

EPISTEMUS Datos a rellenar por la revista

DOI: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

[www.epistemus.unison.mx](http://www.epistemus.unison.mx)

## Ondas térmicas

Jesús Manzanares Martínez [1]

### RESUMEN

***Recientemente se ha observado la existencia de ondas térmicas en germanio, un material semiconductor que es ampliamente usado en la industria electrónica. Este descubrimiento abre la puerta para controlar el flujo de calor no como una difusión, sino como una onda. La existencia de ondas de temperatura en semiconductores permitirá mejorar significativamente la eficiencia energética de nuestros dispositivos electrónicos. Por ejemplo, es común que se acumule grandes cantidades de calor residual en nuestras computadoras y teléfonos móviles. El tratamiento de calor como onda abre la puerta para reutilizar esa energía.***

*Palabras clave:* Ondas térmicas, temperatura, calor

1Dr en Física, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, México [HYPERLINK](#)

"mailto:jesus.manzanares@unison.mx"jesus.manzanares@unison.mx, 0000-0003-0586-234X

*Autor de Correspondencia:* Jesús Manzanares Martínez, [jesus.manzanares@unison.mx](mailto:jesus.manzanares@unison.mx)

**Recibido:** a rellenar por la revista

**Aceptado:** a rellenar por la revista

**Publicado:** a rellenar por la revista

**Cómo citar este artículo:**

a rellenar por la revista

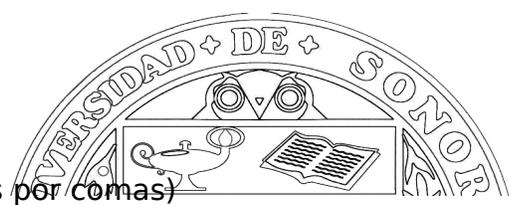
## Thermal waves

### Abstract

*The existence of thermal waves in germanium, a semiconductor material that is widely used in the electronics industry, has recently been observed. This discovery opens the door to control the flow of heat not as a diffusion, but as a wave. The existence of temperature waves in semiconductors will significantly improve the energy efficiency of our electronic devices. For example, it is common for large amounts of waste heat to build up in our computers and mobile phones. The treatment of heat as a wave opens the door to reuse that energy*

**Key words:** *Thermal waves, temperature, heat*





## Introducción

En un trabajo publicado recientemente por investigadores de la Universidad Autónoma de Barcelona, se reportó la observación experimental de ondas térmicas en germanio. [1] Las ondas térmicas es un fenómeno que ya se conocía a muy bajas temperaturas, pero no se había detectado a temperatura ambiente. Este es un descubrimiento que podría ser el comienzo de nuevas perspectivas tecnológicas.

Todos estamos conscientes de temas como el calentamiento global. Sabemos sobre la necesidad de desarrollar una eficiencia energética buscando nuevas alternativas. En eso la física puede ayudar. Hoy en día, una cantidad muy importante de la energía de nuestros dispositivos tecnológicos se pierde en forma de calor. Estas pérdidas de energía están relacionadas con el calor de Joule. Este fenómeno es un proceso irreversible por el cual parte de la energía cinética de los electrones que transitan por un conductor se transforma en calor debido a los constantes choques con los átomos del material. Hasta ahora, las pérdidas de energía por calor de Joule se han considerado como algo inevitable e intrínseco en todos los dispositivos electrónicos.

El calor es la energía cinética de átomos y partículas que vibran. Usualmente, el calor se propaga mediante un mecanismo de difusión, el cual consiste en un flujo de partículas que pasan de una región de alta concentración a otra de baja concentración hasta tener una distribución uniforme. El mecanismo de difusión puede pensarse, en términos simples, como la forma en que se propaga el agua. Cuando liberamos agua, esta se desparrama, es decir, se esparce sin orden y en diferentes direcciones.

Por desgracia, la difusión es un proceso bastante difícil de controlar y, por lo tanto, las estrategias para manipular el calor son bastante ineficaces. Es por esta razón que, hasta ahora, no se puede hacer mucho por mejorar la eficiencia energética para disminuir el calor que se pierde en los dispositivos electrónicos. Sin embargo, si existiera un nuevo paradigma, es decir, una nueva forma de conducción que no existe en la naturaleza que nos rodea, podríamos explorar otras alternativas de conducción de calor.

La idea general es explorar una nueva forma de propagación de energía térmica, que nunca se había considerado antes. Tomando en cuenta de que el calor que se genera en el régimen difusivo es difícil de controlar, de lo que se trata es de plantear la posibilidad de un régimen de generación de calor ondulatorio, en donde la temperatura varíe como una función periódica en el tiempo. Si el calor se transportara como una onda, dispondríamos de nuevas estrategias para manipular el calor debido a que las oscilaciones experimentan fenómenos de interferencia. Ahora bien, si el calor ondulatorio interacciona con una red periódica, podrían crearse fenómenos de interferencia que nos permitirían nuevas posibilidades para el control del flujo térmico. La electrónica ha avanzado mucho utilizando esta estrategia. Debido al control ondulatorio del electrón en redes periódicas tenemos dispositivos tecnológicos como computadoras y celulares.

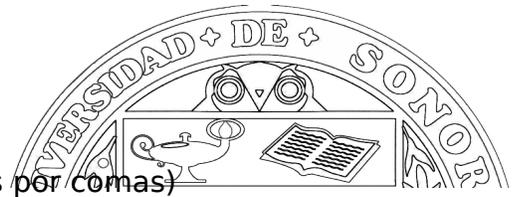
El control ondulatorio del calor nos permitiría la manipulación del calor en una forma más inteligente de lo que hacemos actualmente. Por ejemplo, los celulares se calientan de una forma indeseable. Ese calentamiento no es más que pérdida de energía y constituye un riesgo para los componentes si llega a existir un sobrecalentamiento. Si logramos encontrar la forma en que las fuentes de calor oscilen en el tiempo en una forma periódica, podríamos manipular ese calor aprovechando las propiedades de las ondas.

Estas ondas térmicas sin duda existen para muchos materiales, sin embargo, hasta ahora, solo se han detectado a temperatura ambiente para un solo material, el germanio. [1] El germanio es un semiconductor muy similar al silicio, el cual es el material más importante en la electrónica. Pero en el silicio, las ondas térmicas aún no se han detectado. Es emocionante pensar que, para los semiconductores, la exploración del control ondulatorio del calor apenas comienza.

## El segundo sonido

Es curioso cuando un mismo fenómeno tiene dos nombres. Al principio, cuando se estudiaron las ondas térmicas en materiales a muy bajas temperaturas, a este fenómeno se le llamaba segundo sonido. [2] Resulta muy interesante saber por qué se le llamaba así. El estudio de las vibraciones mecánicas de los materiales se realizaba en el contexto de la teoría de la elasticidad, en donde se sabía bien que existía propagación de vibraciones mecánicas de dos





EPISTEMUS Escriba los nombres de los autores (separados por comas)

tipos, longitudinales y transversales. Las vibraciones mecánicas longitudinales también existen en el aire a temperatura ambiente y a eso le llamamos sonido.

Sorprendentemente, bajo ciertas circunstancias, en los sólidos a bajas temperaturas no solamente existe propagación de vibraciones mecánicas longitudinales y transversales, sino que hay evidencia de una forma adicional de otra vibración mecánica. Esta vibración tiene una velocidad de propagación mucho más lenta, por lo cual es claro de que es de una naturaleza diferente. A eso se le dio el nombre de segundo sonido. En algún momento después, se descubrió que esta vibración mecánica es en realidad la temperatura, por lo cual se le comenzó a llamar onda térmica. Resulta curioso darse cuenta de cómo el experimento nos hace ver que la temperatura es una variable de estado que nos da una medida de las vibraciones mecánicas colectivas.

## El transporte de calor más allá de la teoría de Fourier

Es muy instructivo el planteamiento de las ondas térmicas en términos de ecuaciones. Esperamos que la presente sección logre expresar el origen de las ondas térmicas de una forma sencilla. En el estudio del calor, la ley de Fourier es una de las leyes de la Física que más cotidianamente interacciona con nosotros en nuestra vida diaria. Por ejemplo, todos los sistemas de conducción de calor en los procesos industriales se diseñan con la ayuda de esta fórmula clásica. Esta ley es una ecuación empírica, es decir, que se obtiene gracias a una observación experimental, o sea no se deduce de una forma teórica. La ley de Fourier en una dimensión expresa que el flujo de calor  $[q(x,t)]$  es proporcional al gradiente de temperatura  $[T(x,t)]$  en la forma

$$q(x,t) = -k \frac{\partial}{\partial x} T(x,t), \quad (1)$$

donde  $k$  es la conductividad térmica. Esta ecuación implica que cuando se aplica un gradiente de temperatura, el correspondiente flujo de calor se establece instantáneamente, es decir, no existe tiempo de retardo entre causa y efecto. [3] En los materiales donde se cumple la ecuación (1) les llamaremos materiales Fourier.

En el caso de materiales biológicos, materiales a bajas temperaturas y también en sistemas muy pequeños del orden de nanómetros, se ha encontrado experimentalmente que la ley de Fourier no se cumple. [3,4] La ecuación diferencial que define el flujo de calor requiere la introducción de un tiempo de  $\tau$  de retardo de la forma

$$q(x, t + \tau) = -k \frac{\partial}{\partial x} T(x, t) \quad (2)$$

Esta ecuación asume que una vez que se establece un gradiente de temperatura, el flujo de calor ocurre con un tiempo de desfase temporal. [3] En los materiales en que se cumpla la ecuación diferencial (2) les llamaremos materiales no-Fourier. Es conveniente desarrollar el lado izquierdo de la ecuación (2) en términos de una serie de Taylor a primer orden para obtener

$$q(x, t) + \tau \frac{\partial}{\partial t} q(x, t) = -k \frac{\partial}{\partial x} T(x, t) \quad (3)$$

La ecuación (1) implica que los procesos microscópicos de propagación de calor son rápidos, como ocurre en los metales. La ecuación (2), por su parte, describe el caso en donde el establecimiento del flujo implica un tiempo de retardo, como es el caso por ejemplo de materiales biológicos.

Para los materiales Fourier y no-Fourier, la conservación de la energía se escribe en ambos casos de la forma

$$\frac{\partial}{\partial x} q(x, t) = -\rho c_p \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) \quad (4)$$

donde  $\rho$  y  $c_p$  son la densidad y capacidad calorífica, respectivamente. Para los materiales de Fourier, combinamos las ecuaciones (1) y (4) para obtener la ecuación de calor de la forma

$$\frac{\partial}{\partial t} T(x, t) = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, t) \quad (5)$$

donde  $D = k / (\rho c_p)$  es la difusividad térmica. La ecuación (5) nos define una ecuación de difusión de calor, la cual tiene soluciones oscilantes altamente amortiguadas.

Para el caso de materiales no-Fourier combinamos las ecuaciones (3) y (4) para obtener una ecuación de calor modificada que se conoce como de Cattaneo-Vernotte [4] y que se escribe de la forma

$$\frac{\partial}{\partial t} T(x, t) + \tau \frac{\partial^2}{\partial t^2} T(x, t) = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, t). \quad (6)$$

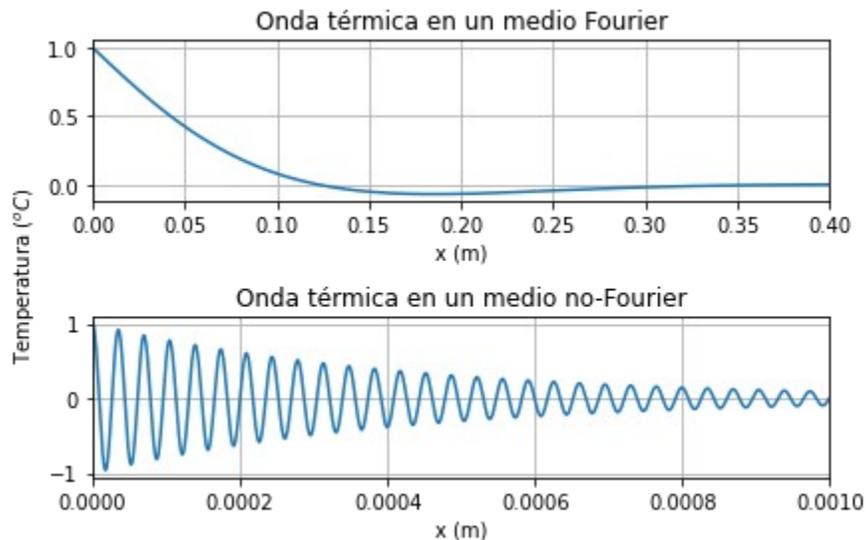


Esta es una ecuación de onda que tiene soluciones propagantes.

Las ondas térmicas pueden existir tanto para los materiales de Fourier o no-Fourier definidos por las ecuaciones (4) y (5), respectivamente. En ambos casos, las ondas de temperatura son el resultado de tener como condición de frontera una temperatura oscilante de la forma

$$T(t) = T_o \text{sen}(\omega t), \quad (7)$$

En la Fig. 1 mostramos la amplitud de la temperatura como una función de la posición. Se asume que en  $x=0$  tenemos una fuente de temperatura oscilante como se indica en la ecuación (7). En el panel superior tenemos una oscilación típica para un medio de Fourier, en particular hemos usado los parámetros del aluminio.[5] Se observa que la amplitud es altamente atenuada. En el panel inferior, tenemos una oscilación típica para un medio no-Fourier, en particular hemos usado los parámetros de la dermis de la piel humana.[4] Observamos como la onda aunque es atenuada de una forma considerable, se observan múltiples oscilaciones.



**Fig. 1 Oscilacion de temperatura como una función de la posición para un medio Fourier y no-Fourier.**

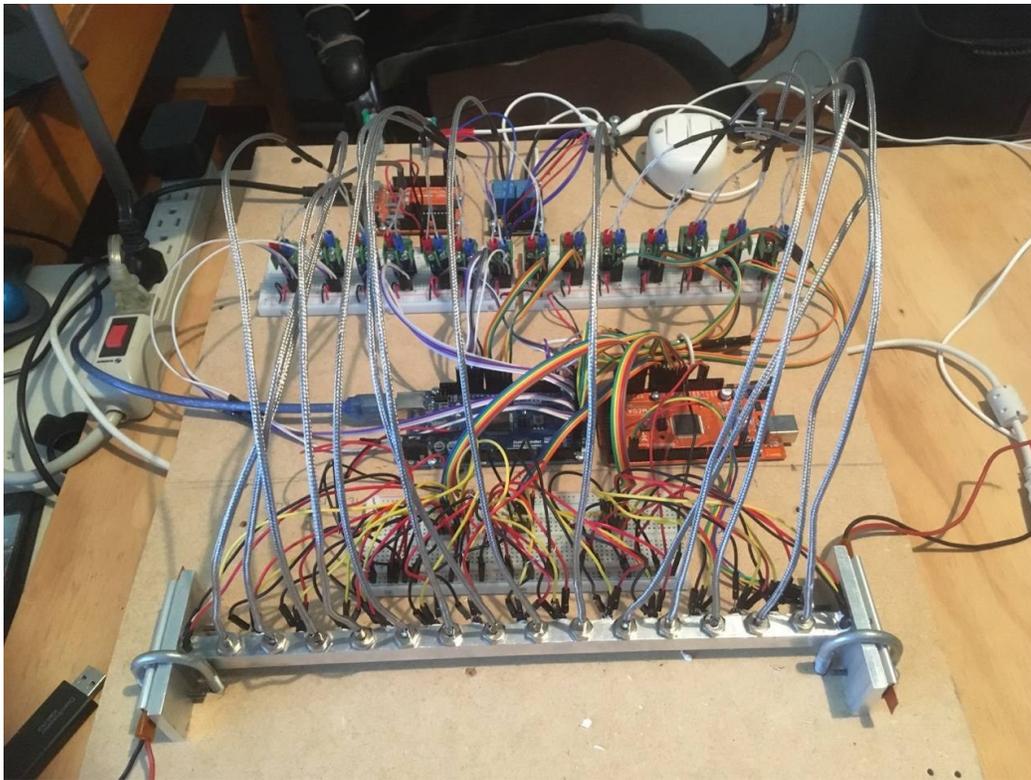
Es pertinente comentar que A. Salazar en la Ref. [5] menciona que es incorrecto el término “onda térmica”. El argumento se basa en la supuesta necesidad de que una onda debe de transportar energía. Por ejemplo, una onda electromagnética transporta energía ya que el promedio temporal del vector de Poynting es diferente de cero, si consideramos dieléctricos

comunes. Sin embargo, la oscilación de temperatura no transporta energía debido a que el promedio temporal del flujo es cero. En lo personal no consideramos que exista ningún problema con el termino de onda térmica. Por un lado, el termino onda térmica es muy usado en la literatura. Por otro lado, si tomamos la definición de la Real Academia Española, una onda se define como: “Una perturbación periódica que consiste en una serie de oscilaciones que se propagan a través de un medio”. Es decir, en nuestro diccionario la definición de onda no incluye como condición el transporte de energía.

## La detección de ondas térmicas

En la gran mayoría de los materiales con los que interaccionamos en nuestra vida diaria son materiales de Fourier, es decir, se cumple la ecuación (4). Para este caso en el calor se propaga como un mecanismo de difusión. Existen varios artículos en donde se reportan experimentos didácticos para la detección de ondas térmicas. [5,6,7] Nosotros nos inspiramos en estos artículos para hacer nuestra versión del experimento usando Arduino. En la Fig. 2 mostramos un experimento que hemos realizado para obtener en el laboratorio ondas térmicas en una barra cuadrada de aluminio. En nuestro experimento utilizamos tarjetas Arduino para la automatización del calentamiento de la fuente y también para la detección simultanea de los sensores de temperatura. Es importante hacer notar que este diseño experimental es completamente original y nos ha servido como un aprendizaje en instrumentación electrónica. El trabajo experimental es desarrollado en el laboratorio de ondas térmicas del Departamento de Física de la Universidad de Sonora. El costo de los experimentos con Arduino es relativamente económico y la precisión de las medidas es adecuada a las necesidades que implican este tipo de experimentos.

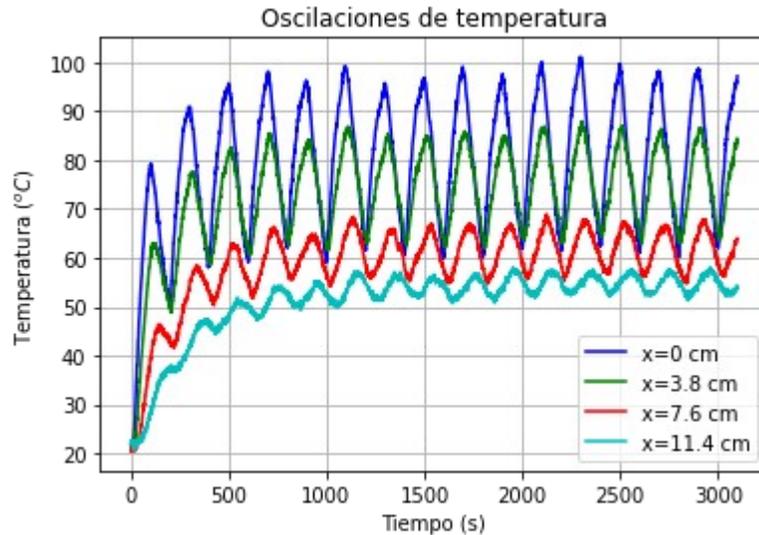




**Fig. 2 Montaje experimental para la detección de ondas térmicas. El calentamiento de la fuente y los sensores son controlados en forma automática utilizando tarjetas Arduino.**

En la Fig. 3 mostramos un resultado experimental típico del análisis de las ondas térmicas en una barra. Se muestran en colores azul, verde, rojo y cian las temperatura que miden sensores ubicados en las posiciones  $x=0$ ,  $x=3.8$  cm,  $x=7.6$  cm y  $x=11.4$  cm, respectivamente. En

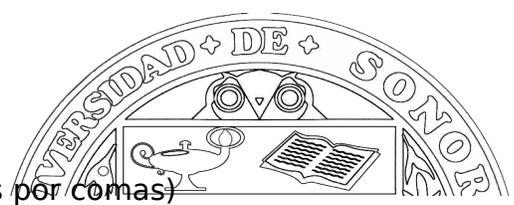
cada caso, se observa que la temperatura es una función oscilante como una función del tiempo.



**Fig. 3 Oscilación de la temperatura como función del tiempo. Los diferentes colores indican los datos experimentales de sensores de temperatura ubicados a diferentes posiciones.**

Para el caso de materiales no-Fourier que se describen mediante la ecuación (5), la detección experimental es mucho más difícil. En la década de 1960, las oscilaciones de temperatura fueron detectadas para temperaturas criogénicas en materiales tales como He, Na o Bi.[2] A partir del año 2000, las oscilaciones de temperatura fueron medidas en materiales biológicos, en particular en ciertos tejidos musculares y en la piel.[2] Mas recientemente, las ondas térmicas fueron detectadas en grafito, a una temperatura de 200 K.[6] El descubrimiento de ondas térmicas a temperatura ambiente en el 2021 en germanio fue posible gracias al estudio de la respuesta térmica del germanio bajo el efecto de un láser, el cual produce fluctuaciones de temperatura de alta frecuencia.[1] Los experimentos demostraron que contrariamente a lo que se creía, el calor no se disipaba por difusión, sino que se propaga en el





EPISTEMUS Escriba los nombres de los autores (separados por comas)

material como una onda térmica. Esta observación es muy estimulante ya que existe la posibilidad de que las ondas térmicas existan en otros materiales a temperatura ambiente

## Los cristales de ondas térmicas

La manipulación de ondas es un eterno problema en física. La misma existencia de la electrónica es gracias a la existencia de bandas de energía que surgen de la interferencia de los electrones con la red de átomos. En las últimas tres décadas ha sido muy notable el entendimiento de ondas en medios periódicos, tanto en el control de la luz en cristales fotónicos [2] como de las vibraciones mecánicas en cristales fonónicos. [5] Ahora bien, dado que la ecuación de calor (5) describe un comportamiento ondulatorio, en el 2018 fue propuesta la existencia de una nueva estructura cristalina que bautizaron con el nombre de “cristales de ondas térmicas”. [4] Estos cristales pueden controlar las ondas de calor en forma análoga a la cual se controlan la luz en cristales fotónicos y el sonido en cristales fonónicos. [2,4] Se espera que estos cristales de ondas térmicas sean capaces de tener muchas aplicaciones manipulando las ondas de calor, en especial en el aislamiento térmico o reducción de calor.

## Nuestros resultados en el tema de ondas térmicas

Nuestra investigación de ondas térmicas se desarrolla bajo el proyecto de Conacyt de Ciencia de Frontera 2019 que lleva por título “Reducción de calor en cristales fonónicos”. Hasta el momento hemos publicado tres artículos de investigación y los describimos brevemente. El primer artículo, está relacionado con la creación de un espejo omnidireccional de calor basado en un termocristal. [7] En este cálculo se resuelven las bandas de energía considerando la ecuación de onda elástica. Debido a que los gaps de las vibraciones mecánicas se encuentran en el rango de los Thz, se considera que de esta manera existe un control del calor ya que la radiación térmica se mide en este rango de frecuencia.

En el segundo artículo, analizamos la existencia del ángulo de Brewster para el caso de ondas térmicas de difusión. [8] Es interesante mencionar que la existencia del ángulo de Brewster es un tema que típicamente se menciona en los libros de texto, cuando se analizan las ondas electromagnéticas. Sin embargo, para el caso de las ondas térmicas de difusión la existencia de

este ángulo no había sido planteado. Nosotros obtuvimos una fórmula analítica que define la existencia de este ángulo, la cual fue obtenida aplicando las condiciones de frontera para la continuidad de la temperatura y el flujo a través de una interfase.

Finalmente, en un tercer artículo introducimos la idea de que es posible obtener gaps gigantes para los cristales de ondas térmicas mediante el uso de heteroestructuras. La idea es superponer los gaps de energía de diferentes cristales de ondas térmicas para así obtener un gap gigante. Mostramos que esta idea es particularmente importante para el caso para materiales semiconductores tales como germanio y silicio, los cuales muestran un gap muy pequeño. Cabe mencionar que en este momento en este proyecto se realizan una tesis de licenciatura y dos tesis doctorales.

## Conclusiones

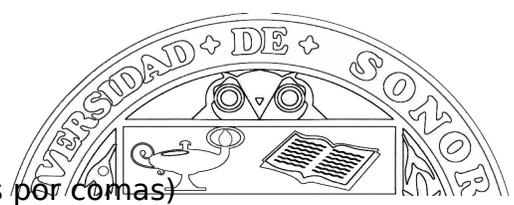
El comportamiento ondulatorio de la temperatura es un fenómeno que seguramente será muy explorado en los próximos años. Por primera vez, estamos ante la posibilidad de que, a temperatura ambiente, el calor no se propague como una difusión, sino como una onda. Este comportamiento ondulatorio abre la posibilidad de moldear el flujo de calor en estructuras artificiales de formas que muy probablemente nunca antes ha existido en la naturaleza. Las posibilidades tecnológicas son enormes, por ejemplo, si pensamos en la posibilidad de tener un nuevo tipo de aislantes, o bien, lograr guiar o localizar energía en forma de calor. Invitamos a los estudiantes que se interesen en estos temas a contactarnos para realizar tesis o estancias de investigación.

## Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el proyecto CONACYT-373391.

## Referencias





EPISTEMUS Escriba los nombres de los autores (separados por comas)

- [1] A. Beardo, M. Lopez-Suarez, L. A. Perez, L. Sendra, M. I. Alonso, C. Melis, J. Bafaluy, J. Camacho, L. Colombo, R. Rurali, F. X. Alvarez, J. S. Reparaz, "Observation of second sound in a rapidly varying temperature field in Ge." *Science advances*, Vol 7, pp. 4677, Junio 2021
- [2] M. Chester, "Second sound in solids". *Physical Review*, vol. 131, pp. 2013, Junio 1963.
- [3] A. Camacho de la Rosa y R. esquivel-Sirvent, "Causality in non-fourier heat conduction", *Journal of Physics Communications*, vol 6, 105003 (2022).
- [4] A. Chen, Z. Li, T. Ma, X. Li, Y. Wang, "Heat reduction by thermal wave crystals", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 121, pp. 215-222. Junio 2018.
- [5] A. Salazar, "Energy propagation of thermal waves", *Eur. J. Phys.* **27** 1349 (2006)
- [6] M. S. Anwar, J. Alam, M. Wasif, R. Ullah, S. Shamin, y W. Zia, "Fourier analysis of thermal diffusive waves". *American Journal of Physics*, vol. 82, no 10, p. 928-933. Abril 2014
- [7] Bodas, A., Gandia, V., & López-Baeza, E. (1998). An undergraduate experiment on the propagation of thermal waves. *American Journal of Physics*, 66(6), 528-533.
- [8] Marín, E., Jean-Baptiste, L. E., & Hernández, M. (2006). Teaching thermal wave physics with soils. *Revista mexicana de física E*, 52(1), 21-27.
- [9] Z. Ding, K. Chen, B. Song, J. Shin, A. Maznev, K. Nelson, y G. Chen, "Observation of second sound in graphite over 200 K". *Nature communications*, vol. 13, no 1, pp. 1-9. Febrero 2022.
- [10] J. Manzanares-Martinez, B. Manzanares-Martinez, "Omnidirectional THz Mirror on a One-Dimensional Porous Silicon Thermocrystal". *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, vol. 11, no 12, p. 1699-1705. Enero 2019.
- [11] C. A. Romero-Ramos, J. Manzanares Martinez, "Brewster angle of thermal diffusivity waves at an interface", *Results in Physics*, vol. 30, p. 104856. Marzo 2021
- [12] Morales-Morales, G., & Manzanares-Martinez, J. (2022). Enlargement of band gaps on thermal wave crystals by using heterostructures. *Results in Physics*, 106019.

**Cómo citar este artículo:**

a rellenar por la revista