

## SEMBLANZAS DE LOS PREMIOS NOBEL 2016

### EN FÍSICA

La física fundamental es la que se hace las preguntas más básicas sobre el funcionamiento de la Naturaleza. Lejos de ser un bloque monolítico de conocimiento, consta de varias grandes rutas que a veces se entrelazan. Una es la búsqueda de los componentes fundamentales: las partículas elementales, la materia oscura, el universo primigenio... La otra es la búsqueda de los mecanismos fundamentales que la Naturaleza aplica una y otra vez, a todas las escalas, ya sea subatómica, macroscópica o cosmológica. El premio Nobel de 2016, entregado a Michael Kosterlitz, Duncan Haldane y David Thouless, ha servido para reconocer uno de los grandes episodios en el avance a través de esta segunda ruta: el descubrimiento de las fases topológicas [2].

Cuando pensamos en fases de la materia solemos recordar la diferencia entre el hielo y el agua. Debemos comenzar esta discusión con un pequeño salto de nivel

de abstracción: todo objeto extenso puede estar en diferentes fases, dependiendo de cuál sea la relación entre sus partes. El hielo se diferencia del agua en que las moléculas forman una estructura cristalina. La transición de fase entre el agua líquida y el hielo es la congelación. Pero podemos extender el concepto a sistemas muy diferentes. Por ejemplo, el universo pasó de ser opaco a transparente cuando tenía 380.000 años de vida. Un trozo de hierro puede pasar de estar magnetizado a no estarlo. Y la misma noción puede aplicarse a una sociedad que experimenta una revolución. Como vemos, la noción se aplica a todas las escalas. Es un mecanismo básico de la Naturaleza.

La noción de transición de fase era bien conocida antes de la historia que vamos a narrar. La narrativa giraba en torno a un concepto clave: el de “parámetro de orden”: las fases se pueden distinguir mediante observaciones locales, realizadas en un solo punto. Por ejemplo, si observamos un trozo de hielo al microscopio veremos que la estructura cristalina deja huecos. Es por ello que el hielo flota sobre el agua. El parámetro de orden que distingue las dos fases, entonces, puede ser la densidad. La regla local para distinguir el hielo del agua puede ser



*J. Michael Kosterlitz (Aberdeen, Reino Unido, 1943), doctor por la Universidad de Oxford (Reino Unido). En la actualidad es profesor en la Universidad Brown (Rhode Island, EE.UU.).*

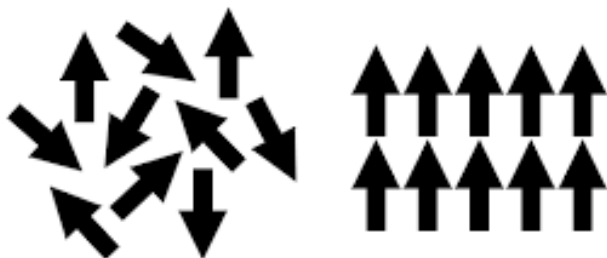


*F. Duncan M. Haldane (Londres, Reino Unido, 1951), doctor por la Universidad de Edimburgo (Reino Unido). Es profesor de la Universidad de Princeton (Nueva Jersey, EE.UU.).*



*David J. Thouless (Bearsden, Reino Unido, 1934), doctor por la Universidad de Cornell (Nueva York, EE.UU.). Es profesor de la Universidad de Washington (EE.UU.).*

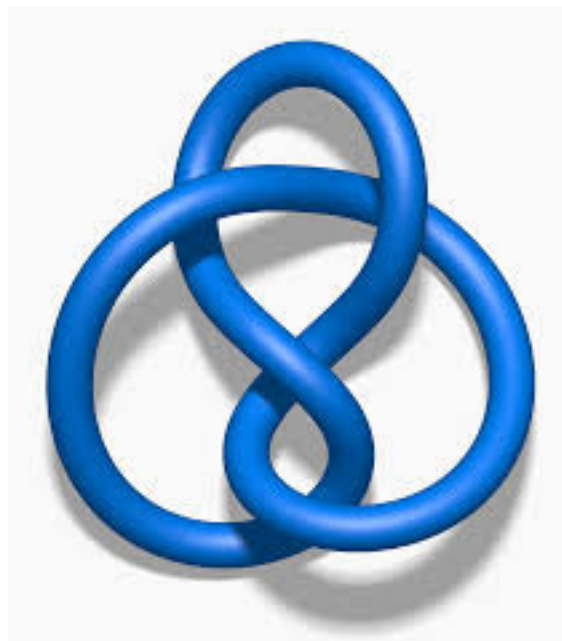
coger un volumen muy pequeño y contar cuántas moléculas hay. Asimismo, el hierro imantado y el no imantado se distinguen también localmente. Cada átomo genera un pequeño campo magnético, y cuando el hierro está imantado, los campos generados por los distintos átomos son paralelos y se refuerzan entre ellos. Una observación a muy pequeña escala nos puede dar esa información: si el átomo sobre el que estoy cambia de orientación de manera aleatoria no estoy sobre un imán. Por tanto, una hormiguita microscópica viviendo sobre el material puede averiguar en qué fase se encuentra.



Pero la Naturaleza es más sutil. En ocasiones nos proporciona sistemas que pueden estar en distintas fases, pero carecen de parámetro de orden. En otras palabras: la hormiguita no puede averiguar cuál es la fase haciendo tan sólo medidas locales. Deberá comunicarse con otras hormiguitas que vivan lejos para averiguarlo. Por tanto, la fase tiene naturaleza “global”. ¿Cómo puede ocurrir esto?

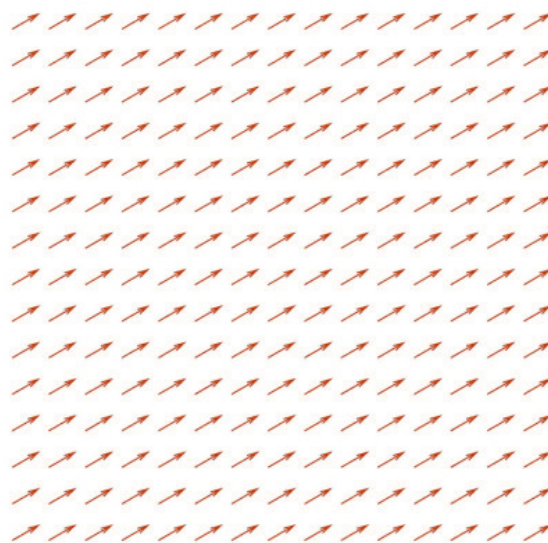
Pongamos un ejemplo. Imaginad una hormiguita caminando por una cuerda con los extremos pegados, que flota en el espacio. Por muchas vueltas que dé, mientras sólo observe la cuerda que queda a sus pies jamás sabrá si la cuerda está anudada o no. Es decir, si se puede o no se puede poner sobre una mesa en forma de circunferencia. Necesitaría la cooperación de muchas más hormiguitas repartidas por toda la cuerda para tener esa información. Para pasar del estado anudado al estado no-anudado de la cuerda, la hormiguita tendría que cortar y volver a pegarla, cosa que requiere más energía de la que la dispone la hormiguita promedio. Por eso podemos decir que constituyen fases diferentes de la cuerda. Y añadimos que estas fases gozan de “estabilidad topológica”.

La topología es una parte de las matemáticas que, cuando la explicamos los físicos, decimos que estudia los “objetos de goma”. Con eso queremos decir que es lícito estirar y deformar los objetos, pero no cortar o pegar. La

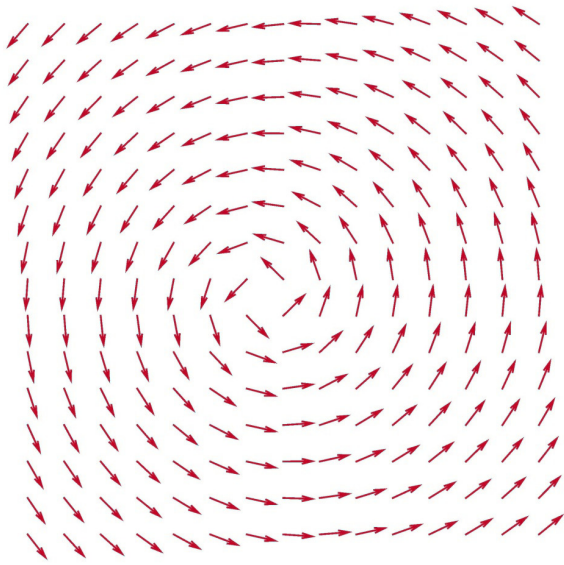


técnica para averiguar qué es un nudo genuino y qué no lo es uno de sus grandes éxitos.

Antes vimos la hormiguita sobre el hierro imantado. ¿Qué ocurriría si existieran imanes planos? Cada átomo tendría una flechita de la misma magnitud, y todas quedarían alineadas. En un alarde de originalidad, los físicos lo conocemos como “modelo XY”. Un estado posible de energía mínima sería con todas las flechitas apuntando en la misma dirección:

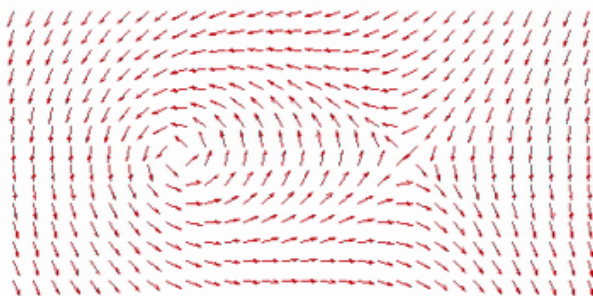


Ahora introduzcamos un defecto en el sistema: pongamos un “vórtice” en el centro. El sistema no está imantado, ya que los campos de los distintos átomos se anulan entre sí. Pero una hormiguita montada sobre un solo átomo no nos sabría decir en qué fase estamos.



Estos vórtices son extremadamente difíciles de crear o de destruir. Como cada átomo quiere estar paralelo a sus vecinos, tendríamos que separar una cantidad infinita de parejas temporalmente, para poder reunir las de nuevo después. Decimos que el vórtice es un “defecto topológico”. Cambiar entre fases topológicas implica “cortar y pegar” el sistema, operación que conlleva una enorme cantidad de energía.

De hecho, el sistema XY nunca se imanta en el sentido tradicional, salvo en el cero absoluto. En cuanto ponemos el sistema a temperatura finita, por pequeña que sea, aparecen vórtices por sí solos. Pero, me diréis: ¿no quedamos en que era carísimo crear o destruir vórtices? Lo es, si vamos de uno en uno. Pero es posible siempre crear una pareja vórtice-antivórtice, como en la figura:



A temperaturas bajas, el sistema crea estas parejas de “dipolos de vórtices” que se mantienen juntos. La imanación es nula, pero el sistema se mantiene ordenado. Pero a altas temperaturas, los vórtices y antivórtices se separan, se van a vivir su vida. Hemos cambiado de una

fase a otra, pasando por la llamada transición de Kosterlitz-Thouless (sí, dos de nuestros galardonados). Ambas fases están caracterizadas por el comportamiento de los defectos topológicos, y por ello decimos que se trata de una transición de fase topológica.

¿Qué sistema físico está descrito por el modelo XY? Ninguno y muchos. El modelo XY y la transición de Kosterlitz-Thouless son un “mecanismo básico” de la Naturaleza, que sirve para explicar desde fenómenos a escala subatómica hasta el comportamiento de cristales líquidos. Ningún sistema real es exactamente igual al XY, pero existen muchos sistemas reales cuya dinámica se puede caracterizar de esta forma.

Han salido ya los nombres de dos de los premiados: Kosterlitz y Thouless. ¿Qué hay de Duncan Haldane? Es algo más difícil de explicar, porque sus contribuciones más importantes fueron cuánticas. Recordad que un sistema cuántico puede estar en una superposición de muchos estados diferentes, y todos “son reales” simultáneamente. Pensemos en un sistema unidimensional, en el que cada átomo puede estar en tres estados, que llamaremos “+”, “0” y “-”. Es lo que se conoce como una cadena de “spin 1”. Supongamos un sistema en el que cada átomo desee estar en el mismo estado que sus vecinos, pero en el que la incertidumbre cuántica induce fluctuaciones que recuerdan un poco a la temperatura. Haldane mostró que los átomos forman una fase ordenada, pero que ninguna hormiguita local sería capaz de encontrar. La llamada fase de Haldane consiste en la siguiente regla: puedes tener tantos “0” como quieras, pero cada “+” siempre es seguido por un “-”. Veamos un ejemplo:

+0000000000000000-00+0-+-+00000-000000+

En realidad, ¡el sistema estaría en una superposición de todos los estados de esa forma! Hay orden, pero es global, y romperlo cuesta una cantidad grande de energía.

El premio Nobel elige a unos protagonistas para ser premiados, pero el desarrollo de la idea de fase topológica se debe a centenares de físicos y ha sido aplicada a lo largo de cuarenta años a distintas áreas. Las ideas actuales de aislante topológico y computación cuántica son herederas naturales de estas ideas básicas.

Merece la pena recordar que Kosterlitz, Thouless y Haldane son de origen británico, pero se vieron obligados a abandonar el Reino Unido a lo largo de los años 80 debido a la política de restricción de la inversión

pública en investigación [3]. Duncan Haldane, que ha visitado España en varias ocasiones, ha mostrado públicamente su preocupación por la situación de la ciencia británica tras el brexit [4].

## REFERENCIAS

- [1] Referencias generales sobre la física descrita: <http://www.madrimasd.org/blogs/fisicateorica/2016/10/27/321>, <http://www.ribbonfarm.com/2015/09/24/samuel-becketts-guide-to-particles-and-antiparticles>, <https://johncarlosbaez.wordpress.com/2016/10/07/kosterlitz-thouless-transition>.
- [2] <https://www.theguardian.com/science/life-and-physiscs/2016/oct/09/fundamental-physics-comes-in-various-flavours>.
- [3] <https://www.theguardian.com/science/2016/oct/04/david-thouless-duncan-haldane-and-michael-kosterlitz-win-nobel-prize-in-physics>.
- [4] <https://www.theguardian.com/science/2016/oct/06/brexit-not-good-news-for-british-science-warn-new-nobel-laureates>.

Javier Rodríguez Laguna  
*Dpto. de Física Fundamental*