

# Física de bajas temperaturas: superconductividad y superfluidez

Iñigo González de Arrieta\*

18 de febrero de 2015

## Resumen

En este artículo se pretende exponer brevemente los aspectos más relevantes del comportamiento de la materia a temperaturas por debajo de los 77 K, así como una de las tecnologías que permiten alcanzar temperaturas del orden del nanokelvin.

## 1. Introducción

Las temperaturas con las que convive el ser humano son, en realidad, temperaturas muy altas para los estándares de la Naturaleza. La temperatura ambiente corresponde a una energía térmica  $k_B T$  del orden de 0,01 eV, una energía nada despreciable desde el punto de vista microscópico. De hecho, la principal razón de que la mecánica clásica sea intuitiva para los humanos es que las temperaturas a las que se da la vida son tan altas que las fluctuaciones térmicas son suficientes para enmascarar gran parte de los fenómenos cuánticos de la materia.

Por ello, y aunque la física de muy altas temperaturas (más de 5000 K) también presente fenómenos cuánticos (como la fusión nuclear en el corazón de las estrellas), la mayoría de efectos cuánticos macroscópicos de interés se manifiestan a temperaturas muy bajas. La definición estándar de baja temperatura en física experimental es toda aquella inferior al punto de licuación del nitrógeno, 77 K. No obstante, gran cantidad de fenómenos sólo son observables a temperaturas mucho menores.

En este artículo, presentaremos brevemente dos fenómenos que se manifiestan en la materia fría: superconductividad y superfluidez. Así mismo, también describiremos la técnica más habitual para obtener temperaturas por debajo de los 77 K, e incluso muchos órdenes de magnitud inferiores.

## 2. Fundamento teórico: condensados de Bose-Einstein

Todas las partículas existentes, sean elementales o no, se clasifican en fermiones (spin semientero) y bosones (spin entero). Por el teorema spin-estadística, un conjunto de fermiones y un conjunto de bosones obedecen distintas distribuciones estadísticas: de Fermi-Dirac o de Bose-Einstein.

---

\*Iñigo González de Arrieta es estudiante de cuarto curso del Grado en Física de la UPV/EHU y miembro de la junta directiva de Zimatek.

La diferencia fundamental entre ambas distribuciones es que la de Fermi no permite que dos partículas tengan el mismo estado cuántico, mientras que la de Bose sí lo permite. Gran parte de las propiedades de los materiales vienen determinadas por la imposibilidad de que sus electrones (spin  $1/2$ ) ocupen el mismo estado, lo que hace que se distribuyan en bandas de energía.

No obstante, la estadística que nos interesa para explicar los dos fenómenos arriba indicados es la de Bose. Dicha distribución permite que dos bosones ocupen un mismo estado cuántico. En particular, permite que *todos* los bosones de un sistema ocupen *el mismo estado* (bajo ciertas condiciones). Cuando esto ocurre, se dice que el sistema se ha convertido en un *condensado de Bose-Einstein*. Dicha condensación bosónica se da por debajo de una temperatura crítica, que depende del sistema.

Cuando la temperatura es tan baja que todos los átomos están en el estado de menor energía, las propiedades cuánticas de dicho estado comienzan a manifestarse macroscópicamente. Al tener todas las partículas *exactamente* el mismo estado, no existe forma de distinguirlas: el sistema se comporta como una sola gigantesca partícula cuántica. Esto es exactamente lo que ocurre en los fenómenos de superconductividad y superfluidez, y en ambos casos se manifiestan propiedades cuánticas diferentes, pero muy relacionadas.

### 3. Ejemplos de condensados de Bose-Einstein

#### 3.1. Helio-4 superfluido

El helio-4 es un isótopo de helio con dos neutrones. Se trata del isótopo de helio más común en la Tierra con diferencia, debido a que es producido en la desintegración alfa. Al estar compuesto por dos electrones, dos protones y dos neutrones, todos fermiones de spin  $1/2$ , el spin total del átomo es necesariamente entero, por lo que un conjunto de átomos de He-4 viene descrito por la distribución de Bose.

A una temperatura crítica de 2,17 K, el He-4 líquido condensa en un estado de Bose-Einstein. Entonces, todos los átomos del líquido se mueven de forma absolutamente coherente, ya que están en el mismo estado, y desaparecen las colisiones entre partículas que daban lugar al fenómeno de la viscosidad. De esta forma, el He-4 superfrío tiene una viscosidad *idénticamente nula*.

La consecuencia más vistosa de esta característica absolutamente antiintuitiva es que el He-4 desborda cualquier recipiente abierto en el que se le coloque. Esto se debe a que, igual que el vino en una copa, el fluido tiende a subir por la pared debido a la capilaridad. No obstante, mientras que el vino sólo puede llegar hasta una cierta altura antes de frenarse y caer de nuevo a la copa, formando sus características lágrimas; el He-4 no experimenta ninguna resistencia a su ascensión por la pared del vaso. En el caso de hallarse en un recipiente cerrado, cubrirá la pared por completo de una fina capa de fluido, incluido el techo.

Otras propiedades del He-4 superfluido son la mayor conductividad térmica conocida, que permite la refrigeración de los megaimanes del LHC; y una altísima sensibilidad a los fotones, que permite crear chorros verticales constantes de superfluido tan sólo irradiándolo con luz (efecto fuente).

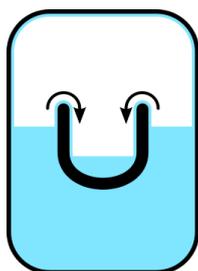


Figura 1: He-4 superfluido en un recipiente (fuente: Wikipedia).

### 3.2. Superconductores

La superconductividad es otro tipo de condensación de materia bosónica en la cual el sistema tiene una resistencia eléctrica idénticamente nula. Por tanto, cualquier corriente que se genere en el material se mantendrá de forma indefinida, siempre que se mantenga la temperatura por debajo de la temperatura crítica de condensación.

Se trata de un fenómeno bastante más complejo que la superfluidez, ya que dicho fenómeno se podía entender como el movimiento de un conjunto de bosones fríos. No obstante, la conducción eléctrica viene determinada por los electrones, que son fermiones de spin  $1/2$ . ¿Dónde aparece la distribución de Bose en los sólidos?

La teoría convencional de la superconductividad es la teoría BCS, que postula que, a temperaturas muy bajas, dos electrones pueden enlazarse y formar un *par de Cooper*, de spin entero. Dichos pares de Cooper, que son ya bosones, forman un *superfluido electrónico* que se mueve sin disipación de energía (como el He-4), lo que se traduce en una corriente sin resistencia.

Una forma de intentar visualizar esta atracción mutua entre dos cargas negativas, en el caso particular de un metal, es la siguiente:

Un metal está formado por una red periódica de iones y una nube de electrones débilmente ligados. Un electrón, al moverse, tiende a atraer débilmente a los iones de la red, concentrando instantáneamente una carga positiva a su alrededor, que atrae a su vez a otro electrón. Esta atracción indirecta electrón-electrón es más de diez veces menor que la energía de las fluctuaciones térmicas para temperatura ambiente, con lo que sólo se da de forma aislada y se rompe en picosegundos. No obstante, si la temperatura cae sustancialmente, las fluctuaciones ya son menos fuertes, y los electrones pueden vivir emparejados más tiempo. Al llegar a la temperatura crítica, los pares de Cooper se vuelven estables, y se da la superconductividad.

Es importante hacer notar que esta explicación sólo es útil para ganar una cierta intuición sobre la superconductividad, ya que los pares de Cooper son un fenómeno exclusivamente cuántico. Es más, ni siquiera esta explicación es válida para todos los superconductores, ya que hay algunos, denominados de *alta temperatura*, que presentan superconductividad a temperaturas sensiblemente más altas que las que predice la teoría BCS.

De hecho, existe una gran diversidad de propiedades entre los superconductores conocidos, tanto los convencionales como los anómalos. La única propiedad común a todos, además de la resistividad nula, es el *efecto Meissner*, que consiste en la

repulsión de los campos magnéticos del interior del sistema semiconductor. Este efecto es inexplicable partiendo sólo de una resistencia eléctrica nula, y es lo que permite definir la superconductividad como una fase termodinámica de la materia, y no simplemente un límite de resistencia muy baja. Es también el responsable de la *levitación superconductora*, cuando se coloca una muestra superconductora encima de un imán muy potente.

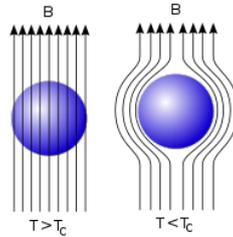


Figura 2: Campo magnético antes y después de la transición al estado superconductor (fuente: Wikipedia).

#### 4. Tecnología de criogenia: efecto magnetocalórico

Algunos materiales magnéticos exhiben un comportamiento termodinámico conocido como *efecto magnetocalórico*: se calientan al ser expuestos a un campo magnético externo, y se enfrían al retirarlo. Este efecto fue detectado por primera vez en 1917 por Weiss y Piccard, y su descubrimiento permitió el desarrollo de tecnologías de criogenia que llegaron hasta los 0.3 K. Hoy en día, esta tecnología está tan desarrollada que se ha llegado a medir, en una ocasión, el récord de  $10^{-10}$  K.

El fundamento básico de esta tecnología no es muy diferente del del refrigerador de Carnot, estudiado en cualquier curso básico de Termodinámica. Se trata de diseñar un ciclo en el cual, en vez de aumentar y reducir la presión sobre el sistema, se activa y desactiva (adiabáticamente) un campo magnético. Los pasos del ciclo son los siguientes:

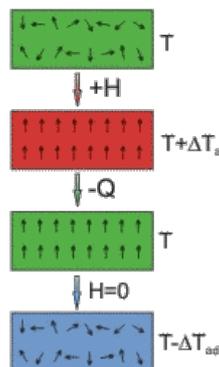


Figura 3: Ciclo de refrigeración magnética (fuente: Wikipedia).

- Al activar el campo adiabáticamente, los dominios magnéticos del material se alinean con él y la temperatura del material aumenta.
- Se retira el aislamiento y se deja que el sistema se enfríe libremente hasta su temperatura inicial  $T$ , pero ahora con los dominios alineados.
- Se vuelve a aislar el sistema y se retira el campo magnético. Así, los dominios se desordenan y el sistema se enfría por debajo de la  $T$  inicial.

De esta forma, el sistema magnético ha visto su temperatura reducida en una cantidad que dependerá de la intensidad de su efecto magnetocalórico. En los primeros años de la criogenia física, se empleaban diversas sales paramagnéticas, pero tenían el inconveniente de no poder llegar a temperaturas muy bajas, debido a que presentaban transiciones de fase a pocos K que las volvían inservibles.

Hoy en día, los materiales más usados son aleaciones de gadolinio, una tierra rara que es ferromagnética a temperaturas por debajo de la ambiente. Sin embargo, cada vez los experimentos requieren temperaturas más bajas, con lo que, aunque este método siga empleándose extensivamente en industria (para producir nitrógeno líquido, por ejemplo), ha sido sustituido por la *desmagnetización nuclear* en la investigación. Dicha tecnología, aunque siguiendo el mismo esquema, explota la capacidad de alineamiento de los espines nucleares del material, en vez de los dominios magnéticos multiatómicos.