

MEDIO SIGLO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS Y UN
SIGLO DE SUPERCONDUCTIVIDAD

Miguel Kivi Tichauer

MIGUEL KIWI TICHAUER

Es Premio Nacional de Ciencias Exactas 2007. Ingeniero mecánico de la Universidad Técnica Federico Santa María y Doctor en Física por la Universidad de Virginia. Ha sido distinguido con la beca Guggenheim y obtuvo el Premio de la Crítica por la exposición “Estética en las ciencias”. Es miembro de número de la Academia Chilena de Ciencias y ha sido dos veces presidente de la Sociedad Chilena de Física. Actualmente es Profesor Titular del Departamento de Física de la Universidad de Chile.

MEDIO SIGLO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS Y UN SIGLO DE SUPERCONDUCTIVIDAD

INTRODUCCIÓN

Las actividades del ser humano tienen asociado el concepto de eficiencia, la que nunca alcanza el 100%. Por ello la superconductividad, que consiste en establecer una corriente eléctrica sin pérdida alguna de energía (rigurosamente 100% eficiente), resultó tan asombrosa que incluso a sus descubridores les costó convencerse de lo que habían encontrado. El nombre que está asociado a este portentoso descubrimiento es el del holandés Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) y sucedió hace más de un siglo, para ser más precisos, el 8 de abril de 1911. Con todo lo notable del descubrimiento de la superconductividad, en ese día se dieron todavía más sorpresas (que presentaremos más adelante), las cuales marcaron profundamente la física del siglo XX. Pero vamos por pasos y comencemos por Kamerlingh Onnes. Fue él quien desarrolló un concepto que hoy nos parece (al menos a los científicos) algo natural: un laboratorio moderno, con un espacio de uso exclusivo, con técnicos y taller mecánico y electrónico. El área en que concentró su interés fue la de muy bajas temperaturas, vale decir, temperaturas cercanas al cero absoluto. De hecho, la hazaña que lo llenó de felicidad y gloria fue licuar el helio (He), lo que sucede a 4.16 K (-269°C). Ello tuvo lugar el 10 de julio de 1908 y abrió una nueva especialidad: la de la física de bajas temperaturas. Si hoy alcanzar 270°C bajo cero no es exactamente una trivialidad, no cuesta mucho imaginar las dificultades que Onnes debió vencer para lograrlo hace más de un siglo.

Antes de 1908 la temperatura más baja que se lograba alcanzar era de 14 K (-259 C), que corresponde a la solidificación del hidrógeno a una presión reducida. Todo lo relacionado con el He es excepcional. Es el gas noble de estructura atómica más simple (núcleo de carga +2 y 2 electrones de carga -1 girando alrededor de ese núcleo). Fue encontrado antes en el sol que en la Tierra (en 1868 por el astrónomo Joseph Lockyery, quien lo “bautizó” con ese nombre ya que sol es helios en griego). Es el único elemento de la tabla periódica que a presión atmosférica se mantiene líquido hasta el cero absoluto debido a su pequeña masa (4 unidades de masa) y que es químicamente inerte, debido a su capa electrónica externa completa. De hecho, para solidificarlo hay que aplicarle, a temperaturas cercanas al cero absoluto, una presión de 25 atmósferas. Y además se vuelve superfluido por debajo de una

temperatura de 2.2 K (superfluidez significa viscosidad nula. En otras palabras, es capaz de escurrir a través de los poros más insignificantes). Una vez licuado el He, Onnes comenzó a medir la resistencia eléctrica de los materiales con el propósito de establecer un método para medir bajas temperaturas. Eligió para ello el mercurio (Hg), aparentemente porque alambres muy delgados de Hg no se fracturaban a esas temperaturas. Ahora bien, en esa fecha se desconocía el comportamiento de la resistividad eléctrica de los metales como función de temperatura en la vecindad del cero absoluto. Se aceptaba en esos días que la resistividad se originaba en las colisiones entre los electrones, responsables de la conducción eléctrica, y los iones del metal que vibran alrededor de sus posiciones de equilibrio en la red cristalina. Sin embargo, Lord Kelvin sugirió que la movilidad de los electrones disminuiría más rápidamente que las colisiones y, por lo tanto, que la resistividad a bajas temperaturas sería infinita. Onnes, por su parte, pensaba que la resistividad disminuiría linealmente con la temperatura hasta volverse nula a 0 K. Claramente las opiniones estaban ampliamente divididas; variaban nada menos que entre cero e infinito.

En ese contexto se planteó la medición de la resistividad como función de temperatura del Hg, la que presentaba una enormidad de sutiles problemas técnicos que simplemente ignoraremos, pero que explican la razón de los tres años entre la licuefacción del He y el descubrimiento de la superconductividad. Ello permitió que se tejiera un abundante folklore que a la postre resultó totalmente falso. Las historias de los grandes descubrimientos siempre van asociadas a este tipo de leyendas, las que afortunadamente a veces son dilucidadas, como en este caso específico.

Se decía que no había sido Onnes sino uno de sus ayudantes el que tropezó con el descubrimiento, pero el origen de ésta y otras leyendas es la forma en que se escribieron los protocolos de laboratorio. Resulta que los escribió Onnes en cuadernos de colegio ordinarios, a lápiz, en holandés, con una letra espantosa. Además, uno de esos cuadernos, crucial, que cubriría el período entre fines de 1910 y mediados de 1911, parece haberse perdido. Sin embargo, muy recientemente los holandeses Dirk van Delft y Peter Kes se dieron el trabajo de desentrañar estos protocolos de laboratorio y encontraron en ellos que el 8 de abril de 1911, a las 4 PM, la medición de la resistencia del mercurio había sido descrita como “prácticamente nula” (en holandés, *Kwik nagenoeg nul*). Este resultado fue reportado el 26 de octubre de 1911 a la *Royal Academy of Arts and Sciences* y se ilustra en la Fig.1.

Ese mismo 8 de abril ellos observaron y registraron el hecho de que antes de alcanzar la temperatura más baja (aproximadamente 1.8 K) repentinamente el He dejaba de hervir. Sin darse cuenta habían visto, por vez primera y en un solo día, las dos transiciones de fase cuánticas más relevantes: superconductividad y superfluidez. De hecho, no podían entender la importancia de lo que descubrieron, dado que la mecánica cuántica se perfeccionó recién en la década de 1920. No sospecharon ni

podían imaginarlo que sus observaciones de ese día marcarían fuertemente toda la física del siglo XX. Muchos años más tarde, durante las décadas de los cincuenta y sesenta, emergió una comprensión robusta y adecuada de las propiedades de los superconductores metálicos. Para la superfluidez del He, en cambio, todavía hoy no contamos con una explicación completamente satisfactoria. Pero nos estamos adelantando a nosotros mismos.

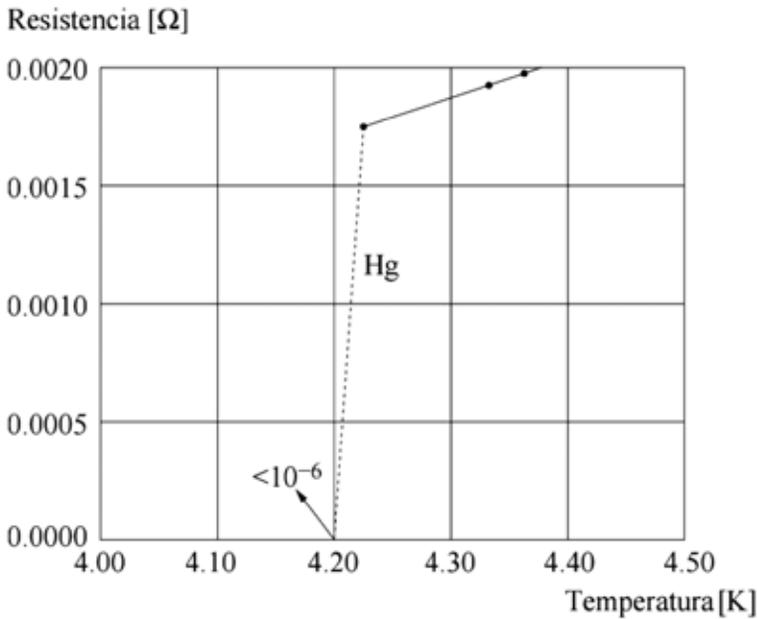


Figura 1: Resistencia de Hg vs. temperatura. Aproximadamente a 4.2 K, y dentro de apenas un centésimo de grado, la resistencia pasa a ser “prácticamente nula”.

En física es muy difícil verificar que una cantidad es rigurosamente nula. Más bien se establecen cotas para ella, es decir, se logra precisar que tal o cual parámetro es menor que un determinado valor. Surge entonces naturalmente la pregunta: ¿es verdaderamente nula la resistividad de un superconductor? Onnes también enfrentó este desafío, haciendo circular una corriente por un anillo superconductor y determinando que no se detectaba disminución alguna de la corriente en un lapso de tres años. Hoy en día se ha logrado establecer que el lapso es de al menos 100.000 años. Así, la resistividad de un superconductor es, para todos los efectos, “prácticamente nula” (*Kwik nagenoeg nul*). Y si no es nula, su valor es ínfimo y solo medible en tiempos astronómicos.

Poco después de verificar la resistividad “prácticamente nula” del Hg, el mismo Onnes se percató de que un campo magnético externo $H > H_c$, donde H_c es el campo crítico, destruye el estado superconductor. Para él fue una gran desilusión, pues se había propuesto aprovechar el fenómeno para generar campos magnéticos intensos. Afortunadamente estos son posibles de obtener con los materiales superconductores que conocemos hoy.

Un conductor perfecto no permite que el campo magnético en su interior varíe debido a una de las ecuaciones de Maxwell que gobiernan la electrodinámica. Es decir, si su temperatura es reducida por debajo del valor crítico, el campo magnético quedaría atrapado en su interior. Pero si se aplica el campo una vez que el material se encuentra a una temperatura $T < T_c$ éste es expulsado del superconductor. Esto es insostenible, dado que tendríamos dos estados de equilibrio termodinámico distintos dependiendo de la historia y los estados de equilibrio son independientes de la historia. Este problema fue resuelto recién 20 años más tarde (1933) por Meissner y Ochsenfeld, quienes observaron experimentalmente que la transición superconductor siempre lleva asociada la expulsión del campo magnético, tal como se ilustra en la Fig. 2. Por ello, el estado superconductor es descrito por dos ecuaciones igualmente importantes, a saber, resistividad nula y permeabilidad magnética nula.

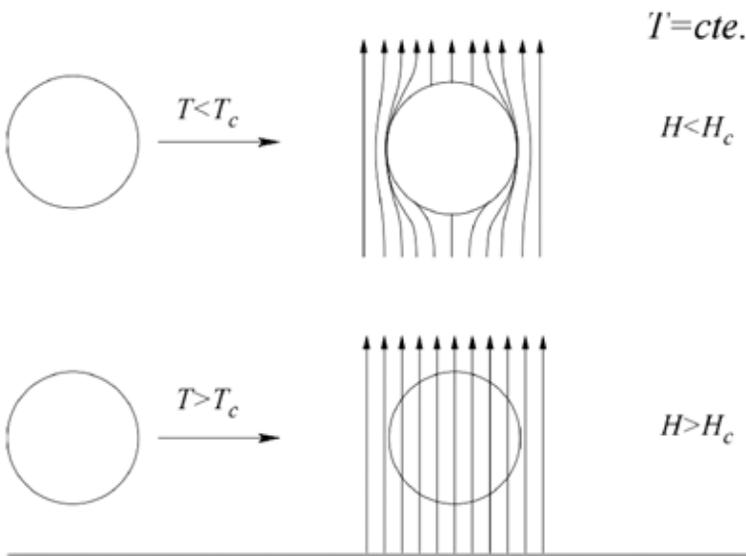


Figura 2: Expulsión del campo magnético asociado a la transición superconductor. Esta transición ocurre a la temperatura crítica $T < T_c$ o cuando el campo magnético excede el valor crítico H_c . Al lado derecho de la figura se indica lo que sucede a temperatura $T < T_c$ constante para campos magnéticos menores y mayores al campo crítico H_c .

La termodinámica de los superconductores, incluyendo la descripción del efecto Meissner, fue desarrollada por Gorter y Casimir, y la electrodinámica, por los hermanos Fritz y Heinz London en los años treinta. Pero además Fritz London, en sus libros *Superfluids*, vol. I y II, intuyó que tanto la superconductividad como la superfluidad del He eran “fenómenos cuánticos que se pueden ver a ojo desnudo”. Esta conjetura, que con el tiempo se comprobó, constituyó un salto conceptual de gran magnitud, ya que la idea prevalente era que la mecánica cuántica solo se aplicaba a átomos y moléculas, pero no a objetos macroscópicos. Tratándose de un fenómeno cuántico, Fritz London también conjeturó que el flujo magnético atrapado por un anillo superconductor estaría cuantizado en unidades de hc/e , donde h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz y e la carga del electrón. Esta conjetura también resultó correcta, pero por motivos que London no podía vislumbrar: la unidad de flujo resultó ser $hc/2e$, vale decir, la mitad del valor que él predijo.

Ciertamente, un fenómeno tan espectacular como la superconductividad constituyó, a partir de su descubrimiento, un desafío tremendamente atractivo al que no escaparon los más destacados físicos de la primera mitad del siglo XX. El mismo Onnes intentó dar una explicación que, examinada con los conocimientos que tenemos hoy, resulta bastante pintoresca, pero completamente errónea. Durante ese tiempo la formulación de una teoría microscópica del fenómeno se constituyó en algo así como intentar la conquista del Everest. Los nombres de los que trataron y fallaron incluyen a físicos de la talla de Einstein, Landau y Dirac, por mencionar solo a unos pocos. Por otro lado, nuevos experimentos iban enriqueciendo las pistas que permitirían desarrollar una teoría exitosa. Entre estos resultó ser crucial una carta, de apenas media página, al editor de *Physical Review*, con el título “*Mass Dependence of the Superconducting Transition Temperature of Mercury*”. En esta publicación se reporta que la temperatura crítica T_c del Hg es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa del isótopo que constituye el material. Ello señala que los iones juegan un rol crucial en la superconductividad y que no se trata de un fenómeno puramente electrónico, como se pensaba hasta entonces.

Esta evidencia experimental apunta en la dirección de la interacción entre las vibraciones de la red cristalina y la nube electrónica (la interacción electrón-fonón) como el mecanismo generador del fenómeno, y el que mejor conocía esta interacción era el notable John Bardeen. Ya famoso, entre otros motivos por la invención del transistor, era entonces profesor de la Universidad de Illinois en Urbana. En 1953 comenzó una cuidadosa revisión de la literatura sobre teoría de superconductividad que eventualmente, en 1956, tomó la forma de un exhaustivo artículo sobre el tema (de unas 100 páginas) en el “*Handbuch der Physik*”. Simultáneamente llegó a Urbana desde el Massachusetts Institute of Technology (MIT), gracias a una oferta

que lo invitaba a trabajar con Bardeen, un estudiante recién licenciado llamado John Robert Schrieffer. Él había postulado a varias universidades en búsqueda de “estudios graduados que le permitieran flexibilidad para creatividad individual”, de modo que quedó en feliz estado de shock ante su buena fortuna. A comienzos de 1955 Bardeen buscó un posdoctorado familiarizado con las técnicas avanzadas “más a la moda” de teoría de campos, de las que sentía que le quedaban cosas por aprender. Chen Ning Yang (Premio Nobel 1957) le recomendó a Leon Cooper, que a la sazón era un posdoctorante en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Cooper se demoró un par de meses en aceptar la oferta, manifestando que no creía que la teoría de campos fuera útil para explicar superconductividad, pero que estaba listo para dejar Princeton. Con ellos dos (Cooper y Schrieffer) Bardeen se puso en camino para intentar desarrollar la teoría microscópica de superconductividad. Bardeen estructuró su equipo usando el modelo social de una familia, en que cada uno ayudaba, exploraba y sufría las consecuencias de sus actos. Asignaba tareas y motivaba, usando los talentos que distinguían a cada cual, con la instrucción de usar “el arma de menor calibre posible capaz de matar al monstruo”.



Figura 3: De izquierda a derecha: Leon Cooper, John Bardeen y John Robert Schrieffer en 1972.

A fines de 1955 Cooper exploró el problema de dos electrones con una interacción atractiva justo fuera de un mar de Fermi, para determinar bajo qué condiciones podrían generar el efecto Meissner. Encontró que un par de electrones de momentum

y spin opuesto formaban un estado ligado con una energía definida y separado por una brecha del continuo de estados del mar de Fermi. Si bien este aporte se limitaba a la interacción de dos electrones, sugería la posibilidad de un estado fundamental formado por pares.

A fines de 1956 el trío estaba un tanto “bajoneado” debido a que las cosas no iban a la velocidad que esperaban. El 1 de noviembre Schrieffer se encontró con Bardeen en la calle y cruzaron algunas palabras. Al despedirse, Bardeen sonrió y con su proverbial humildad le dijo: “quisiera mencionar que hoy gané el Premio Nobel” (por la invención del transistor en 1947). Las celebraciones del premio durante diciembre de 1956 retrasaron los avances del trío en la teoría de superconductividad. De hecho, Schrieffer jugó con la idea de cambiar de tema de tesis dado que llevaba casi cuatro años y tenía dudas de poder graduarse pronto. Bardeen le pidió “que le diera otro mes... quizás algo suceda”.

A fines de enero de 1957 Schrieffer y Cooper partieron al este de EE.UU. para participar en varias conferencias. En esa ocasión, y mientras viajaba en metro, Schrieffer escribió la función de onda del estado fundamental del superconductor. Apenas ambos regresaron a Urbana fueron donde Bardeen, quien comentó “que realmente había algo ahí” y poco después les preguntó: “¿qué les parece que juntos escribamos un *paper* sobre superconductividad?” A ello siguieron semanas de trabajo febril que partían diariamente a las 7 AM. A mediados de febrero escribieron una carta al editor de *Physical Review* en la que anunciaban su teoría y bosquejaban sus elementos esenciales. Finalmente, las maratónicas jornadas de trabajo dieron su fruto y el 8 de julio de 1957 enviaron el manuscrito definitivo, con el simple pero formidable título “Teoría de superconductividad”, el que ocupó nada menos que 30 páginas del *Physical Review*.

La teoría, bautizada como BCS por las iniciales de los autores, calzaba con prácticamente todos los experimentos conocidos a la fecha y predijo correctamente nuevos resultados. El “Everest” había sido finalmente conquistado. Su impacto se extendió mucho más allá de la física de la materia condensada, abriendo nuevos horizontes en otras áreas, como física nuclear y astrofísica. La superconductividad se convirtió en un foco de atención, tanto desde el punto de vista teórico como experimental. En 1972 Bardeen, Cooper y Schrieffer compartieron el Premio Nobel. Bardeen es el único en la historia que, a la fecha, ha recibido dos Premios Nobel de Física.

La teoría de BCS nada dice sobre la magnitud de la temperatura crítica, y si bien con miras a aplicaciones prácticas se desarrollaron ingentes esfuerzos para encontrar metales con altos valores de T_c , el progreso fue bastante limitado. De hecho, como se ilustra en la Fig. 4, entre el descubrimiento de Onnes en 1911 y mediados de los años 70, el valor máximo de T_c se incrementó apenas de 4.2 a

25 K. Así las cosas, la actividad en el campo de la superconductividad comenzó lentamente a declinar, pero en 1986 se produjo un descubrimiento de gran trascendencia, que como muchos de los descubrimientos trascendentales se dio en un contexto totalmente inesperado. La búsqueda de materiales superconductores de alta T_c se había circunscrito a los metales. Por ello, cuando Bednorz y Müller reportaron indicios de superconductividad en materiales cerámicos a temperaturas mayores a 30 K el anuncio fue recibido con bastante escepticismo. Pero al verificarse experimentalmente que la noticia era cierta, rápidamente en todos los confines se desató una verdadera explosión de entusiasmo y la consiguiente investigación exhaustiva de estas cerámicas. En un tiempo mínimo se llegó a valores de T_c mayores que 100 K, bastante por encima de la temperatura del nitrógeno líquido, lo que parece abrir la puerta a interesantes aplicaciones tecnológicas.

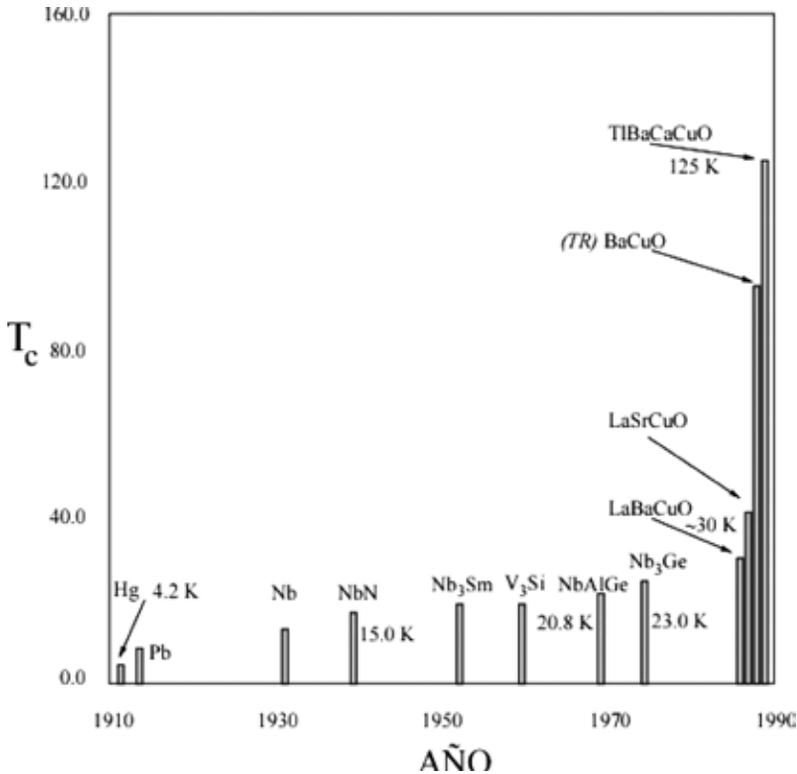


Figura 4: Valores máximos de la temperatura crítica T_c a través de los años. TR denota elementos de las tierras raras.

Sin embargo, hasta ahora las aplicaciones prácticas de la superconductividad han sido menores que las expectativas que repetidamente se han barajado. Si bien existe

la factibilidad técnica de redes eléctricas superconductoras sin disipación de energía, lo que es bastante atractivo dado que el 10% de la potencia generada se pierde en las líneas de transmisión, ello no se ha implementado por su vulnerabilidad. En efecto, dada la sofisticación y el costo de este tipo de líneas, solo se justifican para transmitir potencias grandes, por ejemplo, toda la que se requiere para alimentar una ciudad. Ello implica que un accidente o un atentado traerían consecuencias demasiado serias. De hecho, las aplicaciones de superconductividad se han dado más bien en el área de los campos magnéticos intensos. Por ejemplo, los imanes de los aparatos de resonancia magnética nuclear para fines de diagnóstico médico son superconductores, dado que solo ellos pueden cumplir con los requerimientos necesarios de intensidad, uniformidad y estabilidad en el tiempo del campo magnético. También se usa para levitar los carros sobre los rieles de trenes de alta velocidad (trenes bala).

Ya casi medio siglo atrás el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile también se hizo parte de la aventura de investigar, experimental y teóricamente, el fenómeno de la superconductividad. A fines de la década de 1960 y comienzos de la del setenta se instaló un laboratorio de bajas temperaturas en Las Palmeras, donde ya se encontraba funcionando un acelerador de partículas (ciclotrón), además de precarios edificios “provisorios”, que siguen en uso a esta fecha y que con el tiempo dieron nacimiento al Campus Juan Gómez Millas. En efecto, se consiguió en ese tiempo licuar He3, alcanzando por primera vez en América del Sur temperaturas de 0.3 K. Ello permitió, de manera pionera, generar publicaciones relevantes en revistas internacionales de alto impacto. Desafortunadamente, el laboratorio fue gravemente impactado por los acontecimientos de septiembre de 1973, sin lograr el desarrollo que prometía alcanzar.

Un sello característico de la ciencia es su carácter impredecible. A diferencia de otros descubrimientos científicos, aparentemente de poco interés práctico pero que se convirtieron en grandes industrias, la superconductividad parece ofrecer una enorme gama de potenciales aplicaciones que solo se han materializado parcialmente. Sin embargo, a más de un siglo de su descubrimiento, el fenómeno de la superconductividad no deja de sorprendernos. Desde el punto de vista conceptual constituye un salto adelante verdaderamente portentoso, en parte por ser la primera actividad conocida para el ser humano que se desarrolla con 100% de eficiencia. Pero también por ser uno de los pocos fenómenos cuánticos macroscópicos (es decir, que se percibe a “ojo desnudo”), y por la hazaña científica que significa el haber logrado su comprensión. Ciertamente, a nivel personal, resulta muy gratificante haber podido participar, desde la Facultad de Ciencias cuya mitad de siglo hoy celebramos, en esta magnífica aventura.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo del Fondo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (FONDECYT #1120399 y #1130272) y de CEDENNA (Financiamiento Basal para Centros Científicos y Tecnológicos de Excelencia).

REFERENCIAS

- [1] D. van Delft y P. Kes, *Phys. Today*, 63, (número 9), 38 (2010).
- [2] W. Meissner y R. Ochsenfeld, *Naturwissenschaften* 21, 787 (1933)
- [3] C. J. Gorter y H. Casimir, *Physica* 1, 306 (1934).
- [4] F. London y H. London, *Proc. Roy.Soc. (Londres)* A 149, 71 (1935).
- [5] F. London, *Superfluids*, vol. I y II, Dover Publications, Inc. (New York) 1961.
- [6] F. London, *Superfluids*, vol. I, pág.152, Dover Publications, Inc. (New York) 1961.
- [7] B. Serin, C. A. Reynolds y L. B. Nesbitt, *Phys. Rev.* 79, 761 (1950).
- [8] L. N. Cooper, *Phys. Rev.* 104, 1189 (1956).
- [9] J. Bardeen, L. N. Cooper y J. R. Schrieffer, *Phys. Rev.* 108, 1175 (1957).
- [10] G. Bednorz y K. A. Müller, *Z. Phys.*B 64, 189 (1986).
- [11] C. A. Luengo, J. G. Huber, M. B. Maple y M. Roth, *Phys. Rev. Letters* 32, 54 (1974).
- [12] M. Kiwi y N. Majlis, *Phys. Rev. B* 3, 2962 (1972).
- [13] R. Ferrer, M. Kiwi y M. J. Zuckermann, *Phys. Lett.* 34 A, 399 (1971).
- [14] J. Rössler y M. Kiwi, *Phys. Lett.* 38 A, 371 (1972).