

ASPECTOS HISTORICOS DE LA SUPRACONDUCTIVIDAD

por MAX v. LAUE

Max Planck - Institut für Physik, Göttingen

(Recibido el 25-8-1949)

ZUSAMMENFASSUNG: Geschichtlicher Überblick über die bisherige Entwicklung der Theorie der Supraleitung.

La teoría de la electricidad y del magnetismo es hija del siglo XIX. En 1867, tras un desarrollo largo y difícil, se condensó en la teoría del campo de Faraday y Maxwell. Debido al descubrimiento de las ondas eléctricas por Heinrich Hertz (1889) — y a pesar de una fuerte oposición — esta teoría conquistó el reconocimiento general aún antes de 1900. Se creyó entonces, que un capítulo grande e importante había llegado a su conclusión.

Sin embargo, como acontece muchas veces, experiencias nuevas condujeron a una sorpresa. Al lograr condensar el helio (1908), Kamerlingh Onnes, en Leiden, había alcanzado temperaturas más bajas que las obtenidas anteriormente. Siguiendo el cambio de la resistencia eléctrica de los metales hasta estas temperaturas, encontró con asombro, en 1911, que a 4° K esta resistencia se anula en mercurio ⁽¹⁾. Poco después halló el mismo comportamiento en otros metales, p. ej. en el plomo y el estaño. Esta «supraconductividad» aparece a una temperatura característica para cada sustancia, en el llamado punto de discontinuidad. Por supuesto, otros metales, como p. ej., oro, plata, cobre, no presentan hasta ahora el mencionado fenómeno. Sin embargo, existe la posibilidad de que sus puntos de discontinuidad se encuentren a temperaturas más bajas, todavía no alcanzadas. En total se conoce, ahora, la supraconductividad en 19 metales puros, en muchas aleaciones y también en algunas combinaciones químicas.

En 1914 ⁽²⁾ Kamerlingh Onnes al mantener una corriente en

un circuito supraconductor durante horas y días, mostró que la resistencia de un supraconductor no solamente es mucho más pequeña que la de un conductor normal (así se llama, para distinguirlo, a un conductor ordinario, que ofrece resistencia), sino que esta resistencia efectivamente no existe. Únicamente la dificultad experimental de mantener el circuito durante más tiempo a una temperatura tan baja, puso un límite temporal a la experiencia. En una ocasión, Kamerlingh Onnes indujo una tal corriente permanente en su laboratorio en Leiden, voló a Londres con el recipiente Dewar que contenía el circuito en un baño de helio líquido, y demostró allá los efectos magnéticos de la corriente ante la Sociedad Real.

Mucho más tarde, en 1941, Justi y Zickner⁽³⁾ verificaban otra consecuencia deducida por el que escribe de la idea de una corriente sin resistencia. En el caso de un conductor normal las conocidas reglas de Kirchhoff determinan los fenómenos de la ramificación de una corriente; ésta se reparte sobre las ramas en proporción a las resistencias respectivas. En el caso de un supraconductor los factores que deciden son la autoinducción y la inducción mutua. Puede acontecer que en una rama la corriente tenga sentido opuesto a la de la corriente principal. Todas estas conclusiones han sido plenamente verificadas experimentalmente.

En 1913, Kamerlingh Onnes logró otro descubrimiento fundamental⁽⁴⁾. No solamente el aumentar la temperatura más allá del punto de discontinuidad hace desaparecer la supraconductividad, sino también un campo magnético en el cual se introduzca el supraconductor. Pero, es necesario que el campo tenga una intensidad mayor que un cierto «valor umbral». El valor umbral depende de la sustancia y, para una sustancia dada, es tanto mayor cuanto menor es la temperatura.

En este dominio, Kamerlingh Onnes encontró menos sucesores de lo que se podía esperar dada la sensación que habían provocado sus primeros trabajos. No había, ni hay hoy en día, muchos institutos de física que posean las máquinas caras y difíciles de manejar, necesarias para llegar a temperaturas tan bajas. Además, la técnica experimental es tan distinta de la de temperaturas normales, que hace falta una rutina extraordinaria para poder efectuar limpiamente hasta las mediciones más sencillas. El laboratorio de Kamerlingh Onnes fué uno de los pocos lugares donde se siguió cultivando esta rama de la investigación, aún después de su

muerte (1926). Allá, en la tercera década de este siglo, W. J. de Haas, con un grupo de colaboradores, se halló con el hecho sorprendente de que un campo magnético, orientado perpendicularmente al alambre supraconductor, tiene que tener la mitad de la intensidad que haría falta para anular la supraconductividad, si el campo estuviese orientado paralelamente al alambre.

Durante años, una de las grandes incógnitas del fenómeno fue el hecho de que la corriente cuya resistencia se trata de medir, parecía depender fuertemente de la orientación relativa: campo magnético-corriente.

Recién en 1932 el que escribe pudo dar la interpretación (5).

De primera intención, y basado sobre la teoría de Maxwell, se había considerado al supraconductor como un conductor con conductividad infinita. G. Lippmann, en París, llamó la atención sobre el hecho de que entonces el supraconductor debería ser impenetrable para un campo magnético, es decir, que las líneas de fuerza deberían desviarse fuera de él. Pero una modificación tal de un campo magnético exterior implica un aumento de la intensidad del campo en la superficie del cuerpo. En el caso de un alambre de sección circular este aumento es precisamente una duplicación. El campo que actúa sobre el supraconductor tiene, pues, una intensidad doble de la del campo que se encuentra a gran distancia del mismo. Como en las experiencias siempre se había medido el campo a gran distancia, se había concluido que el campo en la superficie del supraconductor — que es el campo que actúa — era menor precisamente en un factor dos. Si esta concepción fuese correcta, una esfera debía perder su supraconductividad a distinto valor de la intensidad del campo magnético, a saber, a $2/3$ del valor umbral. Un alambre de sección elíptica debía necesitar también otra intensidad característica del campo y, además, esta intensidad debía depender de la orientación del campo con respecto a la sección elíptica. Todas estas conclusiones han sido confirmadas por de Haas y sus colaboradores en largas series de mediciones durante los años 1934-1937.

Pero, la concepción de un supraconductor como conductor de conductividad infinita llevaba necesariamente a otra conclusión más. Si se introduce un metal en un campo magnético a una temperatura superior a la del punto de discontinuidad, es decir, mientras aún presenta conductividad normal, el campo no se de-

forma y sus líneas de fuerza lo atraviesan sin sufrir modificación alguna. Enfriando el metal — en el campo magnético — hasta la supraconductividad, nada debería modificarse. Sin embargo, cuando W. Meissner y R. Ochsenfeld, en 1933⁽⁶⁾, determinaron los campos en la vecindad de supraconductores, hallaron que esta conclusión no se verificaba. Aún procediendo de la manera descrita, las líneas de fuerza son desplazadas hacia afuera tan pronto como se establece la supraconductividad. Es indiferente el camino que se elige: si se enfría primero y se introduce después el campo, o si se aplica primero el campo y se enfría después.

El interior de un supraconductor suficientemente grueso está siempre libre de campo magnético. Eso se llama el *efecto Meissner*. Fué un punto crucial en la historia de la supraconductividad.

En este descubrimiento se basa todo el desarrollo ulterior. Primero, los físicos holandeses, Rutgers, Casimir y Gorter⁽⁷⁾ pudieron establecer la termodinámica de la transición de conductividad normal a supraconductividad. Los dos estados representan fases, en el sentido de Gibbs, de una misma substancia, entre las cuales se puede producir una transición reversible. Aparece aquí un calor latente con el cual están vinculados los calores específicos de las dos fases. Pero, aún cuando tales relaciones son conocidas en otras transiciones entre fases, en este caso se agrega una relación con el valor umbral magnético como característica particular. Todas estas consecuencias han podido ser verificadas experimentalmente después de 1934 por los físicos de Leiden, entre los cuales se distinguió particularmente Keesom⁽⁸⁾.

Quedó, sin embargo, el problema básico. Nuestras teorías de la conductividad eléctrica, creadas para conductores normales y que han conducido para éstos a resultados muy satisfactorios, ¿cómo podían ser extendidas a los supraconductores? La mayoría de los teóricos atacaron este problema desde el lado atómico. Preguntaron cómo se comportan los electrones en un supraconductor en comparación con un conductor normal. A pesar de los muchos trabajos que se han escrito, no se puede afirmar que alguna de estas teorías pertenezca a la parte segura de la física. En los últimos años, una teoría cuántica de la supraconductividad de W. Heisenberg⁽⁹⁾ es, quizás, la que presenta el mayor interés, pero tiene que competir con otras, p. ej., con una propuesta por M. Born⁽¹⁰⁾.

También la teoría generalmente llamada de London, tiene

históricamente su origen en ideas atomísticas. El planteo característico de esta teoría fué hecho, en lo que a la teoría clásica de los electrones se refiere, por R. Becker, W. Heller y F. Sauter⁽¹¹⁾, y en lo que a la teoría cuántica se refiere, por Fritz y Heinz London⁽¹²⁾. El autor aceptó este planteo⁽¹³⁾ sin referirse a las ideas atomísticas. Le pareció necesario, como primer paso, extender la teoría puramente fenomenológica de Maxwell a los supraconductores. Una vez logrado eso, la teoría atómica deberá dar el segundo paso.

Esta teoría puede ser expuesta de la siguiente manera: La supraconductividad plantea, desde el principio, un dilema: por un lado la mencionada desaparición de la resistencia eléctrica, por el otro la imposibilidad de distinguir ópticamente los estados supraconductor y normal del mismo metal. Las propiedades ópticas de un conductor normal dependen esencialmente de su conductividad finita. Luego esta conductividad debe conservar cierta importancia también para el supraconductor.

La teoría de London interpreta estos dos hechos, aparentemente contradictorios, suponiendo que existen dos mecanismos de conducción completamente distintos: un mecanismo que da lugar a la supraconductividad y otro mecanismo ordinario que obedece a la ley de Ohm. El primero de ellos no tiene nada que ver con la conductividad común. Ahora bien, las ecuaciones fundamentales de la teoría muestran que en el caso estacionario el primer mecanismo excluye al segundo, al poner literalmente en cortocircuito la corriente óhmica, de manera que su conductividad ya no influya. Sin embargo, en el caso de vibraciones rápidas, la corriente óhmica domina tanto más cuanto mayor es la frecuencia. Para frecuencias ópticas el mecanismo de la supraconductividad deja prácticamente de influir. Pero ya en el dominio de las oscilaciones hertzianas, Mc. Lennan y colaboradores habían comprobado en 1932, la existencia de una resistencia en supraconductores⁽¹⁴⁾. En 1941, Heinz London repitió estas experiencias⁽¹⁵⁾. De las ecuaciones así obtenidas fluye entonces, como consecuencia matemática inevitable: 1º) el efecto Meissner; 2º) todo lo que sabemos desde Kamerlingh Onnes sobre corrientes permanentes.

Pero en esta representación, el efecto Meissner no aparece como una supresión total del campo magnético, sino como una limitación del campo a una capa delgada bajo la superficie del supraconductor. En general esta capa tendrá un espesor del orden

de 10^{-5} a 10^{-6} cm. Para la mayoría de las mediciones, eso es prácticamente equivalente a una supresión total, pero, existen también casos en los cuales algo de la profundidad de penetración se hace notar indirectamente. Son las supracorrientes en estas capas, las que protegen las partes interiores del campo magnético.

Existe otro dilema más, que ya Kamerlingh Onnes trató de resolver en 1924 por una experiencia que no tuvo éxito completo (16). El hecho de que exista la corriente permanente, indica que entre el mecanismo de la supraconductividad y la materia — propiamente dicho — en su interior, no actúan fuerzas. Sin embargo, cada corriente eléctrica está acompañada, según Maxwell, por un campo magnético y, en el caso de la supraconductividad, la vinculación entre corriente y campo es todavía más estrecha. Por lo tanto deben actuar fuerzas del campo sobre el mecanismo de la corriente, fuerzas que tienden a desplazar las líneas de corriente. Pero la misma teoría habla también de líneas de corriente no desplazables, estacionarias.

La idea que salva esta dificultad es la de las tensiones que acompañan cada supracorriente, idea ya introducida por London. Esa parte de la teoría es el punto angular del cual depende todo. Para explicar su significado, consideraremos primero una cuestión trivial.

¿Porqué no cae al suelo, siguiendo la gravedad, un cuerpo suspendido en el campo gravitacional de la tierra? La contestación, bien conocida, es: En su interior existen tensiones elásticas que en cada punto compensan exactamente la gravitación. Es verdad que las tensiones no pueden anularla. Pero la trasladan del interior a la suspensión. El gancho, al cual está fijado el cuerpo, tiene que resistir la acción total de la gravedad.

En el caso de la supraconductividad, las fuerzas del campo magnético que actúan sobre los portadores de la corriente corresponden a la gravedad, mientras que las tensiones de London corresponden a las tensiones elásticas. Naturalmente, es necesario comprobar que existen tensiones apropiadas. Eso ya lo comprobó Fritz London en 1937 (17). Pero, ¿cuál es el análogo al gancho en nuestro ejemplo? Es, sin duda, la superficie del supraconductor. En ella se transmite la acción del campo magnético a la materia, acción que se ejerce primariamente sobre los portadores de la corriente. En el caso estacionario, todo el sistema de la supracor-

riente está suspendido de la superficie. de la misma manera en que una lámpara está suspendida de su gancho.

A mi modo de ver, es un éxito particular de esta teoría el llegar, necesariamente, de las tensiones de London a la existencia de un valor umbral magnético. Esta conclusión permite entonces derivar de la manera habitual la termodinámica completa de la transición de fase, mientras que Rutgers, Casimir y Gorter tuvieron que admitir este hecho como dato experimental. Eso ha sido demostrado por el autor en 1938⁽¹⁸⁾.

La presente teoría fenomenológica ha ido sufriendo varias modificaciones durante los años. Al principio tenía una forma que consideraba los supraconductores como cuerpos isótropos. En realidad se trata de cuerpos cristalinos, y si su sistema cristalino no es el cúbico, tenemos que tomar en cuenta las distintas direcciones en ellos. Este paso ha sido dado por el autor en 1948⁽¹⁹⁾. Últimamente⁽²⁰⁾ logró también incluir la idea de una densidad máxima, insuperable, de la corriente, idea tomada de la teoría atómica de Heisenberg, sin sacrificar con ello ninguno de los resultados esenciales de la forma anterior de la teoría. Es cierto que la teoría pierde con eso una característica que tenía en común con la teoría de Maxwell, es decir, la linealidad de sus ecuaciones y de sus ecuaciones diferenciales. Ahora ya no podemos formar por superposición de dos soluciones posibles una tercera. Esto representa una dificultad seria para el desarrollo matemático de la teoría.

Con eso parece que el desarrollo de la teoría ha llegado a un cierto fin. Se adelantó mucho a las experiencias y ahora se presenta para los experimentadores la tarea de verificar las distintas conclusiones teóricas en el mayor número posible de sustancias y en tantas condiciones diferentes como se pueda. Para tener condiciones bien determinadas tendrán que trabajar no con el material policristalino habitual, sino con microcristales. Pero, la matemática tendrá que establecer el puente entre la teoría y la experiencia, calculando casos particulares que son apropiados para la verificación experimental. Solamente cuando esto haya sido hecho en un número suficiente de casos podremos considerar nuestras ideas de la supraconductividad como aseguradas.

Por fin tenemos que mencionar todavía un fenómeno que se presenta regularmente cuando se destruye la supraconductividad por un campo magnético, y que ha causado gran confusión en

la interpretación de las experiencias. Al principio se creía que la conductividad normal se establece primero en una capa superficial que rodea al resto supraconductor. Solamente con un aumento ulterior del campo, este resto debía reducirse, y, finalmente, desaparecer. Pero no es así. La condición termodinámica de equilibrio no es compatible con la coexistencia de supraconducción y conducción normal en cuanto aquel resto forma un todo macizo. La situación cambia si dominios supraconductores delgados se encuentran colocados dentro de un ambiente en fase normal. Estos dominios tienen que ser tan delgados que ya no se pueda formar en ellos una capa protectora que separe el interior supraconductor. En realidad, durante la descomposición de la supraconductividad aparece un «estado intermedio», una mezcla mecánica de dominios normales y supraconductores. No siempre el estado intermedio puede ser identificado por mediciones de la resistencia, y distinguido del estado supraconductor. Porque si las partes supraconductoras siguen conectadas unas con otras forman un puente entre los extremos del circuito que se hace cargo de la conductividad, y aparece como estado supraconductor. De aquí fluyen a menudo interpretaciones equívocas de los resultados de las mediciones. De Haas y sus colaboradores ya aclararon este punto en las mencionadas investigaciones de 1934 a 1937, y en 1947, los físicos rusos Meshlovsky y Shaknikov⁽²¹⁾ confirmaron y precisaron estas observaciones. Existe un método mejor para identificar el estado intermedio: el campo magnético. Tan pronto como se puede observar un tal campo en el cuerpo (naturalmente en pequeños agujeros en su interior), la supraconductividad se ha descompuesto y se ha formado el estado intermedio.

Göttingen, Max Planck-Institut für Physik.

Julio 1949.

(Traducido por G. BECK y D. CANALS FRAT).

B I B L I O G R A F I A

- 1) H. KAMERLINGH-ONNES, Comm. Leiden, 122b y 124c, 1911.
- 2) H. KAMERLINGH-ONNES, Comm. Leiden, 140b, y 141b, 1914.
- 3) E. JUSTI y G. ZICKNER, Phys. Z., 42, 258, 1941.
- 4) H. KAMERLINGH-ONNES, Coll. Leiden, 174a y b, 1913.
- 5) M. v. LAUE, Phys. Z., 33, 796, 1932.
- 6) W. MEISSNER y R. OCHSENFELD, Naturw., 21, 787, 1933.
W. MEISSNER, Phys. Z., 35, 931, 1934.
- 7) H. CASIMIR, Physica, 1, 306, 1934.
- 8) Véase p. ej., W. H. KEESOM y P. H. VAN LAER, Physica, 3, 371, 1936.
- 9) W. HEISENBERG, Z. f. Naturforschung, 2a, 185, 1947; 3a, 65, 1948;
Göttinger Nach. Mathem. -Physik Klasse 1947, p. 23; Ann. d. Phys.,
3, 289, 1948.
- 10) M. BORN, Nature, 162, 968 y 1017, 1948.
- 11) R. BECKER, G. HELLER y F. SAUTER, Z. f. Phys., 85, 772, 1933.
- 12) FRITZ y HEINZ LONDON, Proc. Roy. Soc., 149, 71, 1935; Physica, 2, 341, 1935.
- 13) M. v. LAUE, Ann. d. Phys., 42, 65, 1942, y 43, 223, 1943.
- 14) MC. LENNAN, A. C. BURTON, A. PITT y J. O. WILHELM, Proc. Roy. Soc.,
136, 52, 1932; 138, 245, 1932.
- 15) H. LONDON, Proc. Roy. Soc., 176, 522, 1940; M. v. LAUE, Z. f. Phys.,
124, 35, 1947.
- 16) H. KAMERLINGH-ONNES, Comm. Leiden, Suppl. 50a, 1924.
- 17) F. LONDON: Une conception nouvelle de la supraconductivité, Paris, 1937.
- 18) M. v. LAUE, Ann. d. Phys., 32, 71 y 253, 1938.
- 19) M. v. LAUE, Ann. d. Phys., 3, 31, 1948.
- 20) M. v. LAUE, Ann. d. Phys., 1949 (por aparecer); véase también la 2ª edición de M. v. Laue, Theorie der Supraleitung, Springer-Verlag, 1949.
- 21) A. MESHKOWSKY y A. SHAKNIKOV., Journ. of Physics, 11, 1, 1947.