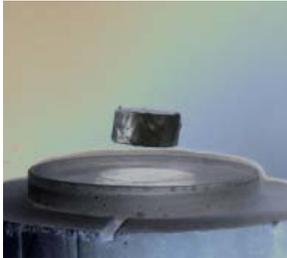


# La materia a muy bajas temperaturas

J. Rubén Morones Ibarra

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, UANL

rmorones@fcfm.uanl.mx



## RESUMEN

*El estudio de los fenómenos a bajas temperaturas ha atraído la atención de los científicos desde hace más de doscientos años. Después de que se logró la licuefacción de los llamados gases permanentes, a fines del siglo XIX, el helio constituyó el reto más grande en la búsqueda de la licuefacción de los gases. Una vez que el helio logró licuarse en 1908, los asombrosos fenómenos de la superconductividad y de la superfluidez fueron descubiertos en los años de 1911 y 1935, respectivamente. Estos descubrimientos abrieron nuevos campos de investigación los cuales continúan con una gran actividad en nuestros días.*

## PALABRAS CLAVE

Baja temperatura, superconductividad, superfluidez, helio líquido.

## ABSTRACT

*The study of low temperature phenomena has caught the attention of the scientific community for more than two hundred years. After the liquefaction of the called permanent gases at the end of the XIX century, helium was the last challenge in the quest for liquefying gases. Once helium was liquefied in 1908, the astonishing phenomena of superconductivity and superfluidity were discovered in 1911 and 1935, respectively. These discoveries opened new fields of research that even nowadays are very active.*

## KEYWORDS

Low temperature, superconductivity, superfluidity, liquid helium.

## INTRODUCCIÓN

La materia, como la observamos a nuestro alrededor, se presenta en los estados sólido, líquido y gaseoso. Sin embargo, además de estos tres estados, existen otras formas de agregación de la materia, como el plasma, al que se le ha llamado cuarto estado de la materia, también encontramos el estado superconductor y el estado superfluido, de los que hablaremos más adelante.

Para entender estas formas macroscópica de manifestación de la materia es conveniente hacer una breve introducción a algunos aspectos fundamentales sobre la estructura de la materia. Todos los objetos que encontramos en nuestro mundo están formados por átomos y estos a su vez forman moléculas. En los gases las moléculas están muy separadas, en los líquidos lo están menos y en los sólidos usualmente están muy cerca unas de otras, formando una estructura cristalina

rígida. En el caso de los metales, los electrones menos ligados a los átomos se pueden mover libremente, dejando una estructura formada por iones. En este caso se habla de un gas de electrones libres debido al comportamiento de estos, los cuales ocupan un volumen mayor que el ocupado por los electrones ligados a los iones.

Por otra parte, la temperatura de un cuerpo está relacionada con la energía cinética de las partículas que lo forman. Si a un sólido le comunicamos calor los átomos o iones vibrarán más vigorosamente a medida que la temperatura aumenta. Los enlaces entre iones se debilitan y estos tendrán mayor movilidad. Si seguimos aumentando la temperatura el sólido se convertirá en líquido y aumentando aún más la temperatura los enlaces moleculares se rompen debido a la movilidad pasando el líquido al estado gaseoso.

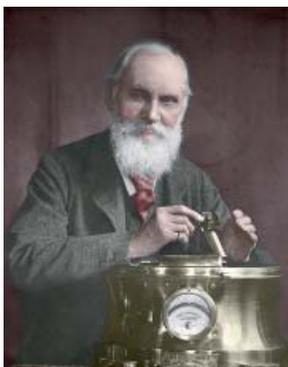
Yendo en la dirección opuesta, hacia las bajas temperaturas, tendremos que, si iniciamos con un gas, al ir disminuyendo la temperatura la movilidad de las partículas que lo constituyen va disminuyendo, pasando este al estado líquido y subsecuentemente al estado sólido.

## LA FÍSICA DE BAJAS TEMPERATURAS

Sabemos que las propiedades de la materia sufren cambios importantes cuando se le somete a bajas temperaturas. Es sabido, por ejemplo, que los gases se licúan, que el mercurio se solidifica a  $-39^{\circ}\text{C}$  y por lo tanto un termómetro de mercurio no puede usarse a temperaturas por debajo de esta, y que el hule se vuelve quebradizo como el vidrio a la temperatura del nitrógeno líquido.



Antoine-Laurent Lavoisier.  
[1743-1794]



William Thomson.  
Lord Kelvin. [1824-1907]

Un fenómeno interesante de las bajas temperaturas ocurrió en San Petesburgo, en un invierno excepcionalmente frío a principios del siglo XVIII. Sucedió que los tubos del órgano de la catedral de esta ciudad se despedazaron de manera aparentemente mágica. La explicación del fenómeno, ahora la conocemos, se debe a que los átomos de un material sufren un reacomodo al bajar la temperatura. Cuando el estaño, que era el material de los tubos del órgano, se enfría cerca de los 50 grados bajo cero, se pulveriza. En ese día de invierno la temperatura ambiente había alcanzado temperaturas algo menores a los 50 grados bajo cero y el estaño sufrió alteraciones en sus propiedades mecánicas que produjeron su pulverización y no fue, como lo creyeron en ese momento los feligreses, una influencia diabólica. Sin embargo, es probable que alguien se haya dado cuenta que la exploración del comportamiento de las propiedades de la materia a bajas temperaturas ofrecía un campo fértil para la investigación.

El estudio de los fenómenos que ocurren a bajas temperaturas empezó a interesar a los químicos y a los físicos al final de la década de 1780. En ese entonces el notable químico francés A. L. Lavoisier expresó la idea de que si la Tierra estuviera más cerca del sol, con la consecuente elevación de la temperatura ambiente, y esta fuese superior a la temperatura de ebullición del agua, muchas de las sustancias que hoy observamos en estado líquido pasarían al estado gaseoso, formando parte de la atmósfera terrestre y muchas sustancias que hoy observamos en su estado natural en forma sólida pasarían al estado líquido. Por otro lado, si la temperatura ambiente de la Tierra fuera muy fría, los ríos de agua que vemos no existirían. El agua estaría presente en el planeta en forma de montañas de hielo y los ríos serían flujos de líquido formado por algunos de los componentes del aire.<sup>1</sup>

Poco después de estas observaciones de Lavoisier, se despertó una carrera por el “frío”. Al finalizar el siglo XVIII el físico francés Jacques Charles realizó experimentos sobre la dilatación de los gases y encontró que por cada grado Celsius que se bajaba la temperatura de un gas, este disminuía su volumen en  $\frac{1}{273}$  de su volumen a  $0^{\circ}\text{C}$ . Charles enunció esto como una ley, la cual lleva su nombre. Extrapolando la ley de Charles se llega a la conclusión de que

a la temperatura de  $-273^{\circ}\text{C}$  el volumen del gas debería desaparecer. Los científicos supusieron que este resultado absurdo podía evitarse fácilmente ya que se esperaba que la ley no fuera aplicable a temperaturas tan bajas. Evidentemente que la extrapolación no es válida puesto que todos los gases pasan por el estado líquido antes de llegar al cero absoluto. Sin embargo, quedó también como una enseñanza que podía haber un límite en la naturaleza para la temperatura más baja.

Adelantándonos en este relato, diremos que no fue sino hasta cien años después, con el desarrollo de la teoría atómica por Dalton y el de la teoría de distribución de velocidades moleculares desarrollada por James Clerk Maxwell en 1859, que Lord Kelvin concluyó a finales de la década de 1860 que la temperatura más baja posible era de  $-273^{\circ}\text{C}$ , donde todas las moléculas que constituyen el sistema llegarían al reposo.<sup>2</sup> Sería entonces la energía la que alcanzaría el valor cero y no el volumen. La mecánica cuántica vendría a modificar estos conceptos, quedando en el cero absoluto, no una energía cero sino una energía mínima de vibración de las moléculas, consistente con el principio de incertidumbre de Heisenberg. Esta es la energía del punto cero y se llega a ella a la temperatura de  $-273.15^{\circ}\text{C}$ , conocida como el cero absoluto de temperatura. El físico alemán Walter H. Nernst haría después una aportación importante al sugerir que no es la energía lo que se va a cero en el cero absoluto, puesto que hay un punto de energía de vibración mínima pero no cero. Lo que se va a cero es la entropía con lo cual se consigue el mayor orden posible del sistema de partículas.<sup>3</sup>

## LA LICUEFACCIÓN DE LOS GASES

En el siglo XIX se mostró un gran interés por el estudio de los gases por ser este estudio relativamente más simple que el de los sólidos o los líquidos. En particular, el intento por licuar los gases fue una práctica que llamó la atención de muchos investigadores. La idea que guiaba estas investigaciones era el ejemplo del agua, en la que se presentaban los cambios de fase entre los tres estados, con solo variar la temperatura. Sin embargo, en el caso de los gases, se pensaba que bastaba comprimirlos lo suficiente para licuarlos, sin necesidad de bajar la temperatura.

En ese mismo siglo se había descubierto experimentalmente que algunos gases se pueden licuar a temperatura ambiente al someterlos a altas presiones. Poco después se dieron cuenta que había algunos que no se licuaban por más elevada que fuera la presión a la que se sometían. Entre estos gases se encontraban los muy conocidos componentes del aire, el oxígeno y el nitrógeno, y también el hidrógeno, un gas bastante común obtenido en la descomposición del agua. A estos gases se les conoció como gases permanentes debido a que se creía que nunca podrían licuarse.

El camino de las altas presiones fue la técnica que se siguió en los primeros intentos por licuar gases, hasta que el físico británico Thomas Andrews, dedujo mediante una serie de experimentos realizados entre 1861 y 1869, que cada gas tenía una temperatura crítica por encima de la cual es imposible licuarlo, por más grande que sea la presión a la que se le someta.<sup>1</sup> Fue entonces cuando se inició la búsqueda de métodos experimentales para disminuir la temperatura y lograr licuar los gases que no se licuaban a temperatura ambiente mediante la elevación de la presión, entre ellos los gases permanentes.

La carrera por la obtención de temperaturas cada vez más bajas había tenido sus contratiempos por la falta de una buena tecnología para la refrigeración. Después de descubrirse nuevas técnicas en el proceso de enfriamiento, en diciembre de 1877 en la reunión de la Academia de Ciencias de París el ingeniero y físico Louis Cailletet anunció que había logrado la



Fig. 1. Heike Kamerlingh Onnes [1853-1926] en su laboratorio.

licuefacción del oxígeno a la temperatura de 90.2 K. En 1883, el mismo Cailletet, logró licuar el nitrógeno a la temperatura de 77.4 K, y en 1898, en Inglaterra, James Dewar licuó el hidrógeno a la temperatura de 20.4 K. Con estos logros, se terminó la era de los gases permanentes.<sup>1</sup>

El último de los gases que faltaba por licuarse era el helio. La licuefacción de este gas requirió llevar a cabo técnicas muy cuidadosas. En 1908, el físico holandés Kammerlingh Onnes (ver figura 1), logró licuarlo a la temperatura de 4.2 K.

Como una anécdota interesante comentamos lo que ocurrió el día de la licuefacción del helio. Después de los grandes esfuerzos que se habían hecho para licuar el último de los gases, el que había presentado enormes dificultades, ocurre que cuando se estaba viviendo la emoción del descenso cada vez mayor de la temperatura indicada por el termómetro, esta deja de descender, según lo indica el termómetro. Con esto Kammerlingh Onnes sufre una enorme decepción pensando que había fracasado. En eso entra al laboratorio alguien que nada tenía que ver con los experimentos, alguien que simplemente andaba curioseando, y hace el feliz, inocente comentario: será que el termómetro no funciona en estas condiciones. La cara de Kammerlingh Onnes se ilumina de alegría y observa la parte baja del aparato licuador notando que ya se había acumulado una buena cantidad de helio líquido en el recipiente.<sup>4</sup>

## EL DESCUBRIMIENTO DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Una vez que se consiguió licuar el helio y que se obtuvieron por primera vez estas temperaturas tan bajas, el siguiente paso era estudiar las propiedades de la materia bajo estas nuevas condiciones. El fenómeno más notable que estudió Kammerlingh Onnes fue el del comportamiento de la resistencia eléctrica de los metales a bajas temperaturas. La información que se tenía en esa época era que los metales tienen una estructura microscópica cristalina, definida por las posiciones de los átomos. En esta estructura, los átomos despojados de algunos electrones, vibran alrededor de sus posiciones de equilibrio. Esta vibración es la agitación térmica que tienen todos los cuerpos y aumenta al aumentar la temperatura.

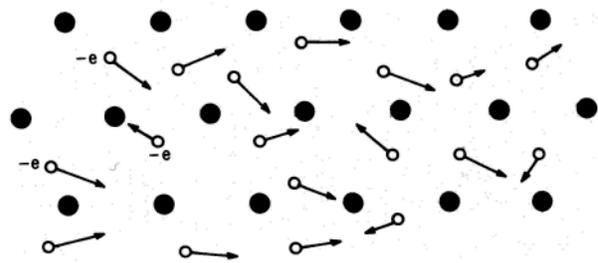


Fig. 2. Corriente eléctrica en un metal representada por el flujo de electrones a través de la malla cristalina. Los círculos negros representan los iones de la red y los círculos blancos los electrones. La resistencia eléctrica es la manifestación macroscópica de los choques de los electrones con los iones.

Por otra parte, la resistividad eléctrica de un metal se debe a que los electrones, que son los que conducen la corriente eléctrica, no pueden viajar libremente en el metal debido a que chocan con la red cristalina, ver figura 2.

El calor generado en un corto circuito, en una plancha eléctrica o en un tostador de pan, se debe al efecto Joule, que es la manifestación del aumento de agitación térmica de los iones de la red, cuando los electrones ceden su energía cinética en las colisiones con los iones de la red. Esta descripción sugiere que si se enfría el metal la resistividad eléctrica debe disminuir, lo cual se comprueba experimentalmente. La pregunta que surge es si esta disminución de la resistividad con la temperatura tiene un límite, es decir, si se llega a una temperatura por debajo de la cual la resistividad ya no disminuye.

Onnes realizó su primer experimento con mercurio, que era el metal más puro que se podía obtener en esa época. Construyó un pequeño circuito eléctrico con un hilo muy fino de mercurio, lo solidificó y le hizo pruebas de resistencia eléctrica. Para su sorpresa encontró que a la temperatura de 4.18 K la resistividad del mercurio se hace prácticamente cero y que una corriente eléctrica circulando por el circuito puede durar varios días sin necesidad de una fuente de fuerza electromotriz. Realizó después el experimento con un circuito de plomo y logró que una corriente eléctrica se mantuviera circulando por él durante varios meses sin necesidad de ninguna influencia externa,<sup>1</sup> ver figura 3.

Lo que kammerlingh Onnes había descubierto era la superconductividad, un fenómeno sorprendente

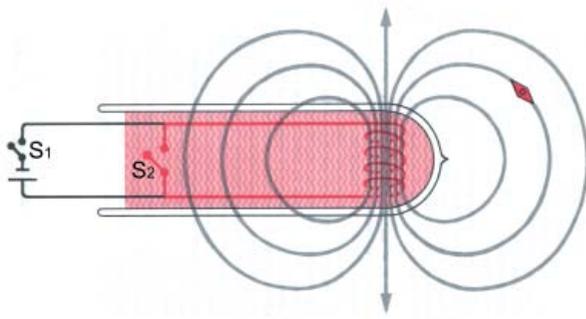


Fig. 3. El circuito de la derecha al cerrarse se encuentra en estado superconductor. Con  $S_2$  abierto y  $S_1$  cerrado, se hace pasar una corriente eléctrica por la bobina. Después se cierra  $S_2$  y se abre  $S_1$  quedando desconectada la batería. Se observa que la corriente eléctrica se mantiene circulando durante meses, aún sin una FEM.

que se ha observado hasta ahora en más de veinte metales, varias decenas de aleaciones y otras tantas decenas de materiales cerámicos. Basados en la explicación de la superconductividad en los metales, se cree que todos los buenos conductores metálicos deben exhibir el fenómeno de la superconductividad a temperaturas suficientemente bajas.<sup>5</sup>

Los materiales superconductores estudiados durante más de setenta años presentaban el estado superconductor a temperaturas por debajo de los 20 K. Fue en el año de 1987 que se preparó un material cerámico que exhibe el fenómeno de la superconductividad a una temperatura crítica de 98 K. Este importante logro implica que se puede mantener el estado superconductor a bajo costo, relativamente, pues el nitrógeno se licua a 77 K y debido a su abundancia resulta muy barato. Con nitrógeno líquido se mantiene este material cerámico en estado superconductor, pudiendo aprovechar sus propiedades en aplicaciones industriales y científicas a un precio relativamente bajo.<sup>6</sup>

En experimentos realizados en varios laboratorios de diferentes partes del mundo se ha logrado producir corrientes inducidas en circuitos metálicos a temperaturas cercanas al cero absoluto, consiguiendo que la corriente eléctrica, de varios cientos de amperes, que se mantienen aisladas, sin interacción o influencia externa, se mantenga sin cambio en su intensidad durante periodos de más de un año, lo que indica que la resistencia eléctrica es prácticamente cero.

Después de que se descubrió la superconductividad de alta temperatura en los materiales cerámicos, se hizo una clasificación de los materiales superconductores en dos tipos, los metálicos, conocidos como del tipo I y los cerámicos, a los que se les dio el nombre de superconductores del tipo II. Aun cuando existe una teoría microscópica satisfactoria para explicar la superconductividad en los materiales del tipo I, todavía no se tiene una teoría microscópica que explique la superconductividad de los materiales del tipo II.<sup>5</sup>

La guía para intentar dar una explicación microscópica de la superconductividad para los superconductores del tipo I la dio el análisis de la entropía. En el estado superconductor la entropía es menor que en el estado normal. Por otra parte, la entropía, como es de esperarse, disminuye con la temperatura. Sin embargo, la estructura cristalina del material no cambia en el estado superconductor, lo que cambia es el estado de los electrones, que llegan a tener un mayor ordenamiento. Este hecho llevó a la elaboración de una teoría microscópica del estado superconductor, que tiene que ver con el estado de los electrones.

Lo que ocurre a los electrones en el estado superconductor es que estos se aparean formando pares, a los que se les bautizó con el nombre de pares de Cooper, en honor a Leon Cooper, físico norteamericano que participó en el desarrollo de la teoría para explicar la superconductividad en los metales. Estos constituyen algo parecido a un enjambre de parejas de electrones que al estar unidos en una especie de madeja entrelazada no encuentran resistencia a su paso por la estructura cristalina, ya que no producirán excitaciones de la red, o equivalentemente, no cederán su energía en las colisiones con la red cristalina.

Un efecto notable del estado superconductor es conocido como efecto Meissner, en honor al físico alemán que descubrió este efecto, Walter Meissner. Este fenómeno consiste en que un campo magnético es expulsado de un superconductor mientras este se mantenga en este estado. En otros términos, en el interior de una muestra en estado superconductor, el campo magnético es siempre cero, ver figura 4.

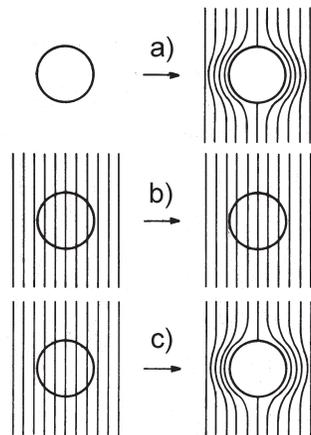


Fig. 4. Se muestra la diferencia entre el estado superconductor y un conductor perfecto. En a) la muestra se enfría alcanzando el estado superconductor y después se coloca en un campo magnético. Se observa el efecto Meissner (el campo magnético es expulsado del superconductor). En b) tenemos el caso ideal de un conductor (lado izquierdo) en un campo magnético externo que se convierte en conductor perfecto (no superconductor) al bajar la temperatura (lado derecho). El campo magnético no es expulsado de su interior. El caso c) es igual al caso b) solo que el conductor se vuelve superconductor presentando el efecto Meissner.

Este efecto se manifiesta de una manera impresionante en la levitación magnética, ver figura 5.



Fig. 5. Un imán colocado sobre una muestra en el estado superconductor, flota o levita. La explicación es el efecto Meissner: el campo magnético del imán es "repelido" o expulsado por el superconductor, impidiendo que el imán "toque" el superconductor. Este es el efecto que se aprovecha en los trenes que levitan. Usando superconductores en un tren se puede lograr que este flote, evitando la fricción y facilitando el transporte.

### EL ESTADO DE SUPERFLUIDEZ

Después de que se consiguió licuar el helio, se buscó medirle sus propiedades, como la densidad, viscosidad, capacidad calorífica y otras más.

En 1935 se encontró que el helio líquido a la temperatura de  $-271.8^{\circ}\text{C}$  Celsius conduce el calor casi perfectamente y con gran rapidez, de tal manera que cada una de las partes está siempre a la misma temperatura; no hay gradiente de temperatura en el Helio a esta temperatura.

Se encontró que por debajo de la temperatura de 2.18 K, conocido como el punto lambda, por la forma que adquiere la gráfica de la capacidad calorífica contra la temperatura, la temperatura de toda la masa de helio se hace homogénea, aun cuando se le comunique calor a una porción de ella. Este resultado implica que la conductividad calorífica del helio a esta temperatura es muy elevada. Para explicar este fenómeno, el físico ruso Piotr Kapitsa supuso que el helio en estas condiciones era un superfluido, lo que significa que el líquido se mueve con una facilidad extraordinaria.

Fue en el año de 1937 cuando Kapitsa introdujo el término superfluidez para explicar esta propiedad de conducción del calor tan rápidamente. El término superfluidez quedó como el nombre para designar la propiedad de un líquido de desplazarse sin fricción de un lugar a otro.

El físico ruso Lev Landau explicó el fenómeno de la superfluidez mediante el modelo de dos fases del helio en estado líquido. Al helio líquido en estado normal le llamó helio I, y señaló que a la temperatura de 2.18 K, que corresponde al punto lambda, ver figura 6, el valor de la temperatura a la que el helio

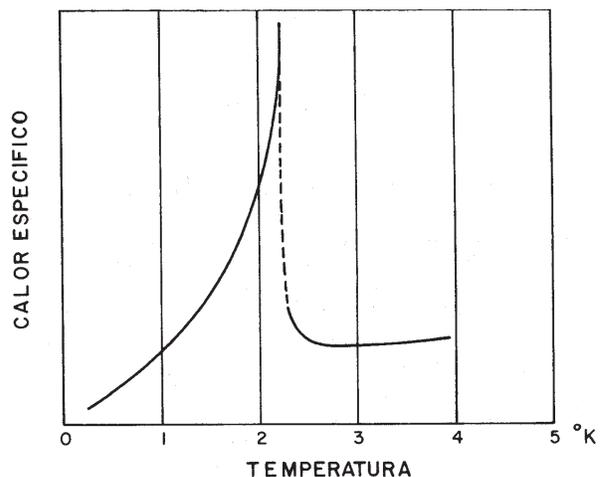


Fig. 6. Se muestra el punto lambda a 2.18 K donde se efectúa la transición de helio líquido normal al estado superfluido.

pasa al estado superfluido, ocurre un cambio de fase de una parte del helio. A esta fase superfluida le llamó He II. En esta fase del helio ocurre un fenómeno predicho por la teoría cuántica que se conoce como un condensado de Bose-Einstein. En dicho estado cuántico todos los átomos se acomodan en el nivel más bajo de energía y el conjunto total se comporta como si fuera una sola partícula. La reptación del He II se explica mediante el concepto de condensado de Bose-Einstein al considerar que todo sistema tiende a evolucionar hacia estados de mínima energía. Como todo el condensado se comporta de manera coherente, como una sola partícula, este sistema tenderá a tener, como un todo, una energía mínima.<sup>7</sup>

El fenómeno de la elevada capacidad de conducción calorífica lo explicó Kapitsa mediante el concepto de superfluidez, es decir que el líquido se desplaza rápidamente de un lugar a otro transmitiendo el calor de forma casi instantánea. En este sentido se puede decir que el helio líquido resulta ser un superconductor del calor en la fase de He II.

### Fenómenos de la superfluidez

En el estado superfluido el helio presenta un comportamiento totalmente fuera de lo común. Mencionaremos tres de estos efectos.

- a) **EFEECTO FUENTE:** Si se proporciona energía iluminando o calentando un superfluido contenido en una pipeta abierta por su parte superior, el fluido saldrá expulsado en chorro en forma de fuente por el orificio. Ver figura 7.
- b) **EFEECTO DE REPTACIÓN:** Cuando el superfluido se coloca en un recipiente abierto dentro de un baño rodeado de superfluido, el que tenga mayor nivel subirá por las paredes derramándose en el otro. Ver figura 8.
- c) **VISCOSIDAD CERO:** Si ponemos a girar sobre su eje un recipiente que contiene un superfluido, este no girará, permanecerá inmóvil. Esto se debe a que la viscosidad del superfluido es cero y el movimiento del recipiente no podrá ser comunicado o transmitido al fluido. Ver figura 9.

Cuando el helio está pasando de gas a líquido a la temperatura de 4.2 K, aparece la ebullición, que es el fenómeno característico del cambio de fase de líquido a gaseoso o viceversa. Pero si seguimos bajando la temperatura observamos que a 2.17 K, se presentan

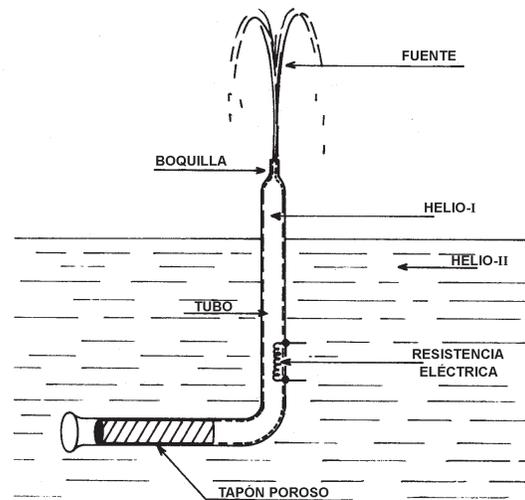


Fig. 7. Inicialmente en el recipiente y en el tubo hay solamente helio II. Si calentamos el interior del tubo mediante la resistencia eléctrica, elevando ligeramente la temperatura por encima del punto lambda. Se forma entonces helio I en el interior, pero este no puede escapar por el tapón poroso. El helio II del recipiente externo penetra al tubo buscando igualar los niveles en el interior y el exterior. El resultado es que el helio I es expulsado del tubo a través de la boquilla, dando el aspecto de una fuente.

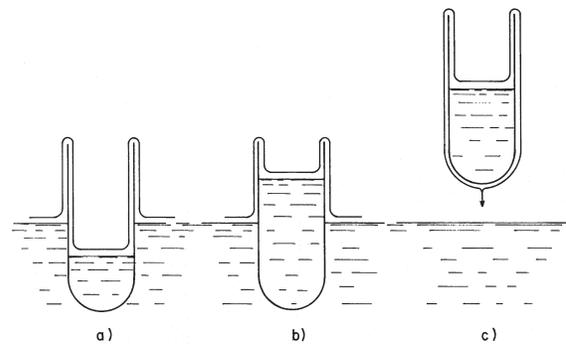


Fig. 8. El helio II trepa por las paredes buscando igualar los niveles al nivel más bajo.

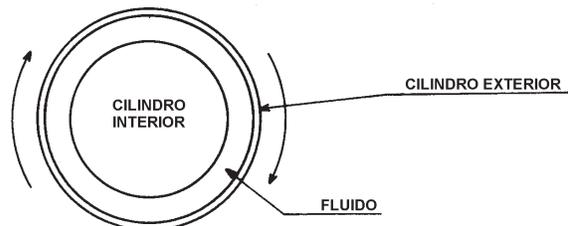


Fig. 9. Aparato para medir la viscosidad. El helio II se encuentra en el espacio entre los dos cilindros. Se hace girar el cilindro exterior observándose que el helio del interior permanece sin movimiento. Lo que prueba que la viscosidad del helio II es cero.

varios fenómenos excepcionales, exclusivos del helio, que se pueden ver a simple vista: el líquido deja de hervir y el helio no se solidifica.

La explicación de la ausencia de ebullición del helio líquido es un fenómeno cuántico y se comprende por la elevada conductividad térmica del helio. Puesto que la aparición de burbujas en un líquido se debe a que la temperatura es mayor cerca de la fuente de calor y que viajan a la superficie para evaporarse. Este fenómeno no puede ocurrir debido a que la temperatura en el helio II es homogénea en todo el fluido.

En el estado superfluido, el helio conduce el calor rápidamente debido a que no tiene viscosidad y fluye sin fricción (ver figura 10). Puede difundirse a través de poros muy finos. Forma una película sobre el cristal y fluye rápidamente sobre la pared. Si se le coloca en un recipiente abierto que contenga helio II que estuviera a menor nivel treparía desde el interior del recipiente rebasando los bordes hasta alcanzar niveles iguales en el interior y el exterior. El helio líquido no hierve a la manera como lo hacen los demás líquidos con burbujas, sino que se desprenden sus capas superiores como láminas o capas.

Otro fenómeno, único del helio líquido, es que su superficie es completamente plana, es decir no

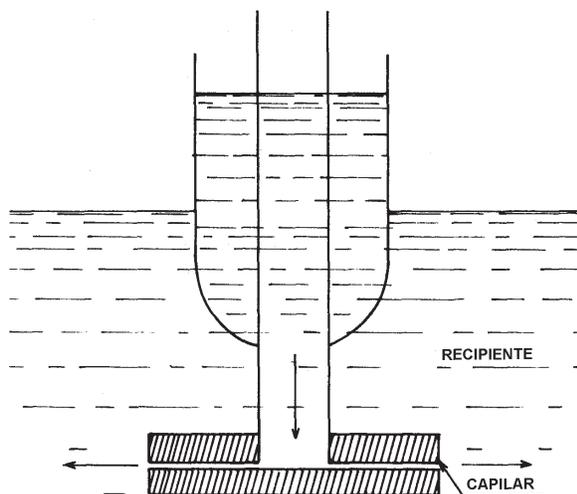
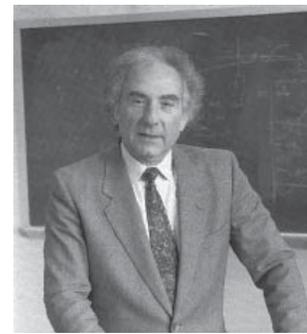


Fig. 10. El capilar tiene un espesor tan pequeño que ningún fluido normal pasaría a través de él. Experimentando con helio I se observa que no fluye por el capilar. Al bajar la temperatura por debajo del punto lambda casi inmediatamente se igualan los niveles de helio en los dos recipientes. La explicación es que el helio pasa al estado superfluido pasando a través del capilar.



Fritz Walter Meissner  
[1882-1974]



Leon Nathan Cooper  
[1930-]

presenta ningún menisco en los bordes, cerca de la pared. Contrariamente a lo que ocurre con cualquier otro líquido, en la parte cercana a la pared aparece un menisco que puede ser cóncavo si el líquido moja la pared, o convexo si no la moja. Esta ausencia de menisco resulta ser una manifestación del fenómeno de la superfluidez. Otra extraña propiedad del helio es que no tiene punto triple, lo que significa que no se solidifica a la presión atmosférica, manteniéndose en estado líquido aún en el cero absoluto. El helio líquido cristaliza solo si se somete a presiones cercanas a las 25 atmósferas.<sup>8</sup>

La viscosidad del helio II se puede determinar midiendo su velocidad de flujo a través de un capilar. Se encuentra que la viscosidad es un millón de veces más pequeña que la que tiene por encima del punto lambda. La viscosidad es una medida de la fricción o resistencia al movimiento o flujo. En el estado superfluido no hay pérdidas de energía por fricción.

## APLICACIONES DE LA CRIOGENIA

La criogenia, la ciencia de las bajas temperaturas, ha encontrado una gran variedad de aplicaciones en la medicina y la industria. Sencillamente observamos que la tecnología de las bajas temperaturas permitió desarrollar la industria de los gases licuados, que a su vez proporciona el soporte técnico para el estudio de las bajas temperaturas.

El oxígeno líquido tiene muchas aplicaciones en la medicina, en el abasto de oxígeno a seres vivos en hospitales, en el espacio y en submarinos. Se le usa en sopletes para cortar y soldar y en propulsión de cohetes.

El hidrógeno líquido es empleado como combustible en cohetes. El nitrógeno líquido se

Tabla I. Cronología de las bajas temperaturas.

AÑO	ACONTECIMIENTO
1787	Tomando como referencia la Ley de Charles para los gases se establece como límite inferior de la temperatura el valor de $-273^{\circ}\text{C}$ .
1865	James Joule establece la diferencia entre los conceptos calor y temperatura. El calor es energía asociada al movimiento de los átomos; la temperatura está relacionada con el promedio de la energía cinética. La temperatura no tiene en principio límite superior, pero el límite inferior corresponde, según se piensa en ese tiempo, a la inmovilidad de los átomos. Esta idea, introducida por Lord Kelvin, fue modificada por la mecánica cuántica, transformándose en el concepto de estado de mínima energía de los átomos, en el cual estos siguen aún vibrando.
1866	James Joule introduce el nombre de Cero Absoluto para la temperatura mínima.
1877	Louis Paul Cailletet observa el fenómeno de que la evaporación produce una disminución de la temperatura, que, dicho sea de paso, es el procedimiento usado en los refrigeradores comerciales actuales. Cailletet desarrolla ese mismo año la técnica conocida como "enfriamiento en cascada" la cual utilizó para licuar los gases permanentes. La técnica de refrigeración en cascada consiste en comprimir el gas, someterlo a enfriamiento por medio de un refrigerante, usualmente un gas líquido, y después permitir la expansión, repitiendo este ciclo una y otra vez.
1893	James Dewar descubre que el mejor aislante térmico es el vacío y empieza a fabricar botellas de doble pared, con un vacío entre ellas, recubiertas en su interior por una película de plata para que reflejaran la radiación. Los vasos de Dewar o vasos de vacío con paredes plateadas para reducir el flujo de calor por radiación, fueron la clave para alcanzar las temperaturas de licuefacción del hidrógeno y el helio.

emplea para transportar órganos para trasplante, para preservación de sangre, en la destrucción de tumores, en algunas técnicas para tratar la enfermedad del parkinson, preservación de semen para inseminación artificial y también en la conservación de alimentos.

Algunos millonarios excéntricos con enfermedades actualmente incurables están dispuestos a someterse a un proceso de congelación en nitrógeno líquido

Tabla II. Fechas importantes en la historia de la criogenia.

AÑO	LOGRO	TEMPERATURA
1820	Se habían logrado licuar gases como el cloro, el amoníaco y otros más con sólo aumentar la presión.	Ambiente
1835	El físico francés Charles Thilorier logró obtener la temperatura más baja registrada hasta entonces en la Tierra, mediante una mezcla de éter y un compuesto de carbón.	$-110^{\circ}\text{C}$
1877	Se obtiene oxígeno líquido	90.2 k
1833	Se obtiene nitrógeno líquido	77.4 k
1898	Se obtiene hidrógeno líquido	20.4 k
1908	Se obtiene helio líquido	4.2 k

para ser descongelados y tratados una vez que se encuentre cura a su problema.

En los viajes espaciales del futuro la congelación de seres humanos, enfriados rápidamente para no destruir las células es probable que llegue a ser una práctica común.

#### APLICACIONES DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

1. En la fusión nuclear, en el dispositivo conocido como Tokamak, donde se requiere el uso de intensos y extensos campos magnéticos para confinar un plasma.
2. En los aceleradores de partículas, los cuales requieren para su funcionamiento el uso de imanes superconductores.
3. En cables superconductores los cuales requieren una cubierta refrigerante.
4. En la transportación por trenes de levitación magnética. Esta tecnología está basada en el uso de bobinas superconductoras fijas en el tren, con corrientes eléctricas intensas. La vía está formada por bobinas convencionales donde se induce una corriente al pasar el tren a alta velocidad, generando campos magnéticos de polaridad opuesta al original, creándose una repulsión entre ambos.

5. Los ahora populares equipos de resonancia magnética nuclear usados en los hospitales utilizan imanes superconductores.

La superconductividad es un fenómeno con un potencial de aplicaciones inmenso, capaz de modificar nuestra forma de vida por el desarrollo tecnológico que puede impulsar. Si se me permite hacer un desvío en este relato e incursionar en la ficción, podría decir que un viajero en el tiempo que viniera del futuro, nos podría contar las maravillas tecnológicas a que dio origen el descubrimiento de la superconductividad y principalmente de los superconductores de alta temperatura.

### COMENTARIOS FINALES

La superconductividad y la superfluidez como lo hemos visto, tienen una historia común, que está asociada a la historia de las bajas temperaturas. El estado superfluido es probable que se encuentre en un tipo de estrellas apagadas conocido como estrellas de neutrones. Un modelo de estas estrellas, que explica satisfactoriamente varios fenómenos observados, supone que en ellas existe un sector de un superfluido de neutrones.<sup>7</sup> El éxito de este modelo fortalece la hipótesis de que en estas estrellas se encuentre una parte del sistema de neutrones en estado de superfluidez.

Aún cuando la tercera ley de la termodinámica establece que no es posible, mediante un número finito de pasos o procesos de enfriamiento, llegar a obtener el cero absoluto de temperatura, los sorprendentes resultados obtenidos a bajas temperaturas ha estimulado a los científicos a continuar la búsqueda de cada vez más bajas temperaturas en el laboratorio.

En los laboratorios de criogenia se ha logrado obtener temperaturas por debajo de una millonésima

de Kelvin, mediante técnicas de enfriamiento magnético. En estas circunstancias, los sistemas elevan su temperatura con solo observarlos, ya que la observación de un sistema implica interactuar con él y esto le comunica energía al sistema elevando su temperatura.

La más baja temperatura en el cosmos es la que corresponde a la de la radiación de fondo y es de 2.7 K. Cuando el ser humano trabaja con temperaturas por debajo de estos valores, se enfrenta a la exploración de la materia en condiciones que no han existido nunca en ningún lugar del universo, excepto en el caso de que otras civilizaciones en algún lugar del universo hayan conseguido realizar experimentos en estas regiones de la escala de temperaturas.

### REFERENCIAS

1. La búsqueda del cero absoluto. K. Mendelssohn. ediciones Guadarrama, (1965).
2. Statistical Thermodynamics. John F. Lee. Addison-Wesley, (1963).
3. Thermal Physics. Ch. Kittel and H. Kroemer. W. H. Freeman Company, (1980).
4. Historia y leyendas de la superconductividad. Sven Ortoli y Jean Klein. Editorial Gedisa, (1990).
5. Los Superconductores. Luis Fernando Magaña Solís. La Ciencia para todos FCE No. 64, (1997).
6. Física, J. D. Wilson. Prentice Hall Hispanoamericana, S. A., (1994).
7. The New Physics. Paul Davis. Cambridge University Press, (1990).
8. Líquidos Exóticos. Leopoldo García Colín y Rosalío Rodríguez. La Ciencia desde México FCE No. 104, (1995).