

Propiedades físicas del helio 4

Antonio Castaño Tierno

Víctor Pablo Galván Chacón

Física Estadística, 4º Física UEX

Mayo de 2010

Índice

Introducción	pág. 4
1.- Propiedades químicas del helio	pág. 5
2.- Propiedades físicas del helio 4	pág. 6
2.1.- Comportamiento a bajas temperaturas	pág.6
2.2.- Comportamiento a temperaturas ultrabajas	pág. 8
2.3.- Propiedades físicas del helio 3	pág. 9
3.- Explicación de las propiedades del helio 4	pág. 10
3.1.- Introducción al gas de Bose	pág. 10
3.2.- El helio 4 como condensado de Bose-Einstein	pág. 11
3.3.- Apuntes sobre el helio 3	pág. 13
4.- Aplicaciones prácticas del helio	pág. 14
Bibliografía	pág. 17

Introducción

El helio es uno de los elementos más abundantes del Universo, pero solo recientemente (desde principios del siglo XX) se han empezado a aprovechar científica y comercialmente sus propiedades, algunas de las cuales no se dan en ningún otro material.

En este trabajo expondremos brevemente cuáles son las características que hacen especial a este elemento, para a continuación intentar dar una explicación, desde el punto de vista de la física estadística, de las propiedades que, a nivel cuántico, determinan el comportamiento del helio 4. Por último, haremos mención a algunos de los usos que este isótopo y el helio 3 tienen en la investigación científica y la industria actual.

1.- Propiedades químicas del helio

El helio (He) es un elemento químico de número atómico 2 y un peso químico estándar de 4.0026. Pertenece al grupo de los gases nobles, situado en la columna 18 de la tabla periódica.

Presenta las propiedades de los gases nobles: es prácticamente inerte, y a temperatura y presión ambiente se presenta como un gas incoloro, inodoro y no inflamable. Es el segundo elemento más ligero (por detrás del hidrógeno), y también es el segundo elemento más abundante del universo observable, representando un 24% de la masa total de nuestra galaxia. Esta abundancia se debe a la presencia del helio como producto en la reacción de fusión del hidrógeno que se produce en las estrellas activas. En la atmósfera terrestre se encuentran trazas de helio debidas a la desintegración radiactiva de algunos elementos, aunque es poco abundante (0.00052% en volumen).

Sin embargo, el helio está presente en depósitos subterráneos, donde se encuentra atrapado junto al gas natural en una proporción de hasta el 7% en volumen, y de donde puede extraerse en cantidades suficientes para su explotación comercial. Estos depósitos de helio se deben a la desintegración radiactiva del torio y el uranio, que emiten partículas alfa He^{2+} que rápidamente se combinan con electrones para dar ^4He en algunas partes de su cadena radiactiva. También hay pequeñas cantidades en manantiales de aguas minerales, gas volcánico, y hierro meteórico.

La abundancia relativa del helio en la Tierra no varía a pesar de su continua producción, ya que la mayor parte del helio atmosférico escapa al espacio.

Existen 8 isótopos conocidos del helio, pero sólo el ^3He y el ^4He son estables, siendo el isótopo 4 un millón de veces más abundante en la atmósfera terrestre que el 3.

Esta diferencia de abundancia se debe a la diferencia en el proceso de formación, ya que el ^4He se produce por desintegración radiactiva, mientras que el ^3He sólo está presente en algunas trazas que datan de la formación de la Tierra, y en otras producidas por la desintegración del tritio.

Es posible producir artificialmente otros isótopos de helio, aunque presentan una gran inestabilidad y rápidamente se descomponen en otras sustancias. El isótopo pesado de menor duración es el ^5He , con un periodo de semidesintegración de 7.6×10^{-22} segundos. El ^6He se descompone emitiendo una partícula beta y su periodo de desintegración es de 0,8 segundos. El ^7He también emite partículas beta así como rayos gamma. Tanto el ^7He y el ^8He se crean mediante algunas reacciones nucleares. El ^6He y el ^8He son conocidos por tener un halo nuclear. El ^2He (que consiste en dos protones y ningún neutrón) es un radioisótopo que se desintegra en protio (isótopo del hidrógeno) por medio de emisión de protones, con un periodo de desintegración de 3×10^{-27} segundos.

2.- Propiedades físicas del helio 4

2.1.- Comportamiento a bajas temperaturas

El helio 4 es un gas a temperatura y presión normales, estado que mantiene hasta aproximadamente los 4.22 K (punto de ebullición a 1 atmósfera de presión). Por debajo de esa temperatura el helio 4 es líquido. Se pueden distinguir dos fases dentro de ese líquido:

-Helio I, entre 4.22 y 2.18 K (punto lambda)

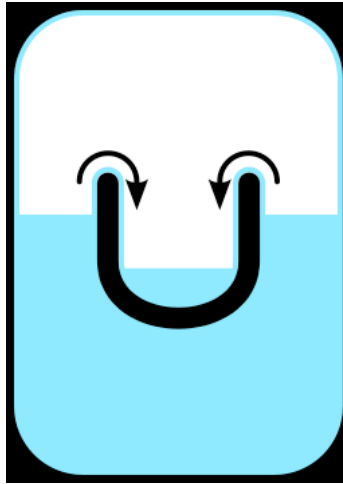
-Helio II, por debajo de 2.18 K

El primero en licuar helio 4 fue Heike Kammerling Onnes, un físico holandés, en 1908. Para ello utilizó el efecto Joule-Kelvin, consistente en obligar al gas a realizar una serie de pasos a través de tabiques porosos en condiciones de adiabaticidad.

Una vez que alcanza el punto de ebullición, el helio pasa a la fase helio I, caracterizada por su pequeñísimo índice de refracción (1.026, más propio de un gas que de un líquido), escasa densidad (0.145 g/ml) y pequeña viscosidad. Sobre estos puntos volveremos más adelante.

Si seguimos reduciendo la temperatura, alcanzamos el punto lambda, 2.18 K. El helio I pasa a ser helio II, en una transición de fase sin ebullición. Esto se debe a la altísima conductividad térmica de esta sustancia: cualquier calentamiento, antes de provocar un gradiente de temperatura, hace que el líquido se convierta casi instantáneamente en gas.

Esta conductividad térmica, que es cientos de veces la del cobre (que, se caracteriza, precisamente, por sus altas conductividades eléctrica y térmica) y millones de veces la de la fase I del propio helio (que ya era alta de por sí), se debe a que el calor se propaga dentro del helio II como una onda, que se mueve a una velocidad del orden de 20 m/s. A diferencia de otros materiales conductores, en los cuales el calor se transmite debido a que hay una banda de electrones libres, en el helio –que carece de dicha banda-, la transmisión se realiza por un mecanismo cuántico, y la conductividad solo depende de la viscosidad.



Esquema de la formación de una película de Rollin

Otra de las propiedades llamativas del helio II es la ausencia de viscosidad que muestra al pasar por capilares estrechos (del orden de 10^{-7} m). Esto contrasta, además, con la existencia de una viscosidad, pequeña pero medible, cuando se hace girar una rueda de paletas en el seno de un baño de helio II. La explicación más aceptada de este fenómeno es que lo que tenemos es una mezcla de átomos en fase II y fase I, y son estos últimos los que hacen que el conjunto tenga viscosidad. En el siguiente apartado veremos que esta solución nos acerca a las predicciones de la física estadística cuántica.

Relacionado con la ausencia de viscosidad antes mencionada, se da en el helio superfluido un fenómeno conocido como *creeping*: el helio “trepa” por las paredes del recipiente en el que se encuentra, buscando cualquier salida, y evaporándose.



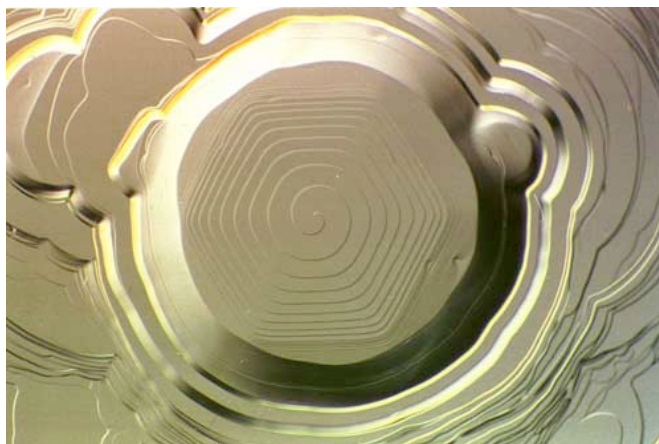
El helio sale del recipiente y forma una gota donde se juntan las películas de Rollin

Al trepar por las paredes, el helio forma una fina capa, de 30 nanómetros de grosor, llamada película de Rollin, por Bernard V. Rollin, uno de los primeros en estudiarla. La superación de obstáculos mediante la formación de estas capas, es conocida como efecto Onnes, por Kammerling Onnes. Lo sorprendente de este fenómeno es que el fluido es capaz de ascender por capilaridad, venciendo la fuerza de la gravedad, pero sin que exista un capilar real. Esto hace que sea muy difícil confinar el helio II ya que, además, puede escapar por prácticamente cualquier poro del material, debido a su pequeño diámetro atómico.

2.2.- Comportamiento a temperaturas ultrabajas

Algunas de las propiedades más reseñables del helio 4 se dan a temperaturas aún más bajas que la del punto lambda, del orden de los milikelvin. Al contrario de lo que ocurre con cualquier otro elemento, el helio no se solidifica a esas temperaturas (que podemos considerar efectivamente como cero), sino que permanece fluido.

Es necesario elevar la presión hasta, al menos, 25 atmósferas, para que, manteniendo la temperatura cerca de 0 K el helio pase al estado sólido. Esto se consiguió por primera vez en 1925, por parte de un alumno de Kammerling Onnes. Sin embargo, ni siquiera en esta situación se comporta como un sólido normal. Es importante señalar, antes de nada, que las propiedades de esta fase del helio (como ocurre, por otra parte, con la mayor parte de sustancias a tan baja temperatura) no han podido ser establecidas de forma definitiva, debido principalmente a la dificultad inherente a trabajar con presiones tan altas cerca del cero absoluto.



Una muestra de helio sólido

Una de las principales y más notables características del helio sólido es que, en gran medida, se comporta como un superfluido. Esto, que a priori parece carente de sentido, es lo que nos permite calificarlo como “supersólido”, y ha traído de cabeza a los físicos desde que se descubrió este comportamiento.

Al hacer girar un sólido corriente, el conjunto de sus constituyentes se mueven solidariamente, girando en torno al eje y manteniendo la distancia entre ellos. Sin embargo, si hacemos girar helio sólido, una fracción de las partículas no se moverá. Mediante un montaje para medir la inercia rotacional del helio podemos comprobar que, cuanto más helio solidifiquemos, menor será esta inercia.

Las implicaciones de los experimentos que se describen en el párrafo anterior son asombrosas: tenemos dos sustancias, la posición de cuyas partículas está fijada en el espacio, que pasan una a través de la otra, sin que se resienta su integridad. Como se ha dicho al presentar esta sección, a día de hoy no es posible explicar satisfactoriamente estas propiedades, pero sí que se han propuesto algunas posibles respuestas, que se verán en el apartado 4.

2.3.- Propiedades físicas del helio 3

Para finalizar con la exposición de las propiedades del helio 4, puede ser interesante mencionar que casi todos los fenómenos descritos (superfluidez, superconductividad, densidad muy baja) se han observado también en el isótopo 3 del helio, aunque a temperaturas más bajas que en el 4. Debido a esto, el desconocimiento sobre este isótopo es mayor, por la dificultad añadida que supone discernir el comportamiento de una y otra fase en rangos de temperatura tan pequeños (del orden de los milikelvin).

El interés del helio 3 no está en estas propiedades, sino en su uso como combustible para reactores nucleares de fusión, que ha llevado a algunas potencias (China y Estados Unidos, principalmente) a plantearse la explotación de las reservas existentes en la Luna, donde es mucho más abundante que en la Tierra. Pero este sería otro tema, muy extenso y rico, para tratar en otra ocasión.

3.- Condensado de Bose-Einstein

3.1.- Introducción al gas de Bose-Einstein

Llamamos bosones a las partículas que tienen spin entero, por oposición a los fermiones, de spin un medio. En consecuencia, un conjunto de partículas de este tipo se conoce como gas de Bose. Igual que pasa con el gas de Fermi, para temperaturas altas y densidades bajas podemos estudiarlo mediante la estadística de Maxwell-Boltzmann, ya que los resultados obtenidos no difieren mucho del modelo de Bose. Sin embargo, si estamos tratando un gas degenerado (baja temperatura o alta densidad), es necesario utilizar la estadística de Bose-Einstein, y tener en cuenta que, a diferencia de los fermiones, los bosones pueden acumularse en un mismo estado cuántico, ya que no están sometidos al principio de exclusión de Pauli.

Aplicando este modelo, y considerando que el número medio de partículas en un estado r es, para los bosones: ¹

$$\langle n_r \rangle = \frac{1}{e^{\beta(\epsilon_r - \mu)} - 1}$$

Para un sistema de N partículas tendremos:

$$N = \sum_r \frac{1}{e^{\beta(\epsilon_r - \mu)} - 1}$$

Y, si el estado de mínima energía es $\epsilon_r=0$, el potencial químico μ será menor o igual que 0.

Si realizamos con el gas de bosones las mismas operaciones que con el de Fermi, acabaremos hallando una temperatura T_0 para la que $\mu = 0$:

$$T_0 = 3.31 \frac{\hbar^2}{k_B m^{5/3}} \left(\frac{Nm}{gV} \right)^{2/3}$$

¹ Aquí solo se muestran algunas expresiones necesarias para nuestro objetivo. El desarrollo completo puede verse de forma más detallada en el libro de Brey, J.J. y otros, *Mecánica Estadística*.

Esto nos permite hallar el número máximo de bosones a una temperatura T , y viene dado por:

$$\frac{N_{m\acute{a}x}}{V} = g \frac{2\pi\sqrt{\pi}}{h^3} (2m^3)^{1/2} \zeta\left(\frac{3}{2}\right) \beta^{-3/2}$$

De aquí se deduce que no puede existir gas de bosones en $T \rightarrow 0$.

Si consideramos que $T \rightarrow 0$ desde el principio, y desarrollamos de nuevo hasta llegar al número máximo de partículas a una temperatura dada, la conclusión que se obtiene es que el número de partículas en el estado fundamental es:

$$N_0 = N \left[1 - \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \right]$$

De esta expresión se sigue que, cuanto más disminuya la temperatura, más partículas habrá en el estado fundamental. Es esto lo que se conoce como condensación de Bose-Einstein: un efecto cuántico en el que las partículas en el estado fundamental se comportan, desde un punto de vista macroscópico, como una sola.

3.2.- El Helio 4 como condensado de Bose-Einstein

Como se indicó en el apartado 1, el Helio 4 es un isótopo del Helio formado por dos neutrones, dos protones y dos electrones. Por tanto, el átomo de Helio 4 tiene spin 0, lo cual lo convierte en un bosón.

De lo anterior se deduce que, si tenemos N partículas de Helio 4, podemos aplicarles las conclusiones obtenidas para un gas de bosones genérico, máxime cuando, al ser un gas noble, las interacciones entre sus átomos son muy débiles.

Es posible, por tanto, calcular la temperatura T_0 del isótopo, y comprobar que, como sugería Landau, coincide con aquella a la que se observa la superconductividad del Helio 4.²

² En el capítulo 7 del libro *Statistical Mechanics*, de Pathria, puede encontrarse una descripción detallada de estas propiedades.

Para ello, partiendo de la expresión a la que llegamos en el apartado anterior, utilizaremos los siguientes valores -experimentales- para los parámetros que nos interesan:

$$m=6.64 \times 10^{-24}$$

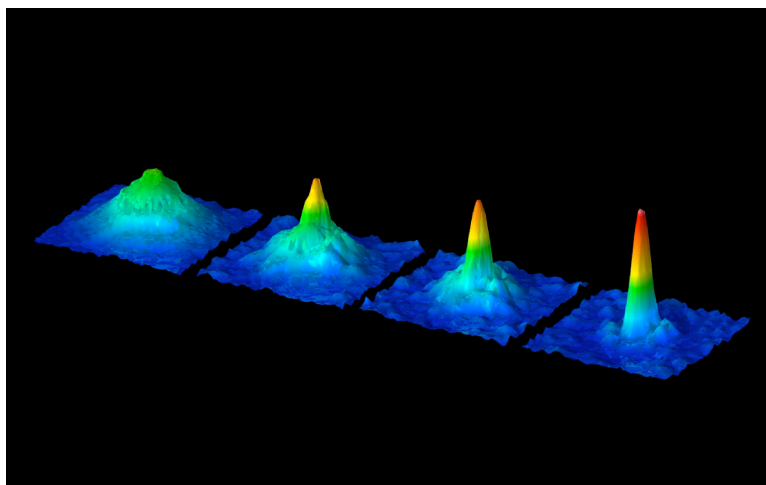
$$Nm/V=0.146 \text{ g/cm}^3$$

$$g=1$$

$$T_0 = 3.31 \frac{\hbar^2}{k_B m^{5/3}} \left(\frac{Nm}{gV} \right)^{2/3} = 3.13 \text{ K}$$

El valor que se obtiene para T_0 es de 3.14 K, muy parecido al que se obtuvo mediante experimentación (2.18 K). Aunque la diferencia relativa entre el resultado teórico y el experimental es grande (un 50%, aproximadamente), hay que tener en cuenta que hemos modelizado el helio líquido como un gas ideal, lo cual, pese a la escasa fuerza de las interacciones, se aleja bastante de la realidad. En cualquier caso, es una buena aproximación, y nos permite empezar a intuir por qué el helio 4, a muy bajas temperaturas, tiene un comportamiento tan extraño: se trata de un condensado de Bose-Einstein, y la temperatura T_0 es aquella a la que una fracción importante de las partículas se encuentran en el estado fundamental, caracterizándose por tanto por una misma función de onda. (nota al pie).

Es su naturaleza de condensado de B-E la que da a este isótopo las propiedades que se describieron en el capítulo 2. Al tratarse de un estado de la materia que las reglas de la física clásica son absolutamente incapaces de explicar, hay que echar mano de mecanismos cuánticos, algunos de los cuales, como el de transferencia del calor, no están completamente explicados, para intentar comprender su comportamiento.



Varias etapas de la formación del condensado de Bose-Einstein.

Se observa que cada vez hay más partículas en el estado fundamental

La superfluidez, por ejemplo, se explica porque todas las partículas en el estado fundamental están descritas por la misma función de onda, luego se comportan como una sola partícula. Esto, evidentemente, hace que no tenga sentido considerar la viscosidad entre ellas.

Relacionado con la superfluidez, pero sin una explicación tan clara, está el carácter de supersólido del helio a más de 25 atmósferas y 0 K. Una propuesta de solución es que las partículas que no están en estado de B-E se mueven a través de los huecos dejados por las que sí están en ese estado. Sin embargo, tanto esta teoría como otras que se han planteado tienen tantos defensores como detractores, y no hay evidencia experimental suficiente como para considerar una claramente superior a las otras.

En cualquier caso, es importante señalar que, en un campo en principio muy teórico, casi todos los avances que se han realizado han sido realizados mediante experimentos, para luego ser refrendados por los modelos teóricos. Esto es así debido a que los efectos de la condensación de Bose-Einstein nos permiten observar efectos que habitualmente se dan a nivel cuántico desde un punto de vista macroscópico, algo completamente inusual.

Por último, aunque no está relacionado con la condensación de Bose-Einstein, señalaremos también que el motivo por el que el helio no solidifica a presión normal y 0 K, como sí lo hacen el resto de los elementos, es que su energía de punto cero, la que

tiene un átomo de helio en el estado fundamental, y que viene dada por $E = \frac{p^2}{2m}$, es mayor que el calor de solidificación, debido a la pequeña masa del núcleo. Esto hace que haya que comprimir enormemente el helio líquido para conseguir solidificarlo.

3.3.- El helio 3 como condensado de Bose-Einstein

Ya se ha dicho anteriormente que el helio 3 presenta algunas de las propiedades del helio 4, pero a temperaturas mucho menores. Esto se debe a que, pese a tener spin un medio, al bajar la temperatura los átomos de helio se agrupan de dos en dos, comportándose cada pareja como si de un bosón se tratase.

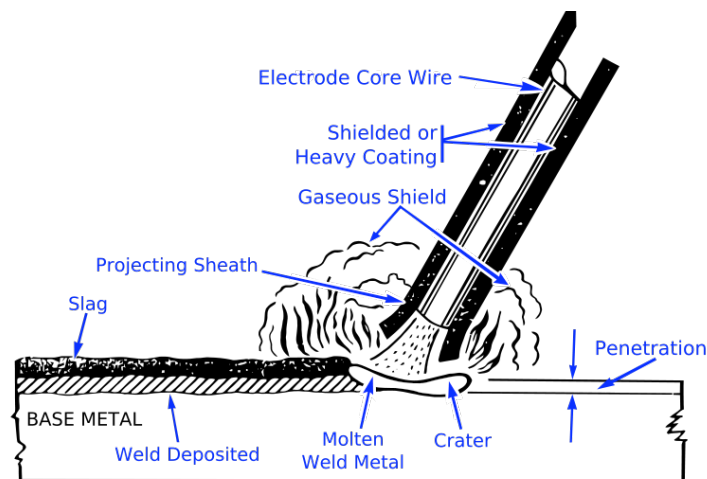
Por tanto, se condensan también, pero a temperaturas del orden de los milikelvin. Su estudio, por tanto, es mucho más complejo. Sin embargo, fue este isótopo el que permitió confirmar la existencia de un nuevo estado de la materia ya que, de haber aparecido solo en el caso del helio 4 podría haberse achacado a una anomalía propia del elemento, y no a un hecho predicho por la teoría de Bose-Einstein.

4.- Utilidades y aplicaciones del helio

Las aplicaciones del helio se basan fundamentalmente en dos de sus características: por un lado sus propiedades como gas noble le dan utilidad en todos aquellos dispositivos que precisan del uso de un gas inerte, y por otro lado su naturaleza de condensado de Bose-Einstein a bajas temperatura le confiere multitud de utilidades, gracias a su superfluidez y superconductividad

El helio es más ligero que el aire, y tiene la ventaja de no ser inflamable, por lo que se utiliza como gas de relleno en globos y zeppelines, como pueden ser los utilizados en investigación meteorológica, reconocimiento del terreno en operaciones militares o campañas de publicidad.

Se emplea mezclado con el oxígeno en las botellas de inmersión, ya que el helio es menos soluble en la sangre que el nitrógeno y se difunde 2.5 veces más deprisa que este, lo que ayuda a reducir el tiempo necesario para la descompresión.



Soldadura por arco eléctrico

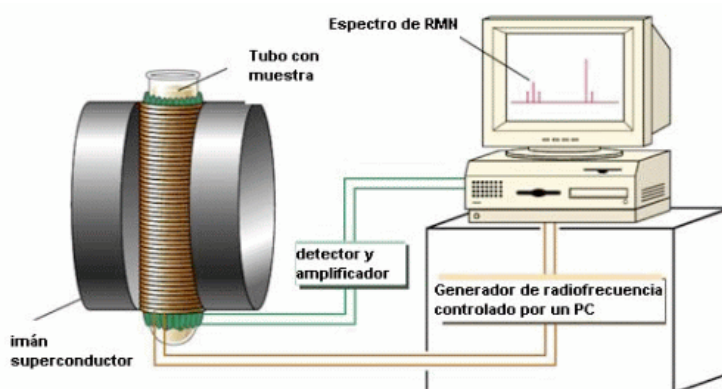
En la soldadura por arco eléctrico con electrodo no consumible se utiliza una atmósfera inerte de helio. Este tipo de soldadura se caracteriza por la creación y el mantenimiento de un arco eléctrico entre un electrodo y la pieza que se pretende soldar. Para evitar que el electrodo, generalmente fabricado de tungsteno, reaccione con el oxígeno y el nitrógeno del aire se le inyecta un chorro de gas inerte que impida la producción de estas reacciones. El helio está especialmente indicado para este uso dada su escasa solubilidad en los metales fundidos. Por el mismo motivo, también se utiliza en la fabricación de componentes de germanio y silicio ultrapuros debido a su inactividad.

Se utiliza también en equipos láser, principalmente en la mezcla helio-neón, como medio a través del cual las descargas iniciales de electrones se transmiten y amplifican hasta excitar el neón, que es el gas activo del láser.

Otro uso del helio es como refrigerante en reacciones nucleares en los reactores de grafito-gas de alta temperatura (HTGR) para llevar el calor generado hasta un intercambiador de calor exterior, y también en naves espaciales y telescopios espaciales de infrarrojos (como el Spitzer).

Debido a su naturaleza de gas ideal, su alta velocidad de transmisión del sonido y su alto coeficiente de expansión adiabática se utiliza en túneles de viento supersónicos y en aquellas instalaciones de prueba en las que se requiere una liberación súbita de la energía del gas.

Tiene una importantísima relevancia en la resonancia magnética nuclear, donde imanes superconductores son los encargados de crear el campo magnético, ahorrando una gran cantidad de energía eléctrica. El helio actúa como refrigerante de la bobina magnética superconductora; dado su punto de ebullición cercano al cero absoluto, y que no solidifica salvo cuando se le somete a altísimas presiones, resulta ideal como refrigerante líquido para este uso. Además, al ser un superconductor térmico, los gradientes de temperatura que aparecen en el seno del refrigerante son mucho menores que para otros materiales.



Esquema de un aparato de resonancia magnética. Puede verse que la muestra (o el paciente) se sitúa entre dos bobinas superconductoras.

El helio también ha jugado un papel fundamental en la construcción de electroimanes más potentes para los aceleradores de partículas, que consiguen campos magnéticos extensos del orden del Tesla. Estos campos magnéticos no

podrían crearse sin la refrigeración por helio, es decir, sin que la bobina alcanzase la temperatura del superconductor, ya que por un lado requeriría un suministro de energía eléctrica imposible de conseguir, y por otro, el material metálico de la bobina se fundiría al ejercer resistencia al paso de la corriente eléctrica.

En la imagen superior vemos algunos de los tanques de almacenamiento de helio en el CERN.

Por último, el uso de helio líquido en la refrigeración de sondas de medición de corriente eléctrica, tensión y campo magnético ha permitido hacerlos mucho más sensibles a las variaciones de estas magnitudes.



Ocho bobinas superconductoras en uno de los dispositivos de medición del LHC.

Bibliografía

- Mecánica Estadística*, Brey, J.J. y otros autores. Cuadernos de la UNED.
- Statistical Mechanics*, Pathria, R.K. Butterworth-Heinemann

- Artículos sobre Helio, Energía de punto cero y Helio 3 en la versión inglesa de Wikipedia (http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page)
- Los supersólidos vistos desde una nueva luz* (<http://www.cienciakanija.com>)
- Kamerlingh Onnes, la superconductividad, la superfluidéz y el universo de las bajas temperaturas*, Justo R. Pérez, Universidad de La Laguna, Tenerife

- Collective Excitations of a Bose-Einstein Condensate in a Magnetic Trap*, M.-O. Mewes et al., Physical Review Letters, Vol. 77, N. 6

- Experimental Investigations of He II Heat Transfer through a Short Section of LHC Inner Triplet Quadrupole Heat Exchanger*, Ch. Darve et al., FERMILAB-TD-00-066

- Sorta Superfluid*, Kristin Leutwyler (Scientific American)

- A Glimpse of Supersolid: Solid helium can behave like a superfluido*, Graham P. Collins (Scientific American)