

Kammerlingh Onnes, la superconductividad, la superfluidez y el universo de las bajas temperaturas.

Justo R. Pérez

Departamento de Física Fundamental y Experimenta Electrónica y Sistemas. Facultad de Física. Universidad de La Laguna. 38205 La Laguna. Tenerife.

Resumen

Se hace un repaso de la evolución de la física de bajas temperaturas tomando como punto de partida la licuefacción del helio, lo que dio origen al descubrimiento de dos fenómenos físicos de singular importancia como la superconductividad y la superfluidez descubiertas por Kammerlingh Onnes y sus discípulos.

Extracto de la conferencia impartida en el curso : La Ciencia en el Siglo XX: Ciencia y Sociedad. 14 de Diciembre de 2000

1. Heike Kammerlingh Onnes.

El trabajo desarrollado por Walther Nernst en Berlín con objeto de la contrastación de su "Teorema del calor" y la consiguiente medida de las capacidades caloríficas a bajas temperaturas supuso un importante avance en la investigación a bajas temperaturas iniciada por Michael Faraday (1791-1867), y que tuvo sus puntos más álgidos en la consecución del oxígeno líquido por Raoult Pictet (1846-1929) y el hidrógeno líquido por James Dewar (1842-1923).



físico de renombre universal: Heike Kammerlingh Onnes (1853-1926).

Sin embargo los avances más espectaculares en la física de bajas temperaturas provinieron de la universidad holandesa de Leiden, liderados por la larga trayectoria de otro

2. La ley de estados correspondientes.

Tras la licuación del hidrógeno en 1898, la única sustancia conocida que no había sido licuada era el helio. Su licuefacción era considerada por Kammerlingh Onnes el último paso en la confirmación decisiva de la ley de estados correspondientes, un resultado establecido en 1880 por Johannes Van der Waals (1837-1923) y de forma independiente por él mismo en 1881.

Esta ley de estados correspondientes establece que si expresamos la temperatura, la presión y el volumen referidos a sus magnitudes en el punto crítico, la ecuación térmica resultante es la misma para todas las sustancias. Kammerling lee este resultado interpretando que si las unidades de masa, espacio y tiempo son expresadas para cada sustancia en un sistema fundamental de unidades el estado dinámico de las moléculas de las distintas sustancias, cuando sus moléculas se encuentran en estados correspondientes es dinámicamente similar.

Los primeros trabajos de Kammerlingh estuvieron principalmente centrados en el análisis de la ecuación de estado que él escribió en forma de un desarrollo en serie denominado desarrollo del virial. Los coeficientes de dicho desarrollo determinados experimentalmente, constituyen un primer objeto de comparación de los modelos teóricos.

Las propiedades magnéticas también fueron objeto de cuidadosa experimentación en el laboratorio de Kammerlingh en Leiden centrada principalmente en el estudio de las sustancias ferromagnéticas, y el oxígeno sólido así como las desviaciones de la ley de Curie.

Sin embargo el punto estelar de su investigaciones fue la licuefacción del helio y el descubrimiento de la superconductividad.

3. La licuefacción del Helio.

La licuefacción del Helio fue conseguida por Kammerling el 10 de Julio de 1908, utilizando una expansión Joule-Kelvin en contracorriente tras un enfriamiento previo con hidrógeno líquido. Sus posteriores intentos de solidificarlo evaporándolo y reduciendo la presión fueron vanos, pero permitieron abrir un nuevo rango de temperaturas accesible ya que el helio líquido tiene un punto de ebullición normal en torno a 4 K y, reduciendo la presión puede llegarse a temperaturas del orden de 1K sin demasiada dificultad. Ello permitió la investigación de la variación de diversas magnitudes con muy baja temperatura, de las cuales destacaremos las medidas sobre la resistencia de diversos materiales.

4. La superconductividad.

El hecho de utilizar la resistividad como una magnitud termométrica hizo que ésta fuera medida con particular atención para diversas sustancias en un

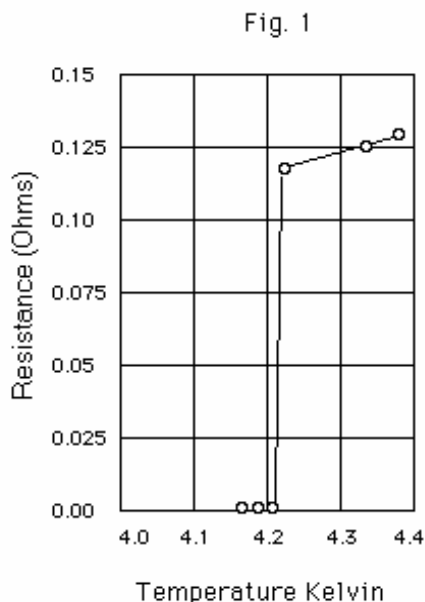
amplio rango de temperaturas. De hecho Dewar y Fleming desde 1893 habían apuntado la posibilidad de que la resistividad se anulase en el cero absoluto, si bien las medidas realizadas posteriormente sobre hidrógeno líquido en las que se observaban que la disminución de ésta se hacía más pequeña a medida que bajaba la temperatura hacían sospechar que ésta pudiera permanecer finita en el cero absoluto.

El interés de Kammerlingh en la medida de la conductividad eléctrica a baja temperatura fue asimismo estimulado por una sugerencia de Lord Kelvin (1902) según la cual la resistividad debería disminuir con la temperatura, pero por debajo de un cierto valor de ésta debería comenzar a aumentar debido a la condensación de los electrones. Esta idea de los electrones formando un gas susceptible de ser condensado, podía asimismo ser sugerida por las teorías de Riecke (1898) y Drude (1900) quienes analizaron el fenómeno de la conductividad eléctrica tratando a los electrones como un gas que obedece a la ecuación de estado de los gases ideales, pudiendo de esta forma explicar la vieja ley empírica de Wiedeman-Franz que establece que a la misma temperatura, la razón entre la conductividad térmica y la conductividad eléctrica es la misma para todos los metales.

Los primeras medidas de la resistencia en el nuevo rango de temperaturas realizadas para el platino mostraron que ésta aparentemente tendía a un valor constante en contra de los comportamientos esperados de o bien tender a cero extrapolando el comportamiento a más alta temperatura o bien aumentar hasta hacerse infinita según la sugerencia de Kelvin.

Kammerling atribuyó esta resistencia residual a la presencia de impurezas en el metal y decidió repetir los experimentos con dos de las sustancias que pueden ser puestas en la forma de un hilo conductor con mayor alto grado de pureza, el oro y el mercurio.

Para el oro, los resultados fueron similares que para el platino, pero para el mercurio un sorprendente cambio fue observado cerca de 4.2 K, disminuyendo la resistencia abruptamente desde un valor finito hasta prácticamente cero. La repetición del experimento permitió confirmar el fenómeno observándose que desde el punto de ebullición del hidrógeno hasta el punto de ebullición del helio el comportamiento era similar al del platino con una disminución gradual, mientras que en torno a 4.2 K la resistencia desaparecía rápidamente. Estos experimentos fueron repetidos en 1913 acuñando en la publicación de los mismos por primera vez el término superconductividad.

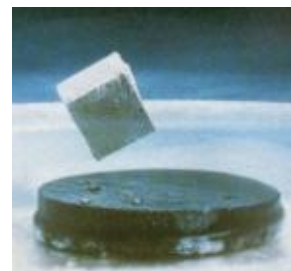


Kammerlingh intentó explicar el nuevo fenómeno observado haciendo uso de la teoría de los cuanta de Planck, y sucesivas discusiones tuvieron lugar

sobre el fenómeno en las conferencias Solvay de 1911 y 1912. Las investigaciones de Leiden se ven interrumpidas por la Primera Guerra Mundial y es sólo en 1921 que se reinicia el trabajo en esta materia.

Sin embargo, Kammerlingh ya de avanzada edad murió en 1926 sin que el fenómeno de la superconductividad fuera satisfactoriamente explicado, y sus discípulos, principalmente Wilhem Keesom (1876-1956) continuaron trabajando sobre el tema sistematizando el estudio de la desaparición de la superconductividad con la aplicación de un campo magnético externo y el tratamiento termodinámico de la misma como una transición de fase.

Sin embargo el siguiente salto cualitativo en la interpretación de dicho fenómeno lo produjo en 1933 Fritz W. Meissner (1882-1974) cuando aportó evidencias



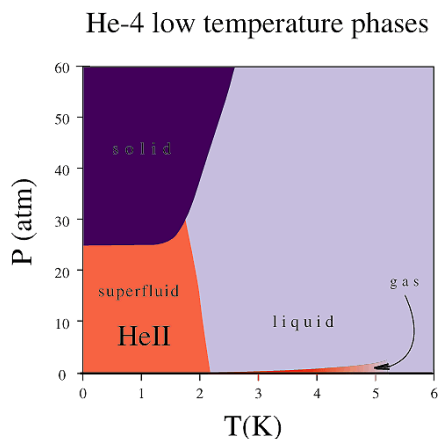
experimentales en el sentido de que el campo magnético se anula en el interior del superconductor

y por lo tanto la transición a superconductor es una transición a un estado de diamagnetismo perfecto. (Un diamagnético es una sustancia para la cual un campo externo aplicado disminuye en su interior)

5. Superfluididez

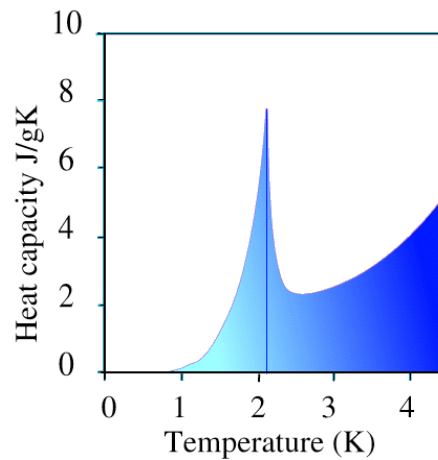
El helio es la sustancia que tiene la temperatura de licuefacción más baja, 4.2 K a presión atmosférica. Además, en equilibrio con su vapor permanece en estado líquido hasta la temperatura más baja conocida, siendo necesario incrementar sustancialmente la presión para conseguir su pase al estado sólido. Kammerling tras su licuefacción en 1908 y en sus intentos por obtener la

fase sólida anotó la observación de un máximo en la densidad en torno a 2 K y un valor excepcionalmente bajo de la densidad en dicho rango, sin reparar en otros fenómenos observados posteriormente en el mismo rango de temperaturas.



Asimismo en 1922 Kammerlingh anotó la observación accidental de que al tratar de hacer un experimento con un recipiente pequeño de helio inmerso en otro mayor el helio se vació rápidamente de la vasija pequeña a la grande hasta equilibrarse el nivel en ambas. Sin embargo en ese momento atribuyó este fenómeno a una rápida destilación de un recipiente en otro, sin darle mayor importancia. En los últimos años de su vida Kammerlingh y sus colaboradores volvieron su atención a la variación de la densidad con la temperatura que si bien aparentaba una función continua presentaba un máximo significativo con una más que posible

discontinuidad en la pendiente.



Asimismo tal máximo era observado en los calores específicos donde incluso se habían encontrado valores tan sorprendentemente grandes que era susceptible de sospechar que algo había ido mal en el experimento. Dichas discontinuidades fueron observadas asimismo en el calor de vaporización y en la tensión superficial lo que hicieron a Kammerlingh sospechar que había dos tipos de helio separados por algún tipo de transición de fase, a los que Keesom en 1927 denominó Helio I y Helio II. En 1930 Keesom et. al observan también de modo accidental que el Helio II es capaz de atravesar los mas finos agujeros incluso aquellos sellados para la fase de vapor. Esto les hacía sospechar de una extraordinario descenso en la viscosidad, sin embargo las medidas de la viscosidad realizadas entre 1935 y 1938 por Keesom en Leiden y Wilhem en Toronto analizando la rotación de un cilindro en el líquido no permitieron encontrar tales discontinuidades en la viscosidad.

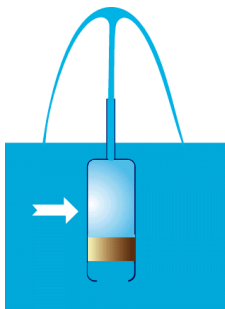
El propio cambio en el aspecto visual del helio no había sido objeto de mención hasta que Wilhem en 1932 señala que al atravesar el punto de transición

"...la apariencia del líquido sufre un cambio brusco, pasando de una ebullición turbulenta a un estado de quietud en el que cesa la ebullición y la curvatura del menisco de la superficie aparenta desaparecer..."

En 1932 Keesom repitió las medidas de la capacidad calorífica con un mayor grado de precisión denominando a sugerencia de Ehrenfest punto λ al punto de transición atendiendo a la forma de la gráfica del calor específico con la temperatura.

Sin embargo no es hasta 1938 en el que el fenómeno de la superfluidez aparece descrito en su contexto actual en seis famosos artículos publicados en dicho año en la revista Nature.

El primero de estos trabajos presentado por John Allen (1908-2001) de Cambridge tiene que ver con el valor extraordinariamente alto de la conductividad térmica del helio II en el cual el flujo de calor deja de ser proporcional al gradiente de temperaturas, como ocurre para las demás sustancias, un fenómeno bautizado por dichos autores como superconductividad térmica.

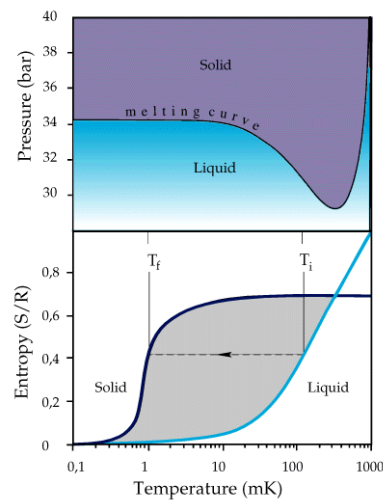


Los siguientes trabajos provienen de Piotr Kapitza (1894-1964) en Moscú y del propio Allen de Cambridge en relación a las medidas de viscosidad, llevadas a cabo esta vez con la técnica de hacer fluir el helio a través de un capilar muy fino. Con esta técnica los valores obtenidos de la viscosidad fueron prácticamente nulos acuñándose el término superfluidez por primera vez en el artículo de Kapitza.

El siguiente trabajo muestra el efecto conocido como efecto termomecánico, observando que cuando un pequeño

recipiente inmerso en otro es calentado con una corriente eléctrica se observa un flujo de materia en sentido inverso al flujo de calor.

Los artículos quinto y sexto aparecen de las observaciones de Mendelssohn en Oxford y Kikoin en Jarkov demostrando que el helio es capaz de fluir por las paredes del recipiente en forma de una fina película.



El fenómeno de la superconductividad fue quizá el último fenómeno observado de las propiedades de la materia consecuencia de los primitivos experimentos conducentes a la licuefacción del Helio. Luego vendría la observación de este fenómeno también en el $^2\text{He}^3$ el isótopo ligero del helio y la interpretación teórica de ambos fenómenos, la superconductividad y la superfluidez, en una época posterior en la que el desarrollo de la física estuvo marcado en dos grandes direcciones:

- i) Desentrañar las propiedades del núcleo atómico propiciando una fuente de energía de considerable magnitud a la vez que un arsenal de armas de potencia terrorífica, y
- ii) Desvelar las propiedades conductoras de la materia a pequeña escala capaces de propiciar una auténtica revolución en

los modos de vida de finales del siglo XX. Pero esto ya es cuestión para hablar otro día.

- **K. Gavroglu, Y. Goudaroulis**
Methodological aspects of the development of low temperature physics 1881-1956. Kluwer
1989