es decir el hecho de que un gran número de átomos de una dada clase, por ejemplo de carbono se unan para formar un cuerpo sólido, sólo puede ser explicada a través de las propiedades de los orbitales atómicos, es decir un típico concepto cuántico. El éxito de la MQ en este aspecto puede considerarse como una extensión del éxito que tuvo esta teoría en la década del 30 en dar una explicación científica a las reglas empíricas establecidas por los químicos, dando así una base para ordenar una gran cantidad de valiosos conocimientos preexistentes. También el magnetismo en sus múltiples manifestaciones es una consecuencia de la MQ.

La novedad que se presenta ahora es que a escala mesoscópica y en muchos casos a escala macroscópica, los electrones pueden manifestar lo que podríamos impropriamente llamar "la más cuántica" de sus características, que son sus propiedades ondulatorias. Todos sabemos que en 1927 Davisson y Germer por un lado y Thomson por otro, pusieron en evidencia las características ondulatorias de los electrones en unos afa-

mados experimentos de interferencia. Lo que hacían estos físicos es hacer incidir un haz de electrones sobre una delgada lámina metálica, lo que permite a los electrones tomar más de un camino antes de llegar a una pantalla sensible o placa fotográfica donde dejan una impresión.

El carácter ondulatorio de los electrones se manifiesta en que el diagrama que impresionan en la pantalla corresponde exactamente a lo que sucedería si se tratase de ondas. Esto significa que sobre la pantalla se obtiene un diagrama de interferencia, es decir un patrón característico de máximos y mínimos.

La interferencia surge siempre que sea posible que una onda pueda tomar dos caminos para llegar de un punto a otro, o a una zona del espacio y mientras podamos evitar que los obstáculos o la fuente de las ondas destruyan la coherencia de la fase. Así el más clásico es el experimento de Young de la óptica en que un haz de luz que atraviesa un pequeño agujero en una pantalla, puede luego atravesar dos agujeros en una segunda pantalla antes de llegar a una tercera donde dibujan un diagrama de interferencia.

Este carácter ondulatorio de los electrones nos ha sido recordado de manera dramática en los últimos años, en que varios grupos de investigación han puesto a punto la técnica de "holografía electrónica" que consiste en lograr imágenes de interferencia usando un haz de electrones que se bifurca. Una de las componentes del haz atraviesa la muestra que se quiere estudiar, mientras la otra parte continúa viaje sin interactuar para ser usada como haz de referencia. La interferencia entre ambas partes produce las imágenes holográficas, del mismo modo que se produce un holograma óptico. Es interesante recordar aquí que la técnica holográfica fue propuesta por Gabor en 1948 para mejorar la microscopía electrónica. La técnica sólo pudo ser usada con relativo éxito en la óptica y se debió esperar hasta el desarrollo del láser, que produce haces coherentes e intensos, para poder aplicarla con todo su potencial. Ahora la posibilidad de disponer de cañones electrónicos adecuados permite su aplicación a la microscopía electrónica. Estos cañones son de los llamados

de emisión de campo, que producen un haz suficientemente intenso originado en una zona suficientemente pequeña como para asegurar la coherencia de fase.

En otro orden de cosas, la superconductividad permite la observación de fenómenos de interferencia a escala mesoscópica y macroscópica, gracias a que en este fenómeno entra en juego una función de onda macroscópica para pares de electrones, es decir una función de onda que describe en forma coherente un número muy grande de electrones y cuya amplitud es proporcional a un número macroscópico. Esta función de onda es semejante a la que describe los fotones de un haz del láser, que también es una función de onda macroscópica.

Es así que se puede construir el equivalente de un dispositivo como el usado por Young pero donde ahora lo que se bifurca es una corriente superconductora. Para construir este interferómetro superconductor, en la práctica se dispone un anillo superconductor que está conectado a un circuito por medio de dos conexiones simétricamente ubicadas y que sirven para alimentar una corriente superconductora que luego continúa por el resto del circuito. Puede probarse que, en esas condiciones, el dispositivo admite una corriente máxima, llamada crítica, que es función del campo magnético al que está sometido el sistema, o más precisamente es función del "flujo magnético" que pasa por el anillo. Si el anillo es de un material superconductor masivo, entonces el sistema sólo funciona si cada rama del anillo está interrumpida por una juntura Josephson, que cumple en este caso el mismo papel que las rendijas en el experimento de Young. Si en cambio el alambre del anillo es suficientemente delgado, del orden de algunos micrones, las junturas Josephson no son necesarias y la interferencia se produce de todas maneras.

Este dispositivo que se denomina SQUID, por las iniciales en inglés de Superconducting Quantum Interference Device, ha permitido en los últimos años diseñar sistemas muy sensibles para la determinación de campos magnéticos muy débiles. Así como un diagrama de interferencia óptica es muy sensible a las variaciones de las distancias

que determinan el patrón de interferencia, el diagrama de interferencia de un SQUID es muy sensible a las variaciones de campo magnético. El SQUID puede ser conectado a un circuito de medición y de esa manera puede ser usado como magnetómetro, como amperímetro, etc. Las sensibilidades que se logran son de los siguientes órdenes

amperímetro	$10^{-12}$ ampere
voltímetro	$10^{-14}$ volt
magnetómetro	$10^{-15}$ Tesla

En el caso del magnetómetro la sensibilidad indicada significa que se pueden detectar campos magnéticos que son varios órdenes de magnitud más pequeños que el campo magnético terrestre, que es del orden de  $10^{-4}$  Tesla. La disponibilidad de estos instrumentos ha hecho posible el desarrollo de nuevas técnicas de diagnóstico, conocidas como magnetocardiografía y magnetoencefalografía. Se basan en el hecho que los nuevos instrumentos permiten detectar los pequeños campos magnéticos que producen el corazón y el cerebro.

Los campos de aplicación son muy vastos e incluyen:

- Epilepsia
- Desórdenes Neuromusculares
- Desarrollo de Nuevas Drogas
- Mapas de la Función Cerebral
- Desórdenes Prenatales
- Determinación de Hierro en Hígado
- Magnetoneumografía

Quiero referirme ahora a un tema vinculado a las manifestaciones de la mecánica cuántica en escala mesoscópica en el cual se ha trabajado en el Centro Atómico Bariloche en los últimos 10 años. Me refiero a las propiedades de los llamados microcircuitos superconductores. Estos son microrredes de material superconductor, contruidos por los métodos que indiqué arriba, y que pueden tomar diversas formas. Su interés radica en que la función de onda macroscópica de la superconductividad satisface, cerca del borde de transición de fase entre el estado normal y el superconductor, una ecuación semejante a la ecuación de Schroedinger en la misma geometría. Entonces estos sistemas



superconductores de dimensiones mesoscópicas, que pueden ser construidos en condiciones controladas, pueden usarse para modelar las propiedades de sistemas microscópicos, que no siempre pueden ser construidos en condiciones tan controladas.

Esto puede aparecer como una pretensión irrazonable de un físico teórico, pero es necesario comprender la importancia de modelar sistemas simples que puedan servir para poner a prueba teorías que luego sean aplicables a sistemas más complejos. Así por ejemplo un sistema desordenado real, a nivel microscópico, se construye por técnicas donde el azar juega un papel importante y luego desde el punto de vista teórico no es posible modelar tan fácilmente. Usando las técnicas de fabricación de microrredes, pueden construirse redes planas desordenadas, con un desorden "controlado", ya que el método de fabricación permite programar en una computadora el trazado que debe hacer el "cincel" que talla la microrred, y el mismo programa puede ser usado para simular numéricamente el sistema electrónico que se quiere estudiar. Hasta ahora sólo se ha aplicado este método a redes planas, pero nada impide imaginar que en el futuro se pueda extender el método a redes tridimensionales.

El problema más interesante resulta el estudio de las propiedades de estas redes en presencia de un campo magnético aplicado. Redes planas desordenadas han sido estudiadas experimentalmente por Chaussy, Pannetier y Wang, del Laboratorio de Muy Bajas Temperaturas del CNRS de Grenoble, en 1986, verificando predicciones sobre este tipo de sistemas hechas por Simonin y López en Bariloche un año antes. De lo que se trata es de generar una red desordenada a partir de una red cuadrada perfecta a la que se le van suprimiendo tramos de acuerdo a ciertas reglas de azar, hasta alcanzar el llamado límite de percolación, en que se ha roto la continuidad eléctrica entre un extremo y el otro.

Las redes perfectas también tienen un gran interés dado que en presencia de un campo magnético, debe cumplirse la llamada condición de cuantización del flujo, que se deriva del requerimiento de que la fase de la función de onda debe estar unívocamente definida al dar una vuelta a

un camino cerrado, por cualquier circuito sobre la red. Esto impone condiciones muy especiales a la función de onda macroscópica, que llevan a que el diagrama de fases de estos sistemas, es decir la línea que separa la zona normal de la zona superconductora tenga una riqueza geométrica muy grande. En principio y para una red infinita, esta línea es localmente discontinua, y su derivada no está definida en ningún punto.

En función del campo magnético externo se obtiene una estructura periódica, es decir una situación que se repite cada vez que el flujo magnético aplicado coincide con un múltiplo entero de una unidad elemental de flujo magnético llamada el cuanto de flujo. En la región que corresponde a un período, es decir por ejemplo entre cero y un cuanto de flujo, puede demostrarse que la línea tiene una estructura fractal, o autosemejante, ya que presenta unos picos característicos cada vez que el flujo magnético aplicado corresponde a la condición de que haya un número entero de cuantos de flujo cada  $N$  celdas elementales de la red. Y esta situación se repite cada vez que incrementamos  $N$  en un múltiplo entero.

Esto significa que una línea de transición de fase, para una dada red, presenta el mismo aspecto si la miramos con una lupa que nos permita ir amplificando el detalle de nuestra observación. A medida que avanzamos hacia lo más pequeño en la curva de transición de fase, vamos avanzando hacia ver lo que sucede en zonas cada vez más grandes de la red en el espacio real. En la práctica, dado que se trata de sistemas finitos, del orden de  $100 \times 100$  celdas en el caso de las redes cuadradas, este paseo hacia la fractalidad de la curva se acaba luego de unos seis o siete pasos, donde ya empiezan a tener influencia en los detalles de lo que observamos, las zonas de la red que se encuentran próximas a los bordes.

Como sistemas intermedios entre las redes ordenadas y las desordenadas, algunos investigadores han estudiado las redes del tipo de los embaldosados de Penrose, que son redes ordenadas que se caracterizan por tener simetría local, es decir que a partir de un dado punto de la red es posible decir en qué ángulos se van a encontrar los otros

puntos. Estos ángulos están relacionados con la simetría pentagonal. Esto lleva a que las redes de Penrose carezcan de simetrías de traslación, es decir que aunque sea posible predecir donde se encuentran todos los puntos de la red, la misma carece de un elemento esencial de la física del estado sólido que es la simetría de traslación.

En los últimos años y gracias al avance de las técnicas de preparación de materiales que permiten controlar la pureza, ha sido posible construir sistemas mesoscópicos no superconductores, en los cuales los electrones muestran coherencia de fase y por lo tanto permiten observar fenómenos de interferencia cuántica. La pureza de los materiales es esencial para esto ya que en un material normal las colisiones de los electrones entre sí y con las impurezas de la red cristalina llevan a que se pierda la memoria de fase y por lo tanto sea imposible observar fenómenos de interferencia. En estos nuevos sistemas se tiene una estructura cristalina suficientemente perfecta, una pureza controlada y unas temperaturas suficientemente bajas para disminuir los choques con las oscilaciones de la red y con otros electrones. En estas condiciones es posible mantener la memoria de la fase por distancias suficientemente grandes, del orden de las dimensiones del sistema, como para que sea posible la interferencia.

Así es que en anillos de material normal (no superconductor) y también en redes semejantes a las superconductoras pero de materiales normales es posible observar oscilaciones de la resistividad, en presencia de un campo magnético, que son consecuencia de la cuantización del fluxoide en estos sistemas. Una diferencia esencial, entre los sistemas superconductores y los de material normal es que en el primer caso la cuantización del fluxoide se hace en unidades de un cuanto de flujo que contiene la

carga de dos electrones, porque los portadores de carga son pares de electrones. En los sistemas normales el cuanto de flujo puede corresponder a uno o dos electrones según las condiciones del problema. La diferencia está determinada por las características de las colisiones de los electrones entre sí y con el medio, que determinan la pérdida de la memoria de fase.

## REFERENCIAS

1. Magnetic Phase Boundary of Simple Superconductive Micronetworks. H. J. Fink, A. López y R. Maynard. *Phys. Rev. B* 26, 5237 (1982).
2. Upper Critical Field of Regular Superconducting Networks. J. Simonin, D. Rodrigues y A. López; *Phys. Rev. Lett.* 49, 944 (1982).
3. Upper Critical Fields of Regular Superconductive Networks. Surfaces and Impurities. J. Simonin, C. Wiecko y A. López. *Phys. Rev. B* 28, 2497 (1983).
4. Critical Transport Currents of Superconducting Microarrays. H. J. Fink y A. López. *J. Physique Lettres* 46, L-961 (1985).
5. Percolation in Superconductive Networks. J. Simonin y A. López. *Phys. Rev. Lett.* 56, 2649 (1986).
6. Quantum Interference Devices without Josephson Junctions. H. J. Fink, V. Grunfeld y A. López. *Phys. Rev. B* 35, 35 (1987).
7. Commensurate Vortex States of the Infinite Superconducting Microladder. H. J. Fink, A. López y D. Rodrigues; *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 26, 1465 (1987).
8. Perturbation Theory of Superconducting Micronetworks near the Phase-transition Boundary. H. J. Fink, D. Rodrigues y A. López; *Physical Rev. B* 38, 8767 (1988).
9. Metal Insulator Transition in Random Superconductive Networks. D. Dominguez, A. López y J. Simonin. *Physical Rev. B* 42, 8665 (1990).
10. Perturbation Theory of Superconducting Micronetworks. Second Order and Self-Induction Effects. J. I. Castro y A. López. *Physical Review B* 46, 1075 (1992).
11. Symmetries of Superconductor Micronetworks. J. I. Castro y A. López. *Solid State Commun.* vol 82, N° 10, 787-790 (1992).