

# EL DESCUBRIMIENTO TEÓRICO DE LAS TOPOLOGÍAS DE TRANSICIÓN DE FASES Y LAS TOPOLOGÍAS DE LAS FASES DE LA MATERIA



*The theoretical discoveries of topological phase transitions and topological phases of matter.*

JUVENAL CASTROMONTE SALINAS <sup>1</sup>

## RESUMEN

Los tres ganadores del Premio Nobel de Física 2016 emplearon conceptos matemáticos de topología para describir estados o fases de la materia que ahora permiten conocer los mecanismos de los superconductores, superfluidos y películas magnéticas delgadas.

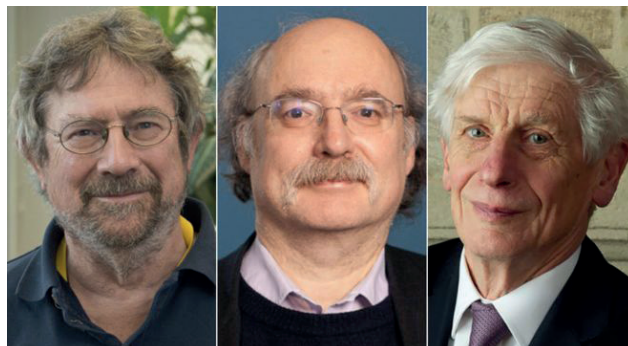
Palabras claves: Topología, fases, materia.

## ABSTRACT

*The three winners of the Nobel Prize in physics 2016 employed mathematical concepts of topology to describe states or phases of matter that now let us to learn about the mechanisms of superconductors and superfluids, thin magnetic films.*

*Keywords: Topology, phases, matter.*

El Premio Nobel de Física 2016 se confirió a Michael Kosterlitz, David Thouless y Duncan Haldane por el descubrimiento teórico de las topologías de transición de fases y las topologías de las fases de la materia. Detrás de esta formulación poco entendible para el público en general, incluso para los



De izq. A der.  
Michael Kosterlitz, Duncan Haldane y David Thouless

físicos, se tiene un mundo sorprendente de efectos físicos cuyos descubrimientos teóricos se hizo a partir del año 1970 hasta los años 1980s.

Explicar lo que significa la formulación y la importancia de los trabajos por las que se confirió el galardón del Nobel de Física del 2016 resultó ser una tarea nada fácil. Más aun, al tener en cuenta que no solo el fenómeno mismo es complejo sino que además tiene lugar en el mundo cuántico. En otras palabras, el premio se ha concedido a un conjunto

<sup>1</sup> Ph.D. Departamento de Ciencias Exactas, Facultad de Ciencias y Filosofía, Universidad Peruana Cayetano Heredia.

de trabajos pioneros que han estimulado el desarrollo de una nueva orientación en la física de la materia condensada. Hasta aquí, ya hemos usado diferentes términos poco conocidos por quienes no se dedican a la física de manera profesional. Por esta razón, trataremos de explicar lo que significa cada uno de las palabras o frases utilizadas, tales como *topología de la transición de fases*, con la ayuda un ejemplo, aunque esta forma solo nos permitirá abarcar parte del concepto global del premio. La parte restante requiere de mayor explicación y el uso de otros conceptos necesarios para su entendimiento por el público en general.

Empezaremos tratando de explicar lo que se entiende por materia condensada que, en términos cotidianos, podría considerarse que es un conjunto de muchas partículas del mismo tipo que tienen una fuerte interacción entre sí. Es importante entender aquí que el conjunto de partículas y las leyes que gobiernan sus interacciones son de un mismo tipo. También, se entiende que el concepto permite tener diferentes átomos, pero este grupo de átomos es fijo y se repite indefinidamente, siendo requisito necesario tener un número infinito de partículas juntas.

La física de la materia condensada permite conocer una variedad de efectos colectivos que no pueden ser explicados por partículas individuales, pero sí por un gran número de partículas juntas y del mismo tipo. Es decir, estudia el comportamiento colectivo de sistemas formados por un número infinito de partículas y sus efectos.

El Premio Nobel de este año resalta el trabajo teórico al referirse a la forma de cómo interactúa la materia condensada al introducir el concepto de *perturbaciones topológicas*. A la fecha se conocen muchos sistemas físicos concretos donde se han encontrado este tipo de perturbaciones. Lo

resaltante de esto no son los ejemplos que se puedan dar sino el hecho de que este fenómeno existe en la naturaleza.

Inicialmente, muchos de los fenómenos topológicos en la materia condensada eran solo propuestas teóricas que más parecían un artificio matemático sin relación alguna a la realidad. Posteriormente, los experimentadores descubrieron materia condensada donde se podía observar estos fenómenos, convirtiendo al “artificio” matemático en una nueva clase de materiales con propiedades exóticas y muy prometedoras.

### Perturbaciones topológicas

El término *topología* para muchos puede parecer matemática pura ya que existe la ciencia sobre las figuras geométricas que pueden ser deformadas de manera continua, modificando la figura misma. Pero, la figura, a pesar de su cambio, mantiene ciertas características que se conocen como las características topológicas. Por ejemplo, para objetos tridimensionales, una característica importante es el número de agujeros que tiene, donde todos los objetos tridimensionales tienen un agujero y son topológicamente equivalentes. Fig. 1.

En resumen, dos figuras geométricas que por deformación continua pueden transformarse la una en la otra se dicen que son topológicamente equivalentes, caso contrario se dice que son topológicamente diferentes.

El otro término es *perturbación* (fonón). En la física de materia condensada, se entiende por *perturbación* a cualquier desviación colectiva

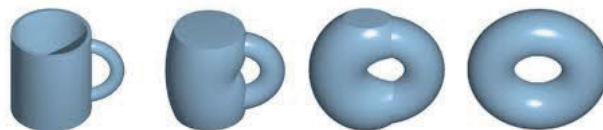


Fig. 1 Figuras topológicamente equivalentes.

de su estado base (estado de menor energía posible). Por ejemplo, si se golpea en un sector de un cristal, por él viajará una onda sonora (oscilación de perturbación a la red del cristal). Como la temperatura normal no es nula, el cristal no necesita ser golpeada para ser perturbada; se tendrá movimiento (oscilación) térmico del cristal, que no es otra cosa que perturbación de la red cristalina. Cuando la concentración de las perturbaciones es grande, tiene lugar una transición de fase, el cristal se “funde”. En cuanto se identifican las perturbaciones se hace posible describir el comportamiento de esta materia condensada, obteniéndose la clave para conocer sus propiedades termodinámicas.

El término *onda sonora* representa un ejemplo trivial de perturbación topológica. En física, esto significa que al sonido se le puede hacer lo «silencioso» que se desee, incluso hasta hacerlo imperceptible. Aquí, la amplitud de la oscilación se puede disminuir de manera continua hasta hacerla casi nula, más exactamente hasta el límite cuántico, aunque esto no es lo más importante; pero, en cualquier situación sigue siendo una perturbación sonora. Esto significa que la perturbación (el fonón) es una trivial perturbación topológica.

En algunos sistemas de materia condensada se tienen perturbaciones cuyas amplitudes no pueden ser disminuidas de manera continua hasta hacerlas nula. La razón es que su forma no lo permite. Esto significa que no se puede encontrar una operación que de manera continua traslade al sistema perturbado al estado base o de menor energía posible.

Para ilustrar, se tiene el sistema de la figura (modelo XY), que es una red cristalina cuadrada, en cuyos vértices se tienen partículas con espín, que pueden estar orientados de cualquier manera en el plano. Los espines se representan por flechas, cuya longitud es fija, pero de

orientación arbitraria. También se considera que los espines de partículas vecinas interactúan entre sí, de manera que la configuración con el menor “gasto” de energía es aquella cuando los espines de todos los vértices tienen la misma orientación, como es el caso de los ferromagnéticos. A través de esta configuración pueden viajar ondas, que no son otra cosa que pequeñas desviaciones de los espines del orden inicial (trivial perturbación topológica). Fig. 2.

Las perturbaciones pueden ser de tipo rotacional o antirrotacional. En la Fig. 3 que se tiene se puede explicar lo mencionado. Elija mentalmente un punto al azar de la figura y con la mirada gire circularmente en sentido antihorario y observe lo que sucede con las flechas (espines). Verá que las “flechas” rotacionales giran en sentido antihorario y los antirrotacionales en dirección horaria. Si repite lo mismo en el estado básico no verá ningún movimiento pero en las perturbaciones ligeras observará un pequeño movimiento ondulatorio.

Así, podemos decir que todas las perturbaciones posibles se pueden diferenciar en clases, y cada uno de ellos tiene topología diferente. Esta última afirmación es importante, la topología rotacional se diferencia de una onda común, mientras que la antirrotacional solo se diferenciará de una onda cuando el cristal se encuentre en un plano. Pero si es posible que las flechas del espín sean tridimensionales,

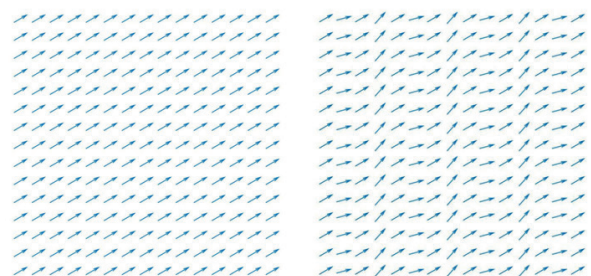


Fig. 2. A la izquierda: Estado base de una red cristalina, cuyos espines interactúan entre sí. A la derecha: onda viajando a través de la red cristalina. (<http://www.ribbonfarm.com>).

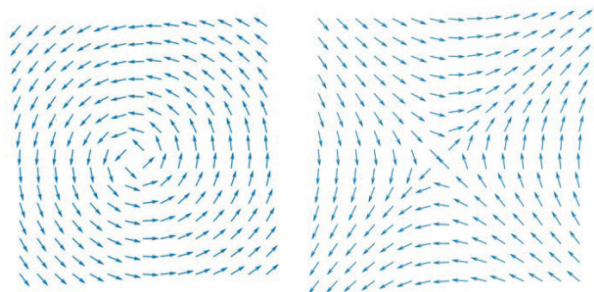


Fig. 3. A la izquierda: Estado base de una red cristalina, cuyos espines interactúan entre sí. A la derecha: onda viajando a través de la red cristalina. (<http://www.ribbonfarm.com>).

entonces la rotación puede ser eliminada de manera continua. La clasificación topológica de las perturbaciones depende de la dimensión del sistema.

### Topología de la transición de fases

Ahora resulta que el razonamiento anterior, meramente geométrico, tiene consecuencias físicas. La energía de la perturbación de una oscilación común puede hacerse lo pequeño que se desee. Por esta razón, a temperaturas muy bajas (cercasas al cero absoluto) aparecen, de manera espontánea, oscilaciones que finalmente modifican las propiedades termodinámicas del medio, mientras que la energía topológica de una perturbación rotacional no sea menor a cierto límite. Por esta razón, a temperaturas muy bajas no existen perturbaciones rotacionales, por lo que bajo estas condiciones el sistema mantiene sus propiedades termodinámicas.

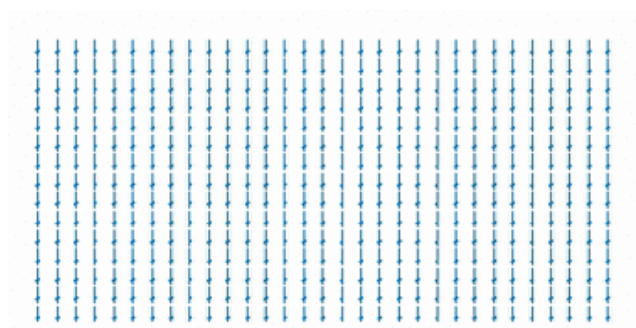


Fig. 4. Generación y aniquilación del par rotacional-antirrotacional (<http://www.ribbonfarm.com>).

En 1972, Kosterlitz y Thouless llegaron a entender que para generar una sola rotación o antirrotación se necesita demasiado gasto de energía, mientras que la energía de un par de perturbaciones ligadas es bastante pequeña. A temperaturas finitas este tipo de par se genera de manera local por variación continua, proceso que se ilustra en la Fig. 4 (en el enlace puede apreciar la animación). Son estos, precisamente, los responsables de la “destrucción” de fases a bajas temperaturas para el caso bidimensional.

Tan pronto como fue entendido el origen topológico de la transición de fases en el modelo XY y tan pronto como la física entendió la importancia de las perturbaciones topológicas, empezaron aparecer otros sistemas físicos que resultaron muy fáciles de explicar en el lenguaje de la topología. Muchos de ellos son de carácter estrictamente cuántico; por ejemplo, superconductividad del helio en películas delgadas, capas laminares de superconductores, magnetismo en materiales laminares, diversas manifestaciones cuánticas del efecto Hall y muchas otras. Todos ellos se han hecho realidad en el experimento, incluso alguno de ellos en estos últimos años.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2016/popular-physicsprize2016.pdf](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/popular-physicsprize2016.pdf)
2. [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2016/advanced-physicsprize2016.pdf](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/advanced-physicsprize2016.pdf)
3. <http://www.ribbonfarm.com/2015/09/24/samuel-becketts-guide-to-particles-and-antiparticles/>

### CORRESPONDENCIA:

Dr. Juvenal Castromonte Salinas, e-mail: [juvenal.castromonte@upch.pe](mailto:juvenal.castromonte@upch.pe)