

La superconductividad eléctrica

Por FIDEL ALSINA FUERTES

Instituto de Física, La Plata

LA LIQUEFACCIÓN DEL HELIO

EN 1908, en la pequeña ciudad universitaria holandesa de Leiden, el fundador del famoso Laboratorio Criógeno, Heike Kamerlingh Onnes, consiguió licuar el último de los denominados gases permanentes. Coronando una serie de experiencias comenzada unos veinte años atrás, obtuvo, empleando el proceso Joule-Thomson en una máquina refrigerada con hidrógeno licuado, el helio en forma de líquido de muy baja densidad, con un punto de ebullición 269° más bajo que el cero centígrado, o sea a 4.22° Kelvin, o absolutos.

Este notable triunfo experimental abrió en seguida la posibilidad de obtener temperaturas aún más bajas, con sólo mantener el helio en ebullición a presiones inferiores a la normal. Un equipo adecuado de bombas para aspirar con la rapidez necesaria los vapores de helio, permitió conseguir con relativa facilidad baños termostáticos con temperaturas entre 4.22°K y aproximadamente 1°K . El límite inferior estaba dado por la capacidad de las bombas.

LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Aparte de los problemas vinculados con la obtención misma de las bajas temperaturas, pronto aparecieron otros referentes al comportamiento de la materia en la nueva gama térmica accesible. Uno de los problemas que orientaron la investigación inmediata fué el termométrico, esto es, la necesidad de medir esas mismas temperaturas recién alcanzadas.

Si bien es posible emplear directamente un termómetro de gas —llenado con

helio a muy baja presión inicial para impedir su condensación— es conveniente y a veces imprescindible, disponer de termómetros secundarios más pequeños y cómodos de operar. Una propiedad cualquiera de la materia que sea dentro de ciertos límites función unívoca de la temperatura absoluta puede, en principio, servir de fundamento para la realización de un termómetro; la resistencia eléctrica de los metales puros, que cumple a las temperaturas habituales esa condición, tenía además otras ventajas —comodidad de medida sobre todo— que la señalaban como la propiedad indicada para uso termométrico.

Poco después de conseguida la liquefacción del helio, emprendió K. Onnes el estudio de la variación de la resistencia eléctrica de alambres metálicos introducidos en los termostatos. Como en todos los metales la resistencia aumenta al aumentar la temperatura, era de esperar que al ir enfriando las muestras metálicas su resistividad fuese gradualmente disminuyendo, aproximándose poco a poco al valor cero que la teoría electrónica de la conducción predecía para el inalcanzable cero absoluto.

Pero la resistencia eléctrica de un metal está muy influenciada por las impurezas químicas y aún por las tensiones mecánicas, de modo que los ensayos habían de hacerse con un metal fácil de purificar y fácil de fundir, para obtener así por enfriamiento lento alambres libres de tensiones. La elección recayó en el mercurio.

En mayo de 1911, Onnes dió a publicidad el resultado de sus mediciones sobre la resistividad del mercurio a bajas temperaturas. En contra de todo lo su-

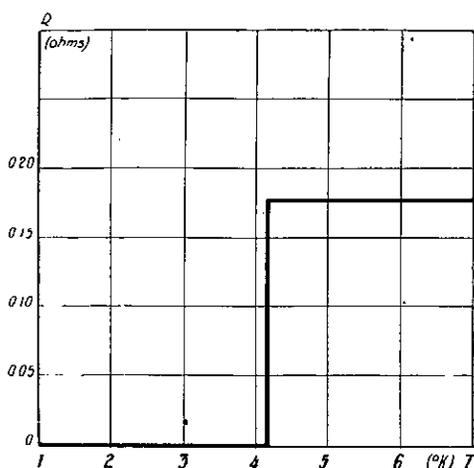


FIG. 1: Curva esquemática que representa la resistencia de un alambre de mercurio entre 1° y 7° K.

En las experiencias de Onnes la intensidad de la corriente de medida que recorría el mercurio alteraba un poco la forma de la curva. La figura representa una extrapolación para intensidad nula realizada sobre la base de muchas experiencias.

puesto, la resistencia eléctrica se hizo nula —experimentalmente nula— mucho antes del cero absoluto, a los 4.12°K, y, lo que es aún más notable, se anuló de manera brusca, discontinua, como si el mercurio al llegar a esa temperatura experimentase un imprevisto cambio de estado físico. No era posible pues la construcción de termómetros a resistencia —por lo menos con ese metal— puesto que la resistencia no existía, ni tampoco era posible explicar teóricamente ese colapso, dentro del lenguaje de la teoría electrónica.

La cuestión experimental siguiente, vista la mudez de la teoría, era saber si la propiedad descubierta en el mercurio era característica de ese metal, o si era común con el resto de los conductores. En 1913 Onnes encontró para el estaño y el plomo la misma anulación súbita de la resistencia, si bien a temperatura distinta en cada metal. La “superconducción”, como llamó el mismo Onnes a la nueva propiedad, parecía pues ser común a muchos metales, sin más diferencia que

en la temperatura del punto de transición del estado “normal” al “superconductor”.

En algunas de sus comunicaciones posteriores, Onnes llamó “supraconductividad” al mismo fenómeno; ambas denominaciones se emplean hoy indistintamente.

CONSECUENCIAS INMEDIATAS DEL DESCUBRIMIENTO

Es fácil de imaginar el efecto logrado en el ambiente físico por la breve y asombrosa frase “resistencia nula”. Por una parte, esa frase creaba experiencias absurdamente posibles: corrientes eléctricas recorriendo indefinidamente un circuito cerrado sin provocar efecto Joule; electroimanes sin núcleo de hierro generando campos magnéticos de una intensidad sin precedentes y sin producir pérdidas por calentamiento, etc. Por otra parte, la misma frase era acicate para idear nuevos modelos teóricos que dieran cuenta del brusco anulamiento. Desde otro punto de vista, esa posibilidad de lograr un circuito cerrado con corrientes persistentes, eternas, constituía la realización macroscópica más terminante de un modelo de las llamadas corrientes moleculares, ideadas por Ampère para explicar el magnetismo.

La experimentación subsiguiente anuló pronto algunos caminos: construida una pequeña bobina superconductor se encontró que al ir aumentando la corriente con miras a crear campos intensísimos se llegaba a un cierto valor de la intensidad —variable para cada metal, y aun dependiente del tamaño y forma del solenoide— para el cual la superconductividad era destruida, y reaparecía la resistencia óhmica habitual.

Esta perturbación producida por la corriente impidió conseguir los campos magnéticos muy intensos, pero no impidió en cambio la preparación de bobinas en cortocircuito, destinadas a ser recorridas por corrientes no demasiado intensas, inducidas por campos exteriores. Una de tales bobinas fué transpor-

tada, sepulta en el fondo de un baño de helio líquido que la mantenía superconductor, y rodeada de una triple protección de vasos de Dewar, desde Holanda hasta Londres, en donde se procedió a interrumpir el circuito descargando la bobina sobre un galvanómetro balístico. El galvanómetro londinense acusó la presencia de la cantidad de electricidad que había sido inducida por el campo magnético holandés.

Estas espectaculares experiencias, junto con el sonoro, si bien apropiado nombre del fenómeno que las hacía viables, hicieron mucho por la popularidad de la superconducción, aunque muy poco por la respuesta al interrogante por ella planteado. Pocos años después del descubrimiento, las teorías explicativas sumaban ya alrededor de la decena; fatal indicio del desconcierto producido por el mismo.

EXPERIMENTACIÓN POSTERIOR

El laboratorio criógeno de Leiden—ahora Laboratorio Kamerlingh Onnes—siguió siendo hasta 1940, fecha de su clausura por las autoridades de ocupación, el más importante centro de estudios sobre bajas temperaturas en general, y sobre superconductividad en particular. En menor escala, otros laboratorios se han ocupado del mismo tema: desde 1922, el Instituto Técnico del Estado Alemán, y después la Universidad de Toronto, la de Cambridge, el Bureau of Standards de Washington y finalmente el Instituto Físico Técnico del Ural, y el Instituto para Problemas Físicos de Moscú, inaugurado en 1937.

El rango de temperaturas alcanzables ha sufrido notable ampliación. El antiguo procedimiento de la ebullición de helio a presión reducida permitió llegar hasta 0.7°K en 1928, merced a una formidable instalación de bombas y prebombas realizada en Leiden por Keesom, sucesor de Onnes, y se tuvo la sensación de haber llegado al límite. Pocos años después, en 1933, se puso en práctica un método completamente distinto para obtener temperaturas muy bajas, inferiores

a 1°K: la denominada demagnetización adiabática de algunas sales paramagnéticas con calor de magnetización comparativamente grande. Este método, previsto teóricamente por Debye y Giauque en forma independiente, es el que ha permitido alcanzar el actual valor record de 0.0034°K obtenido en 1935 por de Haas y Wiersma.

Pero el rango de temperaturas inferiores a 1°K tiene muchas dificultades de trabajo. Por lo pronto, no hay en él un baño termostático en el que sumergir las muestras; el metal a ensayar debe reducirse a pequeños trozos que son incorporados a la masa de sal paramagnética, y el todo forma un pequeño bolo que se suspende en el interior del recipiente Dewar; del comportamiento del metal sólo se tiene una información media, estadística. La escala misma de temperaturas está basada en una ley cuyo enlace con la escala de gas ideal no es muy satisfactorio y exige correcciones considerables.

Por estas razones, el conocimiento experimental más importante para la superconducción, sigue siendo el proveniente de los crióstatos de helio.

EL ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO EXPERIMENTAL

La situación reinante al cabo de treinta y cuatro años de investigaciones, recuerda mucho el estado de cosas existente con respecto a los rayos X antes de las experiencias cruciales que aclararon su naturaleza ondulatoria: se ha estudiado la superconductividad desde los puntos de vista más dispares, y se ha acopiado un conjunto de conocimientos empíricos numerosos y heterogéneo.

Se conocen actualmente 17 metales superconductores, pero no se puede asegurar aún que la propiedad sea privativa de tal o cual tipo de elemento. Estos 17 metales están distribuidos en el cuadro periódico en dos zonas bastante bien definidas, y algunos superconductores, como el Talio, han sido descubiertos "por interpolación".

CLASIFICACION PERIODICA DE LOS ELEMENTOS													
	Grupo 0	Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Grupo V	Grupo VI	Grupo VII	Grupo VIII			IX	
Valencia máxima con relación al oxígeno		1	2	3	4	5	6	7					
Valencia con relación al hidrógeno		1	2	3	4	3	2	1					
Periodos	Series												
I	1	H ¹ 1.008										He ¹	
II	2	He ² 4.003	Li ³ 6.940	Be ⁴ 9.02	B ⁵ 10.82	C ⁶ 12.010	N ⁷ 14.008	O ⁸ 16.0000	F ⁹ 19.00				Ne ²
III	3	Ne ¹⁰ 20.183	Na ¹¹ 22.997	Mg ¹² 24.32	Al ¹³ 26.97	Si ¹⁴ 28.06	P ¹⁵ 30.98	S ¹⁶ 32.06	Cl ¹⁷ 35.457				A ³
IV	4	A ¹⁸ 39.944	K ¹⁹ 39.096	Ca ²⁰ 40.08	Sc ²¹ 45.10	Ti ²² 47.90	V ²³ 50.95	Cr ²⁴ 52.01	Mn ²⁵ 54.93	Fe ²⁶ 55.85	Co ²⁷ 58.94	Ni ²⁸ 58.69	
	5		Cu ²⁹ 63.57	Zn ³⁰ 65.35	Ga ³¹ 69.72	Ge ³² 72.60	As ³³ 74.91	Se ³⁴ 78.96	Br ³⁵ 79.916				Kr ⁴
V	6	Kr ³⁶ 83.7	Rb ³⁷ 85.48	Sr ³⁸ 87.63	Y ³⁹ 88.92	Zr ⁴⁰ 91.22	Nb ⁴¹ 92.91	Mo ⁴² 95.95	Ma ⁴³ 97.80	Ru ⁴⁴ 101.7	Rh ⁴⁵ 102.91	Pd ⁴⁶ 106.7	
	7		Ag ⁴⁷ 107.880	Cd ⁴⁸ 112.41	In ⁴⁹ 114.76	Sn ⁵⁰ 118.70	Sb ⁵¹ 121.76	Te ⁵² 127.61	I ⁵³ 126.92				Xe ⁵
VI	8	Xe ⁵⁴ 131.3	Cs ⁵⁵ 132.91	Ba ⁵⁶ 137.36	Tierras raras ⁵⁷⁻⁷¹	Hf ⁷² 178.6	Ta ⁷³ 180.88	W ⁷⁴ 183.92	Re ⁷⁵ 186.31	Os ⁷⁶ 190.2	Ir ⁷⁷ 193.1	Pt ⁷⁸ 195.23	
	9		Au ⁷⁹ 197.2	Hg ⁸⁰ 200.61	Tl ⁸¹ 204.35	Pb ⁸² 207.21	Bi ⁸³ 209.00	Po ⁸⁴ 210	Ab ⁸⁵				Rn ⁶
VII	10	Rn ⁸⁶ 222	Fr ⁸⁷	Ra ⁸⁸ 226.05	Ac ⁸⁹ 228	Th ⁹⁰ 232.12	Pa ⁹¹ 231	U ⁹² 238.07					

57-71 Tierras raras	La ⁵⁷ 138.92	Ce ⁵⁸ 140.13	Pr ⁵⁹ 140.92	Nd ⁶⁰ 144.27	Sm ⁶² 150.43	Eu ⁶³ 152.07
Gd ⁶⁴ 156.9	Tb ⁶⁵ 159.2	Dy ⁶⁶ 162.46	Ho ⁶⁷ 164.94	Er ⁶⁸ 167.2	Tm ⁶⁹ 169.4	Lu ⁷¹ 174.99

Fig. 2
(a)

El oro y el bismuto, que son antiguos a elementos superconductores, no lo son, por lo menos hasta la temperatura más baja a que se los investigó: 0.05°K.

Existen compuestos superconductores; el oro y el bismuto forman uno de ellos.

Existen aleaciones superconductoras, pero su comportamiento se aparta enormemente del de los metales puros.

Si el metal se coloca en un campo magnético se tiene una variedad de fenómenos: la temperatura a que se produce la anulación de la resistencia disminuye hasta un cierto valor bien definido, función de la intensidad del campo. Si éste es demasiado intenso, la transición no se produce, y el metal se mantiene "normal" a cualquier temperatura.

Las propiedades magnéticas del superconductor son tan anómalas como las eléctricas: *la inducción es siempre nula, como si el metal tuviera permeabilidad cero*; el campo magnético exterior no

penetra en el metal, en tanto éste se encuentre en el estado superconductor. Este hecho, descubierto en 1933 por Meissner y Ochsenfeld y verificado de las más diversas formas por muchos investigadores, es probablemente más importante aun que la anulación de la resistencia. La forma y dimensiones del metal tienen influencia decisiva sobre sus propiedades: según se trate de un alambre, de una lámina delgada, de un block cilíndrico, de una esfera, de un elipsoide o de un toro, los fenómenos que tienen lugar en presencia de un campo magnético varían fundamentalmente.

El calor específico del superconductor es distinto al del mismo metal en estado normal, y su variación es tan brusca como la de la resistencia o la permeabilidad.

Para conseguir que un superconductor pase al estado normal hay que suministrarle una cierta energía o calor latente

Temperaturas de transición, en ausencia de campo magnético, de todos los elementos superconductores conocidos.

Elemento	Temperatura de transición (°K)	Fecha	Observador
Mercurio	4.12	1911	Onnes
Estaño	3.69	1913	Onnes
Plomo	7.26	1913	Onnes
Talio	2.38	1922	Onnes y Tuyn
Indio	3.37	1923	Tuyn y Onnes
Tantalio	4.38	1928	Meissner
Galio	1.056	1940	Schoenberg
Torio	1.37	1940	Schoenberg
Titanio	1.77	1930	Meissner
Titanio	1	1940	Schoenberg
Columbio	9.22	1930	Meissner y Franz
Aluminio	1.15	1940	Schoenberg
Zinc	0.84	1940	Schoenberg
Vanadio	4.3	1934	Meissner y Westerhoff
Cadmio	0.54	1935	Kürti y Simon
Zirconio	0.70	1935	Kürti y Simon
Hafnio	0.35	1935	Kürti y Simon
Lantanio	4.71	1937	Mendelssohn y Daunt, Schoenberg.

FIG. 2 (b): Casi todas las temperaturas de transición están, aún para los compuestos y aleaciones, en el rango del helio líquido (4° a 1° K) o en el de la demagnetización adiabática (por debajo de 1° K). Las únicas excepciones corresponden a compuestos de Niobio, uno de los cuales, el NbN, se hace superconductor a unos 23° K (1941, Aschermann, Friedrich, Justi y Kramer), y puede ser estudiado en hidrógeno líquido.

de transición, que es nulo si no hay campo magnético exterior.

La transición es reversible —por lo menos en metales muy puros y de forma geométrica sencilla— de modo que puede idearse un método para producir ulterior descenso en la temperatura, basado en un superconductor que sufra la destrucción de la superconductividad en un campo magnético, de manera adiabática. Este método no ha sido llevado a la práctica porque su rendimiento sería muy inferior al método Debye-Giauque.

Aparte de estos conocimientos positivos, hay un buen número de experiencias negativas:

La superconductividad no es propiedad característica de una determinada estructura cristalina, pues en los 17 elementos están representadas casi todas las

formas cristalográficas. Sin embargo, el estaño, que es el único de los 17 estudiados en dos variedades alotrópicas, es superconductor en la tetragonal y no superconductor en la cúbica.

La malla de un metal superconductor, estudiada por difracción de rayos X, es idéntica antes y después de la transición.

No hay efectos termoeléctricos entre superconductores, pero sí entre dos trozos de un mismo metal en estados normal y superconductor.

No parece haber electrones de conducción en el estado superconductor, según se infiere de experiencias indirectas.

Quedaría aún por señalar el efecto de las corrientes de alta frecuencia, la discontinuidad en la conductividad térmica, los retardos observados en la transición

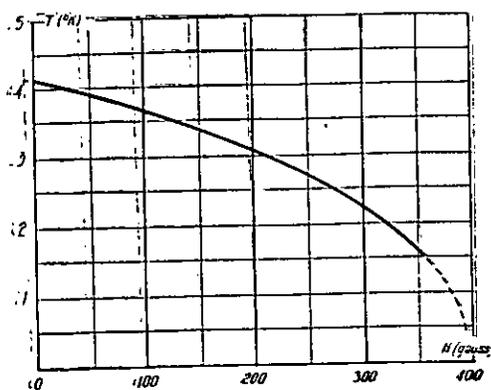


FIG. 3: Temperatura a la que se produce la transición del mercurio, en función del campo magnético exterior.

La forma de la curva es similar en todos los superconductores. En la figura se ha indicado con línea de puntos la posible continuación de la curva hacia el cero absoluto, de acuerdo con los datos experimentales, y de acuerdo también con el tercer principio de la termodinámica, que exige que la curva corte en forma normal al eje de las H .

El ángulo que la curva forma con el eje de las T permite deducir algunos datos sobre el número de electrones que toman parte en la superconducción.

El plano H, T queda dividido en dos zonas de manera semejante a las diagramas de equilibrio entre fases; la zona inferior a la curva corresponde al estado o fase superconductor y la superior a la normal.

en determinadas condiciones, los efectos histeréticos, la influencia del género de conexión topológica de la muestra, etc.

Los treinta y cuatro años no transcurrieron en vano.

EL ESTADO ACTUAL DE LA TEORÍA

Las tentativas teóricas de explicación concluyeron radicalmente a consecuencia del descubrimiento de Meissner-Ochsenfeld, y no se entrevé en los momentos actuales la dirección de donde ha de provenir la solución que enlace todos los datos provistos por el cuadro de experiencias.

Existen dos teorías puramente descriptivas: una es termodinámica y se debe sobre todo a los trabajos de Gorter y

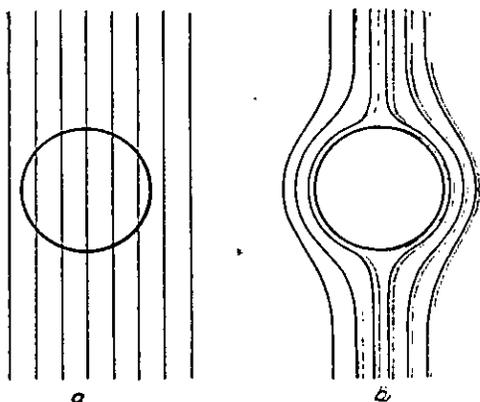


FIG. 4: Efecto Meissner-Ochsenfeld.

a) Esfera metálica en un campo magnético constante. La permeabilidad magnética es prácticamente unitaria.

b) La misma esfera, en el mismo campo exterior, pero enfriada por debajo de la temperatura de transición. La permeabilidad es ahora nula.

La figura representa el caso más sencillo. Si en lugar de ser una esfera es un elipsoide de revolución, el efecto es semejante. Si el metal tiene agujeros, cambia por completo. Las aleaciones y los metales no muy puros presentan el efecto, Meissner-Ochsenfeld de manera incompleta, o no lo presentan.

Casimir; ha permitido interesantes predicciones respecto a los valores numéricos del calor de transición y los calores específicos, y su vinculación con la curva que da la temperatura de transición en función del campo magnético exterior. La otra teoría es electromagnética, desarrollada por London, y consiste esencialmente en reemplazar la ley de Ohm como ley fenomenológica por otra fórmula en la cual la intensidad de la corriente de un superconductor no está ligada al campo eléctrico —que es nulo— sino al campo magnético.

Mencionemos todavía una tentativa de explicación de la influencia de la forma geométrica del metal, en la cual se estudia con detenimiento el proceso de la transición, y se demuestra que durante ella el metal está dividido en zonas superconductoras y zonas normales, en forma de láminas o capas de formas complicadas. Mencionemos aún las leyes que rigen la distribución de corrientes en nu-

dos y mallas superconductoras, debidas a Hauc, y que reemplazan a las de Kirchhoff.

Tampoco aquí han pasado en vano los años; pero ninguna de estas investigaciones ataca el problema mismo en su raíz, de modo que es improbable que pueda conseguirse por esos caminos vincular la superconductividad con las demás propiedades metálicas.

Desde el punto de vista teórico, la situación es pues similar a la experimental: un abundante cuadro de conocimientos parciales que iluminan cada uno un pequeño aspecto del problema, y que forman las piezas de un mosaico cuyo diseño aún no se conoce. Sigue tan incomprendible como en 1933. La moderna teoría de los metales, nacida poco

antes, ha ido creciendo hasta dar cuenta de casi todos los fenómenos; pero en ese casi continúa incluida la superconductividad como uno de los temas de trabajo más importantes, de toda la física teórica, y cuya solución parece estar fuera de sus actuales fórmulas.

BIBLIOGRAFIA.

De tanto en tanto se publican puestas al día de este tema, a las que puede recurrirse en busca de bibliografía general. Las más recientes son:

D. SCHOENBERG, *Superconductivity*, Cambridge Physical Tracts, 1938.

L. C. JACKSON, *Superconductivity*. Publicado en "Reports on Progress in Physics for 1939", por la Physical Society de Londres.

E. F. BURTON, H. GRAYSON SMITH y J. O. WILHELM, *Phenomena at the Temperature of Liquid Helium*. Publicado por la "American Chemical Society", 1940.

Substancias olorosas del reino animal

Por GUSTAVO A. FESTER

UN historiador de la investigación química moderna podría sorprenderse por el hecho de que frente al sinnúmero de estudios que se publicaron hasta principios de este siglo sobre las esencias volátiles del reino vegetal, casi no existen tales sobre las substancias olorosas de origen animal, exceptuando los trabajos de pura rutina. Las causas de este fenómeno pueden ser varias: puede tratarse de "corrientes de moda", que inducen a descuidar determinado rincón del campo arado, o también puede deberse a la dificultad de procurarse la materia prima en cantidad suficientemente grande o a que el elevado precio de la misma haya asustado a los investi-

gadores. De cualquier manera, recién desde hace unos 20 años se ha despertado un interés algo mayor por el tema antes despreciado, a raíz de los estudios brillantes de L. Ruzicka en Zürich, sin dejar de mencionar el mérito de H. Walbaum y de otros autores que lo antecedieron.

Hoy en día, la composición de cinco de las seis drogas principales de origen animal, usadas en la perfumería civilizada o indígena, está aclarada, de modo que queda justificada la publicación de este resumen (*), en el cual nos limita-

(*) Un estudio más amplio se publicó en REV. FAC. QUÍM. S. FE, 1944, 13, 47.