

# CONVERSUS



• Donde la ciencia se convierte en cultura •

**Anorexia, adicción  
a la inanición**

**La trascendencia de Gandhi  
en nuestros días**

**Televisión  
en internet,  
próximo paso**

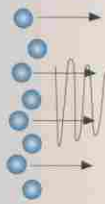


# El Gran Colisionador de Hadrones LCH

**El mayor experimento de la historia**

ISSN - 1665 - 2665  
Precio: \$20.00 M.N.





Cinvestav en su tinta

Oscar Rosas-Ortiz\*

# La transición entre lo macroscópico y lo atómico

Gabino Torres Vega\*\*



\*Investigador del Departamento de Física del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Editor de la presente columna.

\*\*Investigador del Departamento de Física del Cinvestav

**L**OS MUNDOS MACROSCÓPICO Y ATÓMICO. Una de las prioridades en nuestras vidas es la de saber cómo funcionan el ambiente y la sociedad en la que vivimos. Así que uno de nuestros mayores intereses, y en lo que empleamos mucho tiempo, es explorar el mundo. Desde que nacemos nos damos cuenta de que podemos interactuar con las cosas que vemos y, consecuentemente, podemos manipular y transformar al medio. Después, también aprendemos a manipular a la gente, entre otras cosas. Este conocimiento es indispensable para poder desenvolvernos y sobrevivir en el mundo.

Como resultado de dichas exploraciones nos familiarizamos tanto con nuestro entorno que resulta sorprendente enterarse de que el *mundo microscópico* es muy diferente a lo que estamos tan familiarizados, a lo que tanto nos hemos esforzado en conocer, pero que es macroscópico (compuesto de muchas partículas microscópicas). Los objetos microscópicos (como son los átomos y las moléculas) se pueden comportar, además de cómo partículas, también cómo lo hacen las ondas, una característica que los hace tan peculiares. La física de estas cosas tan pequeñas se puede describir con la teoría que se conoce como *mecánica cuántica*, la cual empezó a desarrollarse a principios del siglo XX.

La mecánica cuántica se formuló para explicar varios fenómenos observados experimentalmente como son el espectro de los elementos químicos y el efecto fotoeléctrico, entre otros. Su validez se ha comprobado ininidad de veces, desde sus inicios, y no hay duda de que describe correctamente la forma en que se comporta la naturaleza a esas dimensiones. Actualmente se tiene la capacidad de crear dispositivos cada vez más pequeños y se está llegando al punto en el que se pueden crear *aparatos* en el reino de lo microscópico, así que ahora debemos familiarizarnos con la mecánica cuántica a fin de poder sacar provecho de ellos.

Cabe entonces preguntarnos: ¿cómo es que los objetos con los que interactuamos cotidianamente están hechos de átomos y moléculas y, sin embargo, *no se comportan como ellos*? ¿Cómo es que el comportamiento de las cosas microscópicas (fenómenos cuánticos) se convierte en lo que experimentamos cotidianamente (fenómenos clásicos)? Estas son unas de las muchas preguntas que los físicos se han hecho durante mucho tiempo y que se podrían contestar con el desarrollo de la nanotecnología. Aunque todavía es bastante difícil hacerlo y no se ha logrado por completo, ya es posible construir objetos de tamaño muy reducido con los que se puede estudiar la transición del comportamiento cuántico al clásico y viceversa.

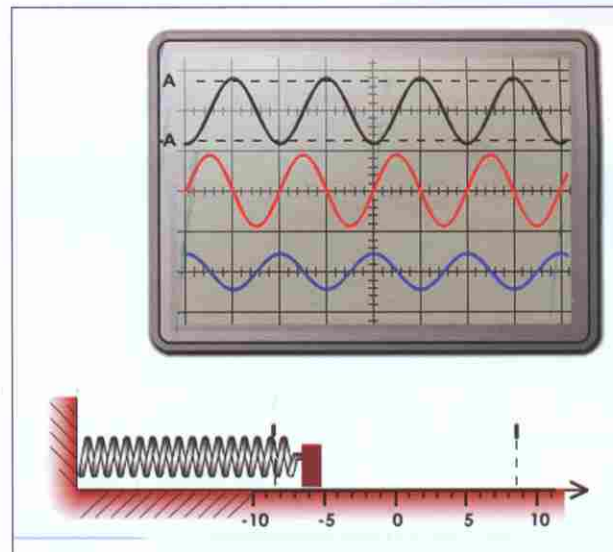
Para ello se debe construir un objeto cuyas dimensiones se encuentren en la región limítrofe entre lo macroscópico (compuesto de muchos átomos y/o moléculas) y lo atómico. Un objeto de este tipo debe tener un número no muy grande de átomos, debe estar muy frío (alrededor de 10 milésimas de grado Kelvin de temperatura, ya que es a bajas energías cuando se observa el comportamiento cuántico) y, además, se deben desarrollar aparatos de medición para monitorear el comportamiento de dicho objeto. Estas metas son un reto tecnológico y científico que sólo muy recientemente se está alcanzando.

#### EL OSCILADOR ARMÓNICO

El *oscilador armónico* es un modelo muy estudiado y utilizado en ciencias e ingeniería. Se trata de cualquier objeto, o sistema, que presente oscilaciones del tipo que aparecen en los resortes y en las cuerdas de una guitarra. Conocemos muy bien lo que es un resorte; se le puede comprimir o estirar (dentro de ciertos límites) y también se puede hacer que vibre. Hay un sinnúmero de aplicaciones de los resortes, como puede ser en las suspensiones de los automóviles, por poner un ejemplo.

Sin embargo, entre otras cosas, un *oscilador armónico cuántico* difiere de uno *macroscópico* (clásico) en que su movimiento está limitado. La amplitud de sus oscilaciones no puede ser cualquiera ya que sólo tiene permitido tomar unos valores bien definidos (valores discretos). Una forma de saber si el comportamiento de un oscilador ha cambiado del régimen clásico al cuántico y viceversa correspondería a identificar qué tipo de valores toma su amplitud de oscilación.

Con las mismas técnicas con las que se construyen los *chips* de las computadoras se pueden construir minúsculos osciladores armónicos con la forma de una cuerda (entre otras) y que están hechos con relativamente pocos átomos. Cuando se les enfría muy cerca del cero absoluto de temperatura, estos osciladores se pueden utilizar para estudiar la transición de lo macroscópico a lo microscópico. A esta clase de sistemas se les conoce como *resonadores cuánticos* y hay de varios tipos.



Oscilador armónico

## RESONADORES CUÁNTICOS

Si tenemos un oscilador cuántico, la energía más baja que puede tener es del orden de  $hf$ , donde  $h$  es la constante de Planck y  $f$  es la frecuencia de la vibración. Para observar los efectos cuánticos y no el efecto de la temperatura del sistema, esta energía debe ser mayor que la energía térmica  $k_B T$ , donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es la temperatura absoluta.

Actualmente se producen osciladores de silicio que tienen unas pocas micras de longitud. Para hacerlos vibrar se les deposita una capa de aluminio y después se les introduce en un campo magnético. Cuando se hace pasar una corriente eléctrica por la capa de aluminio, ésta experimentará una fuerza debida a las cargas que se están moviendo por la presencia del campo magnético y provoca que el oscilador se mueva. Variando la corriente se puede hacer que el movimiento del oscilador coincida con sus frecuencias naturales de vibración. Así se logra el máximo movimiento y se dice que la cuerda entra en resonancia.

Al disminuir el tamaño de una cuerda su rigidez se incrementa, por lo que la amplitud de su movimiento disminuye y su medición se hace más difícil. En un resonador cuántico se tienen desplazamientos del orden de femtómetros ( $10^{-15}$ m), así que para medir estas vibraciones se han ideado varios métodos. Uno de ellos consiste en usar un transistor que es capaz de detectar el movimiento del oscilador a través de cambios en la carga eléctrica ¡de la magnitud de la carga de un solo electrón! Sin embargo, a pesar de ser uno de los dispositivos más sensibles que se conocen, con este detector no se ha logrado la sensibilidad requerida.

Otro método de detección puede ser a través de la reacción del propio sistema al movimiento en el campo magnético. En la Figura 1 se puede ver uno de esos resonadores (tomado del artículo de Gaidarzhy). Aunque hay algunas dudas al respecto, se dice que con este dispositivo se ha detectado la transición del régimen clásico al cuántico. La forma de este resonador hace que su desplazamiento sea mayor al de otros diseños (ahora es del orden de picómetros:  $10^{-12}$ m), permitiendo la detección de su movimiento. Además, es un objeto macroscópico (tiene alrededor de  $50 \times 10^9$  átomos de silicio) que puede trabajar a una frecuencia de 1.49 GHz; mayor que la de otros diseños.



Figura 1. Microfotografía de un resonador cuántico, tomada del artículo de Gaidarzhy. Es un oscilador con forma de antena hecho de silicio de 10 micrómetros de longitud y 400 nanómetros (nm) de ancho. Tiene dos arreglos de paletas de 500 nm de longitud y 200 nm de ancho. El grosor de la estructura es de 245 nm.

En dicho resonador se verificó que el comportamiento es clásico a 1 000 mK mientras que a 110 mK se empiezan a observar los efectos cuánticos. En estas condiciones, el sistema salta de un estado a otro conforme se cambia el campo magnético, indicando que las amplitudes de movimiento fundamentales son discretas. Como mencionamos anteriormente, en los sistemas cuánticos algunas propiedades físicas, como la energía, solo pueden tomar valores bien definidos (*discretos*). Esto es justamente lo que se observó en el nanoresonador que describimos arriba.

Un resonador cuántico pasa muy fácilmente del régimen lineal al no lineal así que, en el futuro, será necesario trabajarlo en ese modo, lo cual es algo novedoso ya que los aparatos de medición que se han utilizado a la fecha normalmente trabajan en forma lineal: Si una cantidad aumenta al doble, la aguja del aparato que la mide se moverá al doble que lo que marcaba antes.

Para terminar mencionaremos que, basados en los resonadores cuánticos, se están ideando nuevos tipos de transistores de un solo electrón, incluyendo puntos cuánticos que transportan electrones a través del resonador. Ya se están caracterizando dispositivos con propiedades diferentes a los dispositivos electrónicos ya conocidos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Gaidarzhy, Alexei, Guiti Zolfagharkhani, Robert L. Badzey y Pritiraj Mohanty. "Evidence for quantized displacement in macroscopic nanomechanical oscillators", *Phys. Rev. Lett.* 94, 030402 (2005).
- Peano, V. y M. Thorwart. "Macroscopic quantum effects in a strongly driven nanomechanical resonator", *Phys. Rev. B* 70, 235401 (2004).
- Gaidarzhy, Alexei, Guiti Zolfagharkhani, Robert L. Badzey y Pritiraj Mohanty. "Spectral response of a gigahertz-range nanomechanical oscillator", *Appl. Phys. Lett.* 86, 254103 (2005).
- Zolfagharkhani, Guiti, Alexei Gaidarzhy, Seung-Bo Shim, Robert L. Badzey, y Pritiraj Mohanty. "Quantum friction in nanomechanical oscillators at millikelvin temperatures", *Phys. Rev. B* 72, 224101 (2005).
- Schwab, K.C., M. P. Blencowe, M. L. Roukes, A. N. Cleland, S. M. Girvin, G. J. Milburn y K. L. Ekinci. Comment on "Evidence for quantized displacement in macroscopic nanomechanical oscillators", *Phys. Rev. Lett.* 95, 248901 (2005).
- Gaidarzhy, Alexei, Guiti Zolfagharkhani, Robert L. Badzey y Pritiraj Mohanty. "Gaidarzhy et al reply", *Phys. Rev. Lett.* 95, 248902 (2005).
- Postma, H.W. Ch., I. Kozinsky, A. Husain y M.L. Roukes. "Dynamic range of nanotube- and nanowire-based electromechanical systems", *Appl. Phys. Lett.* 86, 223105 (2005).
- Cleland, A.N., y M. L. Roukes. "A nanometre-scale mechanical electrometer", *Nature* 392, 160 (1998).
- Ogi, Jun, Yoshishige Tsuchiya, Shunri Oda y Hiroshi Mizuta. "Single-electron tunnelling via quantum dot cavities built on a silicon suspension nanobridge", *Microelectronic Engineering* 85, 1410 (2008).