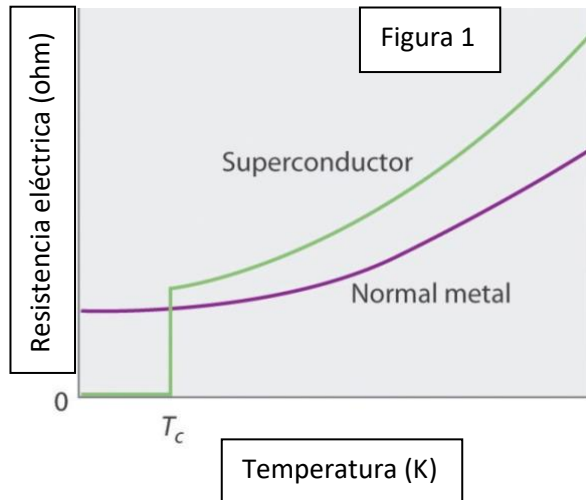


Superconductores y superfluidos:

Un material superconductor posee dos características principales:

- Resistencia eléctrica nula y no hay pérdida de energía (no hay efecto Joule).
- Efecto Meissner de expulsión del campo magnético.

En 1911 Kamerlingh Onnes y Giles Holst mientras estudiaban la resistividad eléctrica del mercurio, descubrieron que a la temperatura de 4,15 K, el mercurio perdía su resistencia eléctrica. Por encima de los 4,15 K la conductividad aumentaba lentamente al enfriar el metal, pero al llegar a esa temperatura crítica, la conductividad aumentaba súbitamente hasta. En otras palabras, la resistencia eléctrica del mercurio se anulaba abruptamente a una temperatura mayor que el cero absoluto. (figura 1)



Ya en 1913, cuando Kamerlingh Onnes ganó el Nobel de Física por su hallazgo, se había descubierto el segundo elemento superconductor, el plomo. Su resistencia desaparecía al bajar la temperatura de los 7,2 K. más adelante se añadirán a la lista el aluminio (1,2 K), el zinc (0,85 K), el galio (1,1 K), el estaño (3,7 K), el niobio (9,2 K).. Metales puros cuyas temperaturas críticas estaban más cercanos al punto de ebullición del helio que al del nitrógeno (77,4 K). Debido a esta característica todos ellos son conocidos como superconductores de baja temperatura y, aunque presentan un enorme interés teórico, es difícil emplearlos en aplicaciones tecnológicas por dos motivos. El primero de ellos es que deben ser refrigerados a temperaturas bajísimas, para lo cual se usa helio líquido, un elemento muy escaso, caro y difícil de manejar. El segundo problema surgió en el curso de los primeros experimentos. Aunque el mercurio se volvió superconductor al bajar la temperatura, un campo magnético relativamente débil anula el efecto de enfriamiento, revirtiendo el mercurio a su estado de conductor normal.

A estos tipos de materiales que, como el mercurio o el plomo, tenían temperaturas críticas cercanas al punto de ebullición del helio (4,2 K) y presentan una sensibilidad similar a los campos magnéticos se los denominó Superconductores tipo I.

A partir de 1986, científicos encontraron que ciertos cerámicos formados por óxidos de cobre, bario, lantano se convierten en superconductores con temperaturas críticas por encima del punto de fusión del nitrógeno (77 K). Esta marca es muy importante porque pasada esta temperatura, la viabilidad económica de los superconductores es total, pues se pueden mantener refrigerados usando un baño térmico de nitrógeno en estado líquido, un elemento más barato y abundante que el helio.

Efecto Meissner

Dentro de un superconductor, los electrones son capaces de anular completamente los campos magnéticos externos. Es decir, un superconductor se comporta de forma similar a un material diamagnético perfecto. Cuando situamos un superconductor sobre un imán se produce un efecto: el superconductor expulsa el campo magnético del imán, repeliéndolo con tanta fuerza que puede llegar a anular el efecto de gravedad y flotar en el aire (figura 2). La levitación magnética es una de las posibles aplicaciones tecnológicas de los superconductores. Es posible imaginar cómo podría incorporarse esta tecnología en autos, su aplicación en ferrocarriles lleva años en desarrollo.

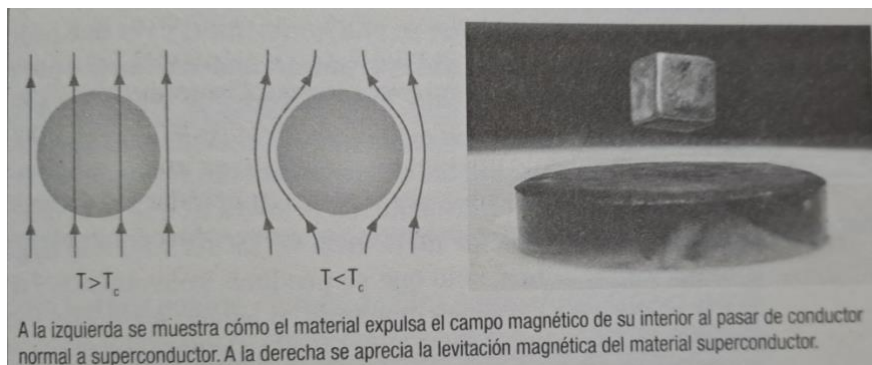


Figura 2

En nuestra vida diaria, suponemos que cada objeto tiene una identidad propia y que podemos distinguirlos y observar su comportamiento individual dentro de un sistema. Si, por ejemplo, lanzamos dos monedas iguales, podemos pintar una marca en una de ellas y considerar como sucesos distintos el caso en el que la primera salga “cara” y la segunda “cruz” y el caso inverso. Así, tenemos cuatro resultados posibles, con una probabilidad de $1/4$ cada uno: cara-cara, cara-cruz, cruz-cara, cruz-cruz.

Pero esto no es así en el mundo subatómico, donde se aplican las reglas de la física cuántica. En el mundo cuántico, dos partículas idénticas son intrínsecamente indistinguibles.

Existen dos tipos de partículas cuánticas, que presentan comportamientos estadísticos diferentes: los fermiones y los bosones. Son fermiones por ejemplo los electrones, los quarks, los protones, los neutrones; son bosones por ejemplo los fotones de la luz, los átomos de helio-4. El que una partícula sea bosón o fermión depende del valor de una propiedad cuántica llamada espín, es una propiedad intrínseca de la materia (como la carga eléctrica). El espín de los bosones siempre es un número entero ($0, \pm 1, \pm 2, \dots$), mientras que el de los fermiones es semientero ($\pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \dots$).

El lanzamiento de dos “monedas cuánticas” que se comportaran como bosones tendría solamente tres resultados posibles: cara-cara, cruz-cruz y cara-cruz, puesto que en este tercer caso sería imposible saber qué moneda ha caído en cara y cuál en cruz. Lo que resulta más curioso es que este último caso no tiene una probabilidad de $1/2$, como en la estadística de las monedas macroscópicas, sino que cada uno de esos tres resultados posibles tendría la misma probabilidad de $1/3$. Es la llamada estadística de Bose-Einstein.

El comportamiento de los bosones, que siguen la estadística de Bose-Einstein, explica las propiedades térmicas de la materia, el láser, los materiales superconductores, superfluidez... Antes de la formulación de la física cuántica, todos esos fenómenos eran inexplicables.

Los bosones pueden poblar todos el mismo estado cuántico pero, al haber interacción entre ellos, este estado es bastante más grande que el que poblaría solo un bosón. De hecho, los bosones formarían un “gran bosón”, un estado de la materia conocido como *Condensado de Bose-Einstein*. (figura 3).

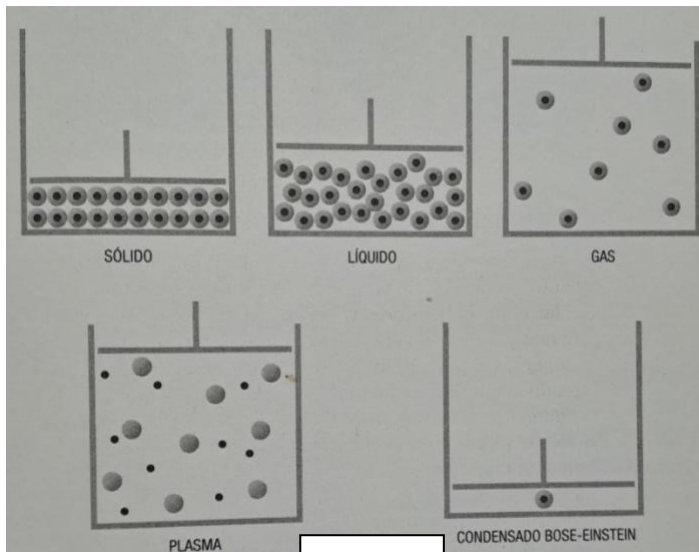


Figura 3

En el átomo, los electrones son indistinguibles excepto por una propiedad, la proyección del espín, una propiedad física de la materia que determina el momento angular intrínseco, que el caso de un solo electrón solo puede tomar dos niveles de energía, que podemos llamar “arriba” y “abajo”. Por este motivo los electrones pueden ir llenando los niveles atómicos de dos en dos. Dos en el nivel más bajo -uno apuntando hacia arriba y otro hacia abajo-, dos en el siguiente, y así sucesivamente. Cada nivel tiene una energía superior, por lo que un átomo contenga muchos electrones, como por ejemplo los que conforman elementos como el oro o el uranio, tendrán algunos electrones con mucha energía. Si, por el contrario, los electrones fuesen bosones en lugar de fermiones, todos se situarían en el mismo nivel, el del nivel de energía más baja, dando lugar a un átomo con muy poco energía total. Si tenemos cuatro fermiones, se colocaran dos en el nivel uno y dos en el nivel dos. La energía del átomo será $1+1+2+2=6$. Si son bosones todos irían al nivel de menor energía y la energía total del átomo sería $1+1+1+1=4$. Esta diferencia, que es apreciable, sería mucho mayor si tuviésemos más partículas.

Superconductividad y Pares de Cooper

Los electrones son fermiones, se repelen porque tienen la misma carga negativa, pueden, en determinadas circunstancias, atraerse levemente. Esta atracción hace que los electrones pasen a formar un conjunto de pares ligeramente ligado, lo que refleja en el hecho de que el tamaño de esas extrañas parejas, llamadas pares de Cooper. Por ello, en lugar de un mar de electrones, lo que se describe como un gas de pares de Cooper. Los pares de Cooper, al estar formados por dos fermiones, son bosones.

En un metal, los electrones de conducción forman un gas de partículas sin interacción. Las cargas de la red cancelan totalmente la repulsión electrostática entre los electrones, y si los electrones de conducción son abundantes (el gas electrónico es denso), tampoco sentirán los detalles de la estructura cristalina. Los electrones de este gas ocuparan todos los estados de movimiento cuya energía sea menor que la energía llamada de Fermi E_F a 0 K.

La presencia de interacciones coulombianas no cambia mucho esta descripción de un metal a bajas temperaturas. La presencia de vibraciones en la red cristalina, en cambio, produce un cambio muy importante en el comportamiento de gas de electrones. Si un electrón que se mueve a través de la red atrae a los núcleos que lo forma y perturba su estado de equilibrio (figura 4). Los núcleos perturbados efectúan pequeñas oscilaciones alrededor de sus posiciones de equilibrio, y estas oscilaciones se propagan en forma de ondas sonoras o, más exactamente, en la forma de cuantos de vibración: llamadas fonones. Un segundo electrón, colocado a cierta distancia del primero sufre una perturbación cuando la onda sonora (el fonon) lo alcanza. Las figuras 4 y 5 representan una red cristalina en la cual se encuentran los nucleos (color rojo) y uno/dos electron (color azul).

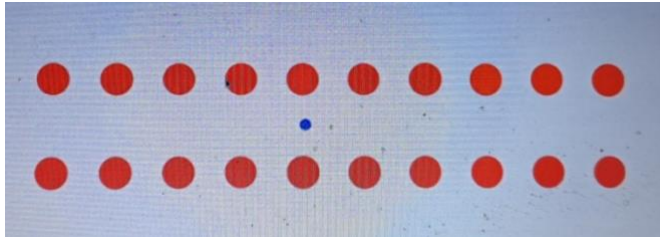


Figura 4

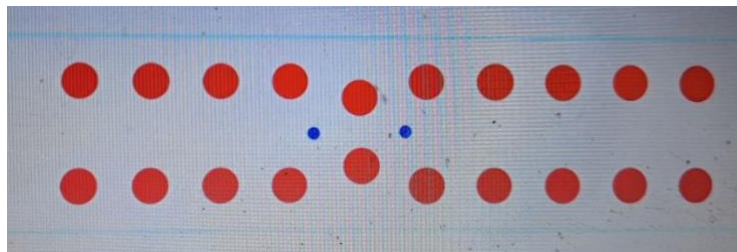


Figura 5

El efecto de esta perturbación es la aparición de una atracción entre ambos electrones (figura 5). Esta atracción se produce entre electrones que tienen impulsos y espines iguales y opuestos (figura 6). Esta fuerza atractiva solo afecta a los electrones situados cerca de la superficie de Fermi $E=E_F$. El principio de exclusión de Pauli no permite a los electrones con $E \ll E_F$ interactuar. El efecto es que los electrones de impulsos (espines) forman un boson, cuyo momento (o impulso) respecto al centro de masa $\mathbf{P}=\mathbf{0}$ y $S=0$.

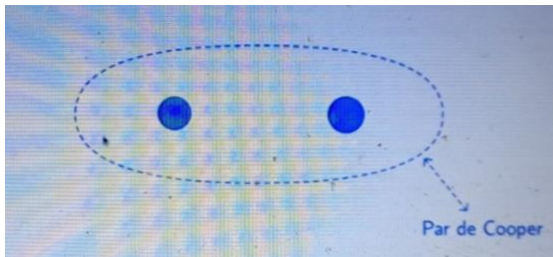
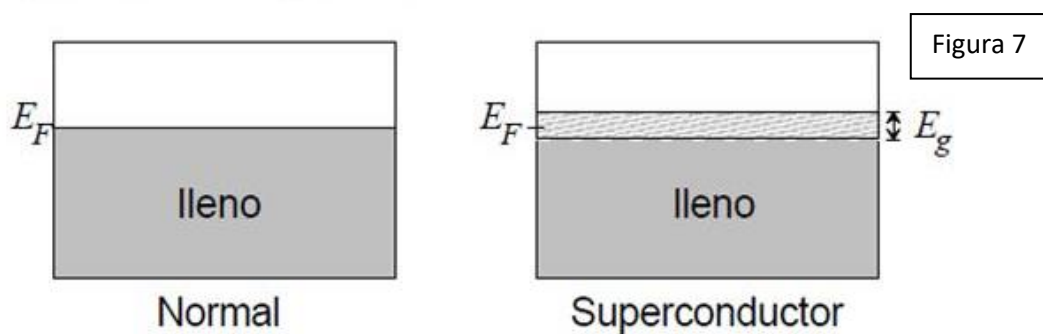


Figura 6

Los estados correspondientes a estos pares "desaparecen" del sistema. No son estados que puedan describirse como un electrón (o dos) de impulso y espín bien definidos. En el espectro de estados accesibles a los electrones aparece una banda prohibida, llamada gap (brecha de energía, de ancho $\Delta=E_g$) Figura 7.

La banda prohibida de los superconductores es de naturaleza muy distinta a la de los aisladores:

- Aisladores y semiconductores: interacción electrón-red
- Superconductores: interacción electrón-electrón (pares de Cooper)



El valor típico de E_g está en torno a 10^{-4} eV

Cuando hay muchos pares de Cooper presentes, sus funciones de onda se superponen las una con las otras y forman un estado altamente organizado. Gracias a este largo alcance de la función de onda y a su enorme superposición con la de otros pares, un par de Cooper dado puede sentir la presencia de una impureza de la red a gran distancia y dar vueltas alrededor sin chocar con ella. En esas condiciones, la resistencia eléctrica se anula.

En síntesis:

- A bajas temperaturas, los electrones pueden deformar la red de núcleos.
- La deformación produce una correlación entre electrones (pares de Cooper).
- Los pares de Cooper son bosones y van al estado de mínima energía.
- Por lo tanto los pares de Cooper conducen la corriente eléctrica.
- Como los pares de Cooper están en el estado de mínima energía, no pueden perder la misma.
- Los pares de Cooper conducen la electricidad sin resistencia eléctrica.

Condensación de Bose-Einstein y superfluidez

Como los bosones se distinguen de los fermiones por su tendencia a juntarse. Los bosones quieren ir todos a una. Si se tiene un recipiente lleno de agua y con una cuchara de madera se comienza a dar vueltas, intentado arrastrar el líquido, invitándolo a girar. Inicialmente se desplazará una fracción pequeña del líquido y luego, poco a poco, una mayor parte del mismo se irá uniendo hasta que todo el líquido rotará de forma más o menos uniforme. En el mundo macroscópico el movimiento del agua dependerá de la velocidad angular con la se gira en la cuchara.

El mismo experimento realizado en un condensado de Bose-Einstein, es decir, en un imaginado recipiente lleno de bosones con su cuchara correspondiente, nos lleva a un fenómeno completamente diferente. En el condensado todos los átomos hacen siempre la misma cosa. Antes de meter la cuchara, los bosones estarán en el estado de más baja energía del sistema, es decir, en reposo en el fondo del recipiente. Si se comienza a girar la cuchara ¿Qué ocurrirá? Los bosones se comportan como un todo, si uno rota, todos rotan. Cabe recordar que la Mecánica Cuántica, en general no deja que las variables del sistema puedan tomar cualquier valor. En este caso, la cuantización afecta a la cantidad de rotación. Cuánticamente el fluido puede rotar a partir de diversos valores posibles que puede tomar la frecuencia angular. Para conseguir poner todo el condensado en movimiento, la cuchara tiene que girar una cantidad determinada de veces, que, más o menos, es la que haría falta para hacer rotar a uno de ellos multiplicada por el número total de bosones. Esto hace que, si inicialmente no tenemos rotación, cueste bastante conseguir que rote todo el fluido. El mismo razonamiento dice que si

se quiere que el fluido deje de rotar, costara mucha energía detenerlo. Si se consigue que rote, rotara indefinidamente.

Esta es la explicación microscópica de la superfluidez observada en el ^4He . Al bajar la temperatura critica de 2,172 K, en torno a un 10% de los átomos de ^4He , que son bosones, pasan a formar un condensado de Bose-Einstein. De esta manera tenemos una mezcla de dos fluidos, uno condensado y otro normal, y las propiedades de rotación y fluidez son completamente distintas a las habituales. La parte superfluida del ^4He por debajo de 2,172 K a presión atmosférica es sorprendente. En el momento en que una parte del líquido empieza a fluir, fluye todo. Si una parte empieza a rotar, entonces rota todo el fluido, sin detenerse. En cierto modo, el superfluido se comporta como si estuviese formado por una gigantesca y extraña molécula.

El ^4He fue, de alguna manera, el primer condensado de Bose-Einstein que se consiguió sintetizar. En realidad no es un condensado propiamente dicho, sino una mezcla entre un condensado y fluido normal. Para tener un condensado puro hubo que esperar unos 70 años. En 1995 un grupo de investigadores de la Universidad de Colorado en Boulder, Estados Unidos, liderado por los físicos Eric A. Cornell y Carl Wieman, consiguió obtener un condensado compuesto de átomo de rubidio-87 a una temperatura de unos 200 nanos kelvines. En estos gases ultra fríos se está estudiando en detalle como aparece la superfluidez y que va pasando exactamente cuándo movemos la cuchara en el recipiente lleno de bosones. En realidad, parece que lo que ocurre es que se van formando pequeños vórtices. Es decir, en el gas aparecen pequeños remolinos, idénticos a los que se forman al dejar escapar el agua de la bañera por el sumidero. Estos pequeños remolinos tienen una rotación del gas asociada pero solo en una región muy pequeña comparada con el tamaño del recipiente. A medida que vamos removiendo en condensado, el número de pequeños vórtices va creciendo hasta que, de algún modo, al llegar a una frecuencia critica se unen y dan lugar a que todo el condensado se mueva al unísono. La compresión y el estudio experimental de las raíces microscópicas de la superfluidez están siendo explorados en detalle en estos laboratorios de átomos ultra fríos.

Los fermiones se unen en pares:

El Helio tiene dos isótopos que se comportan de forma diferentes a bajas temperaturas. Aunque ambos son líquidos a presión atmosférica, incluso si lo llevamos a temperaturas al borde mismo del cero absoluto, presentan comportamientos muy distintos. El ^4He , estos átomos están formados por dos protones, dos neutrones y dos electrones, se comporta como un bosón. Al enfriarlo por debajo de 2,172 K, sus propiedades cambian de tal manera que pasa de denominarse He I a He II y, de hecho, pasa a tener un comportamiento más o menos normal de líquido a tener las propiedades de superfluido (figura 8). La razón de su superfluidez la acabamos de describir más arriba: su comportamiento bosónico.

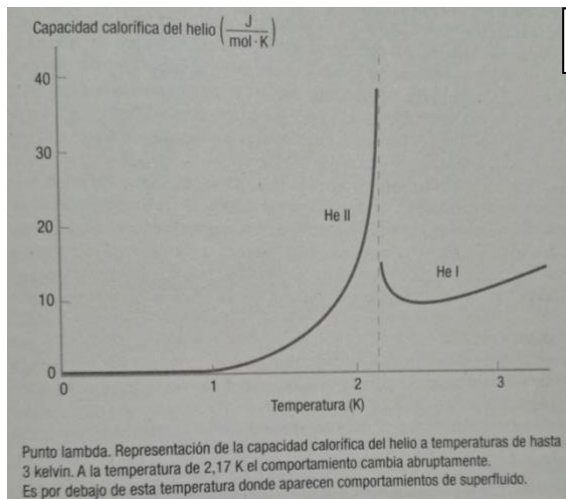


Figura 8

El otro isótopo del helio, el ^3He , es un fermión. Esto es debido a que sus átomos están formados por un número impar de fermiones, concretamente por un neutrón, dos protones y dos electrones. Esto, como ya hemos señalado, hace que a bajas temperaturas se comporte de un modo completamente diferente. En particular, sus propiedades se pueden entender en gran medida como si el líquido fuera lo que se denomina un mar de Fermi. Esto corresponde a un gran número de fermiones llenando un contenedor. Los fermiones llenan el recipiente de tal manera que, esencialmente, solo pueden moverse los que se hallan en estados de energía más alta, ya que son los únicos que están cerca de estados libres. Los fermiones cerca del núcleo atómico no pueden moverse, es decir, estados donde hay otros fermiones, por el principio de exclusión de Pauli: dos fermiones idénticos no pueden estar en el mismo estado cuántico (figura 9).

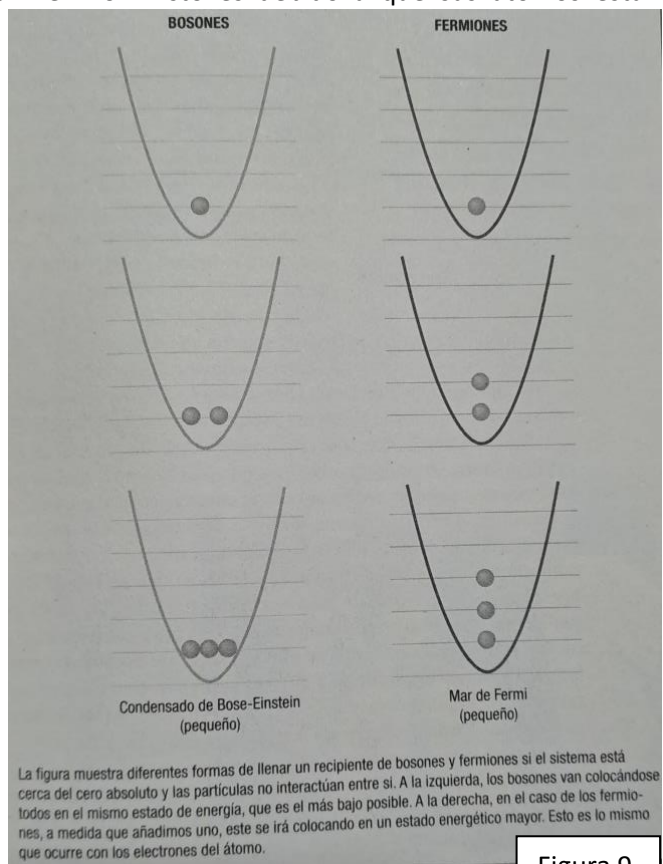


Figura 9

Así se comporta el ^3He a bajas temperaturas, su comportamiento fermiónico explica casi todo lo que le ocurre. Hace falta bajar mil veces la temperatura respecto a la del ^4He para que el ^3He presente también su comportamiento superfluido, es decir hay que llegar a los 0,002491 K.