

Fonones: Cuasipartículas de calor y sonido

Gerardo Martínez Avilés

Sin lugar a dudas, una de las más grandes revoluciones en el pensamiento humano es la aparición de la física cuántica, actualmente la teoría más exitosa para describir el comportamiento de la materia y la luz a escalas microscópicas. En dicha teoría se pone de manifiesto que la naturaleza de la materia es aún más extraña de lo que nos imaginábamos: bajo determinadas condiciones, las partículas se comportan como ondas y las ondas como partículas. Históricamente, se considera que la teoría cuántica nace cuando el físico Max Planck, al tratar de explicar cómo radia un cuerpo negro, introduce el concepto de que la luz, hasta entonces considerada una onda, también podía ser vista como una partícula portadora de paquetes de energía: el fotón. Algunos años más tarde, Louis

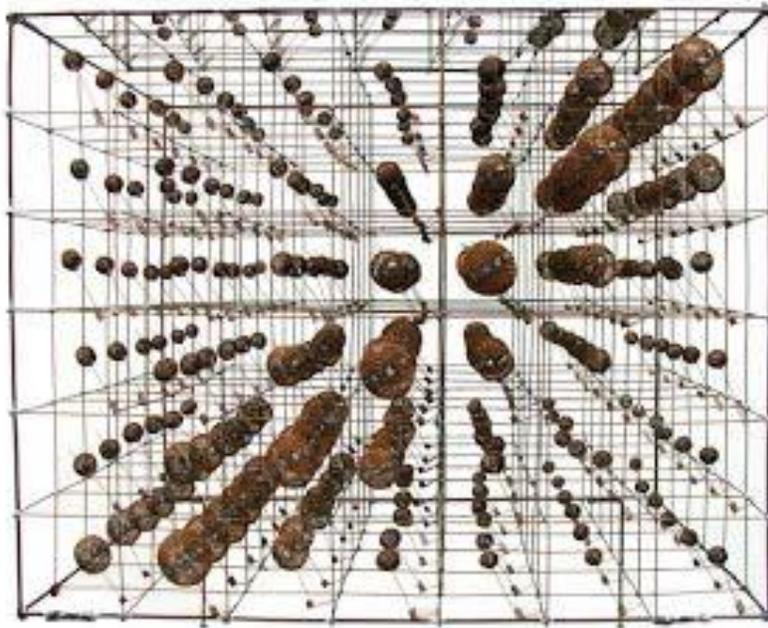
de Broglie propone la idea contraria: una partícula podemos asociarle (de acuerdo a su cantidad de movimiento, que es el producto de la masa de la partícula por la velocidad a la que se mueve) una longitud de onda y, por lo tanto, podemos asociarle propiedades ondulatorias. Por supuesto, hay que tener en mente que la dualidad onda-partícula sólo puede ser observada a niveles microscópicos y no en las grandes escalas donde aplica la física clásica.

Es bien conocido que el sonido se debe a la transmisión de ondas de presión en el material donde se propaga: ya sea un líquido o un sólido, el sonido puede describirse con la teoría ondulatoria. Pero siguiendo la línea de pensamiento de la mecánica cuántica ¿Puede considerarse entonces que el sonido a niveles microscópicos también se comporte como una partícula? Al parecer, la naturaleza vuelve a sorprendernos: a dichas partículas se les conoce como fonones.

Esta idea se le ocurrió en 1932 al físico ruso Igor Tamm (quien ganó un premio Nobel de física, pero no por los fonones). Tamm trató de describir la forma en que se excita un arreglo periódico y elástico de átomos o moléculas, ya sea en estado sólido o líquido. Para ello, tomó prestada la idea de De Broglie de interpretar el movimiento ondulatorio del arreglo como el desplazamiento de una partícula. El nombre fonón viene del griego *phonos* que puede traducirse como “sonido” o “voz”. De ahí también, por ejemplo, las palabras *teléfono* (sonido a distancia) o *afónico* (sin voz). Se eligió el nombre fonón, dado que las vibraciones periódicas de la materia con grandes longitudes de onda (es decir, fonones de gran longitud de onda) producen el sonido como lo conocemos.

Los fonones son la descripción de un tipo especial de vibración en el arreglo de algún material en el cual se propaga una perturbación.

Cuando un material vibra, la vibración puede ser descrita como la suma de ciertas vibraciones elementales, conocidas como modos normales de vibración. Para modelar el comportamiento de los fonones, los físicos suponen a los materiales como arreglos periódicos de átomos o moléculas. Los enlaces entre dichos átomos son considerados como resortes elásticos. Los modos normales son las frecuencias en las que los resortes oscilan más cómodamente, dependiendo de la masa atada al resorte y de la elasticidad del mismo. Cuando uno de los átomos es desplazado de su posición de equilibrio (cuando el resorte no está tenso), se desata una onda o un fonón, que se propaga por el material. Los materiales están llenos de fonones de diferentes energías o frecuencias viajando caóticamente en todas direcciones. Pero a diferencia de los fotones, que usualmente no interactúan entre ellos cuando tienen distintas frecuencias, los fonones se superponen unos a otros creando patrones muy complejos que son muy difíciles de analizar. Los cristales de hecho son muy parecidos a los arreglos de átomos y resortes que modelan los físicos, y es por eso que el comportamiento de los fonones es particularmente útil cuando se habla de las propiedades acústicas o térmicas de ellos.



Simulación de una red cristalina; Los átomos o moléculas se encuentran separados por resortes elásticos; éstos son el medio en el que se propagan los fonones.

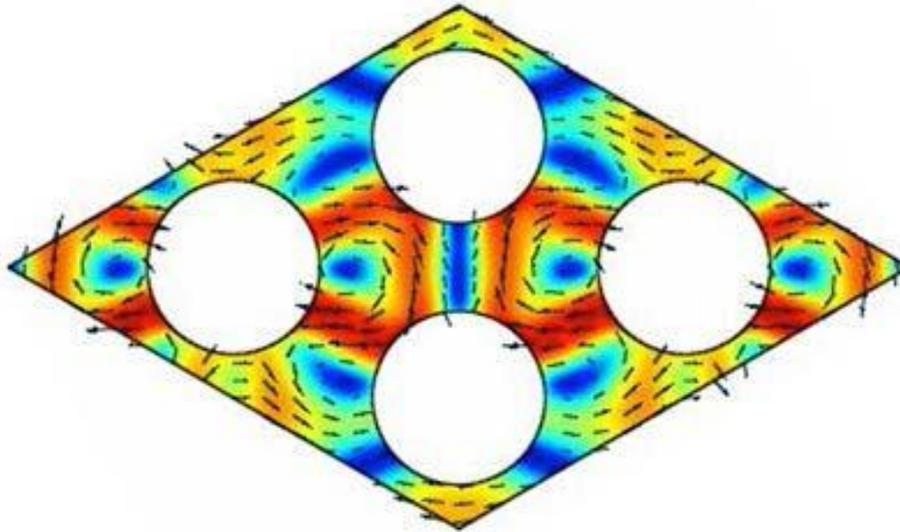
<http://materiaxi.blogspot.com/2011/07/fisica-del-estado-solido-fonones-i.html>

Es fácil deducir que a una onda podemos asociarle una partícula (dado la dualidad onda-partícula de la mecánica cuántica). Pero los fonones son más bien considerados *cuasipartículas*. La diferencia es fácil de entender; si bien una partícula, por ejemplo un electrón, puede existir por sí misma, una cuasipartícula no. Podemos tener electrones libres, pero los fonones solamente existen como una manifestación colectiva de la materia. Necesitan un medio que se excite para poder existir, justamente como el sonido, que no puede existir en el vacío, sino que necesita un medio donde propagarse. Así que cuando los físicos dicen: “un fonón se mueve”, debemos entender: “un arreglo de muchos átomos o moléculas está vibrando de una manera específica”.

Pero más allá de las discusiones filosóficas, la idea de los fonones ha demostrado tener gran poder predictivo cuando se quieren describir ciertas propiedades de materiales en estado sólido o líquido. Por ejemplo, se ha visto que los fonones pueden interactuar con electrones, y describir dicha interacción simplemente como la colisión de dos partículas. Se ha medido en experimentos realizados en el Instituto tecnológico de Massachusetts, el famoso MIT, la dispersión de electrones por interacción con fonones. Esto ha demostrado tener aplicaciones en diversas ramas de la tecnología, como la electrónica o el procesamiento de información.

Ahora bien, el sonido no es lo único que se propaga en los materiales en forma de vibraciones. El calor, al igual que el sonido, es de hecho la vibración de átomos y moléculas. Podemos hacer entonces una división; las vibraciones de baja frecuencia producen sonido, mientras las de alta frecuencia producen calor. Esto también crea la división entre fonones acústicos y fonones ópticos.

Los materiales de los que depende nuestra tecnología son cada vez más pequeños, y para poder entenderlos y controlarlos de una mejor manera, es necesario utilizar las herramientas de la física cuántica. Para los ingenieros que diseñan teléfonos celulares, celdas solares o microprocesadores, es muy importante conocer las propiedades térmicas y conductoras de los materiales que utilizan: para ellos la fonónica es una herramienta fundamental. Sin ella, el control de muchas de las propiedades térmicas de los materiales sería imposible. Pensemos, por ejemplo, en que queremos conocer la forma en que un chip pierde energía en forma de calor. Si lo que queremos es reducir dicha pérdida, podemos hacer uso de un modelo en el que se restrinja la forma en que nuestros fonones ópticos pueden moverse en nuestro material.



La figura muestra una simulación de computadora de cómo fonones de diferentes energías (indicadas con diferentes colores) se distribuyen en un cierto material. Los agujeros blancos son espacios prohibidos para fonones de determinadas frecuencias.

<http://web.mit.edu/newsoffice/2010/explained-phonons-0706.html>

Podemos ver que los fonones son una herramienta muy útil para la descripción, el estudio y el control de los materiales que utilizamos en la tecnología de nuestra vida diaria. Nuestras computadoras y teléfonos celulares son sólo algunos ejemplos de las muchas aplicaciones que tiene esta genial idea de la física moderna. Si bien es cierto que las matemáticas y la física con las que se estudian los fonones son bastante complicadas, cada día se tienen más y mejores modelos de la forma en que actúan estas curiosas cuasi partículas. Realmente se esperan muchos frutos de ellas en las tecnologías del futuro.

Bibliografía

1. <http://web.mit.edu/newsoffice/2010/explained-phonons-0706.html>
2. <http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/80/>
3. <http://materiaaxi.blogspot.com/2011/07/fisica-del-estado-solido-fonones-i.html>
4. <http://www.wisegeek.com/in-physics-what-is-a-phonon.htm>