

Resumen

La tercera unidad del programa de estudio de la materia Física II del Colegio de Ciencias y Humanidades (CCH) busca lograr en los estudiantes un nivel de conocimiento de algunos fenómenos, como la superconductividad, relacionados con la física contemporánea y su importancia en la tecnología actual. Este artículo pretende servir de material de apoyo en el proceso de enseñanza-aprendizaje para el tema de los superconductores, describiendo su comportamiento, el desarrollo histórico de su estudio y sus aplicaciones tecnológicas.

Palabras clave

Aplicaciones tecnológicas, enseñanza de la física, superconductividad.

Abstract

The third unit of Physics II at the CCH aims to achieve in students a level of knowledge of some phenomena, as superconductivity, related to contemporary physics and its importance in today's technology. This paper seeks to support teachers and students in the teaching-learning process describing the behavior, the historical development, and technological applications of superconductors.

Key words

Technological applications, teaching physics, superconductivity.

Aspectos físicos e históricos de la superconductividad

ALBERTO FRANCISCO SANDINO HERNÁNDEZ

Recibido: 10-05-2013, aprobado: 27-05-2013)

Introducción

El propósito general de la tercera unidad “Física y Tecnología Contemporáneas” del programa de estudio de la materia Física II del Colegio de Ciencias y Humanidades (CCH), es que el alumno conozca algunos fenómenos que no se explican con la Física Clásica, sus aplicaciones más importantes en la tecnología actual y la importancia en la vida cotidiana.¹ Esto se ve reflejado en el aprendizaje “Conoce nuevos materiales y tecnologías y sus aplicaciones: Láser, superconductores, fibra óptica y nanotecnología” que abarca la temática “Aplicaciones de Física contemporánea”. De manera particular, este artículo tiene como propósito ser material de apoyo en la enseñanza y aprendizaje del fenómeno de la superconductividad a partir de su descripción y aplicación en la tecnología actual, así como la presentación de un marco histórico desde su descubrimiento hasta la construcción de teorías que explican su comportamiento. Las aplicaciones tecnológicas de los superconductores son varias y han logrado un impacto tanto en la industria como en la investigación científica, de las cuales los alumnos deben estar conscientes.

Descripción de la superconductividad

En la naturaleza existen materiales que permiten el movimiento de sus electrones cuando se les aplica una diferencia de potencial o voltaje, es decir, hay corriente eléctrica en ellos y son conocidos como *conductores*. En cambio, aquellos que no permiten el paso

de corriente eléctrica son conocidos como aislantes. Para ambos casos hay una pérdida de energía debida al efecto Joule.²

Cuando estamos a temperatura ambiente (25°C), los materiales tienen comportamiento conductor o aislante según sea el caso (estado normal), pero cuando se enfrían a temperaturas por debajo de 0°C, comienzan a tener un comportamiento especial, ya que permiten el flujo de electrones sin resistencia alguna y lo mejor de todo es que no hay pérdidas considerables de energía. Los materiales que cumplen con estas características son conocidos como *superconductores* y cabe destacar que algunos que son buenos conductores a temperatura ambiente como el oro, no son tan buenos superconductores a bajas temperaturas, o aquellos que son buenos aislantes se convierten en excelentes superconductores, como el caso de la porcelana. Otro hecho sorprendente es que el grafito o los óxidos metálicos, comúnmente no considerados como conductores eléctricos, sean superconductores ya que a bajas temperaturas conducen la electricidad de manera excelente. En la tabla 1 se muestran algunos ejemplos de conductores, aislantes y superconductores.

Tabla 1

Conductores	Aislantes	Superconductores
oro	plástico	porcelana
plata	porcelana	grafito
aluminio	madera	óxidos metálicos
cobre	hule	bronce

Cada material está caracterizado por una temperatura conocida como temperatura crítica T_c en la cual comienza una transición de estado normal a estado superconductor, es decir, a partir de esta temperatura surge el fenómeno de superconductividad. Desde el punto de vista de la termodinámica, esta transición es similar a la de líquido-vapor

en un fluido, y un ejemplo es el proceso de ebullición del agua. Sabemos que para que el agua pase de un estado líquido a un estado gaseoso, se necesita elevar la temperatura a 100°C. No todos los fluidos hierven a esa temperatura, ya que cada uno tiene su propia temperatura de ebullición, o dicho de otra manera, su propia temperatura crítica en la cual se lleva a cabo la transición líquido-vapor. Una situación similar sucede con los superconductores, cada material tiene su respectiva temperatura T_c en la cual pasan de un estado a otro. En la tabla 2 se muestran varios elementos con sus respectivas temperaturas críticas. Los elementos como el aluminio, el mercurio o el estaño son considerados como superconductores de baja T_c y óxidos metálicos como el $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ o el YBCO ($YBa_2Cu_3O_7$) son considerados como de alta T_c .

Tabla 2

Material	Temperatura crítica (K)
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	125
$Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$	99
YBCO($YBa_2Cu_3O_7$)	95
Diboruro de magnesio (MgB_2)	39
Plomo (Pb)	7.196
Lantano (La)	4.88
Tantalio (Ta)	4.47
Mercurio (Hg)	4.15
Estaño (Sn)	3.72
Indio (In)	3.41
Aluminio (Al)	1.19
Uranio (U)	0.68
Iridio (Ir)	0.014

Otra característica importante en los superconductores es el *efecto Meissner*, que aparece al enfriar una muestra superconductor por debajo de su T_c en presencia de un campo magnético

externo. El efecto consiste en que las líneas del campo externo no pueden entrar al interior del material debido a la presencia de otro campo magnético generado por las corrientes eléctricas que se forman en la superficie de la muestra, motivo por el cual la muestra superconductora se comporta como un material diamagnético³ perfecto (Figura 1). Si variamos el campo magnético externo hasta un valor crítico H_c , podremos lograr que desaparezca el fenómeno de superconductividad en el material.

Una manera práctica de observar el efecto Meissner es la siguiente: se tiene una pequeña muestra de un material metálico sobre un imán, a temperatura ambiente la muestra es atraída por el campo magnético del imán. Si bañamos con nitrógeno líquido a la muestra, ésta se enfriará a una temperatura cercana a los $-195.8\text{ }^\circ\text{C}$ y se levitará sobre el imán como prueba de que ha alcanzado el estado superconductor. La levitación de la muestra en el aire es debida a que la fuerza gravitatoria y la fuerza de repulsión magnética se equilibran (Figura 1). Esta práctica puede llevarse a cabo en el aula-laboratorio siempre y cuando se tenga las precauciones necesarias, ya que el nitrógeno líquido puede provocar quemaduras o solidificación de la piel y desprendimiento del miembro afectado.

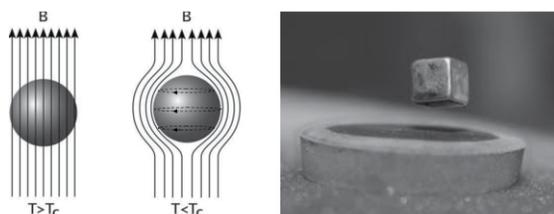


Figura 1 Efecto Meissner

A nivel microscópico, la superconductividad es debida a la formación de pares de electrones

conocidos por *pares de Cooper*. En Física clásica, dos electrones se repelen entre sí debido a la fuerza eléctrica que hay entre ellos, pero al enfriar un material por debajo de su temperatura crítica, los electrones forman estos pares gracias a su interacción con partículas virtuales conocidas como fonones.⁴ Una manera simple de explicar la interacción electrón-fonón-electrón es la siguiente: un electrón cede (o absorbe) energía de un fonón, el cual a su vez la cede (o absorbe) a otro electrón, conservándose así la energía y dando origen a los pares Cooper. La creación de estos pares es fundamental en el estado superconductor, ya que la corriente eléctrica que circula en el material no es debida al movimiento de electrones libres, como en el caso de los conductores, sino al flujo de pares de electrones. A este tipo de corriente la denotamos como *super corriente*.

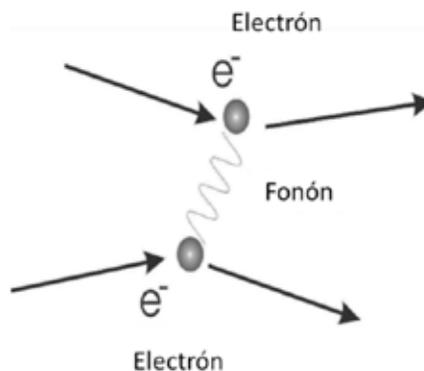


Figura 2 Interacción electrón-fonón-electrón

Por último, es importante hacer notar que la temperatura y el campo externo son variables que pueden manipularse de manera experimental para llevar un material al estado superconductor, con base en esto se clasifican los materiales superconductores tomando en cuenta sus valores críticos T_c y H_c . Así podemos encontrar materiales de alta o

baja temperatura crítica como también de tipo I o tipo II; esta clasificación se muestra en la tabla 3.

Tabla 3

Magnitud	Clasificación	Características
Temperatura crítica T_c	Alta T_c	Temperaturas críticas mayores a 30 K
	Baja T_c	Temperaturas cercanas a 5 K
Campo crítico H_c	Tipo I	<ul style="list-style-type: none"> No permiten en absoluto que penetre un campo magnético externo debido a la existencia de corrientes eléctricas en la superficie del material Presentan transición brusca del estado superconductor al normal
	Tipo II	<ul style="list-style-type: none"> El campo magnético penetra a través de pequeñas canalizaciones denominadas vórtices Presentan transición gradual del estado superconductor al normal

Marco histórico

El descubrimiento de la superconductividad está asociado al interés de los físicos del siglo XIX por licuar todos los gases conocidos en ese tiempo, lo que permitió estudiar los fenómenos que se presentan en los materiales a temperaturas menores a los cero grados centígrados. Sin embargo, la superconductividad como tal no se descubriría hasta principios de siglo XX, cuando Kamerlingh Onnes observó que la resistencia eléctrica del mercurio desaparecía bruscamente al enfriarse a 4.15 K (-269°C), cuando lo que se esperaba era que disminuyera gradualmente hasta el cero absoluto (-273.15°C). Posteriormente descubrió que este fenómeno desaparece cuando un campo magnético suficientemente fuerte se aplica a la muestra de mercurio. Antes de haberse descubierto el efecto

Meissner; Keesom, Rutgers y Gorter aplicaron la teoría termodinámica para explicar el fenómeno de la superconductividad, la cual lograba excelentes acuerdos con las mediciones, concluyéndose que la transición superconductor es similar a la transición líquido-vapor, después del descubrimiento de Meissner y Ochsenfeld, ya no hubo duda alguna de eso.

La primera teoría fenomenológica de la superconductividad fue presentada por los hermanos London, la cual explica satisfactoriamente el efecto Meissner, ya que deduce que las líneas de campo magnético externo aplicado a un superconductor lo penetran hasta desvanecerse en una longitud casi despreciable; desde la superficie hasta el interior del material.

Durante el periodo de la II Guerra Mundial se interrumpió el estudio sobre el comportamiento de los superconductores, y se retoma hasta 1950 cuando los científicos soviéticos Landau y Ginzburg presentaron su teoría de transición de fase superconductor, en la cual utilizan la teoría cuántica y termodinámica. Mientras que por el bloque capitalista, Bardeen, Cooper y Schrieffer enuncian la ahora conocida teoría BCS, la cual logra una comprensión microscópica de la super-

Este artículo tiene como propósito ser material de apoyo en la enseñanza y aprendizaje del fenómeno de la superconductividad

conductividad a través del uso de la Física cuántica; en ella retoman la idea de Herbert Fröhlich sobre la existencia de pares formados por electrones (pares de Cooper), responsables de que se lleve

a cabo la superconductividad. Debido a la falta de comunicación entre científicos soviéticos y estadounidenses durante la Guerra Fría, Bardeen, Cooper y Schrieffer no tuvieron conocimiento de la teoría de Ginzburg y Landau, por lo que ambas teorías se desarrollaron de manera independiente.

Hacia finales del siglo XX, Bednorz y Müller anunciaron el descubrimiento de los superconductores de alta T_c , el cual se llevó a cabo en los laboratorios IBM en Zurich, Suiza. El material con el cual lo lograron no es un metal ni una aleación metálica sino un óxido metálico el cual contiene lantano, bario y cobre ($La_{1.9}Ba_{0.1}CuO_4$) con una temperatura crítica de 30 K (-243.15°C). Después del anuncio de este descubrimiento, muchos grupos de investigación se lanzaron a la búsqueda de superconductores de temperaturas críticas más altas. En la tabla 4 se realiza una síntesis de este marco teórico, mostrando los personajes importantes en el desarrollo de la teoría superconductora, así como su país de origen y sus aportaciones.

Tabla 4

Nombre	País	Aportación
Heike Karmmerlingh	Holanda	Descubre la superconductividad al licuar el mercurio (1911)
Willem H. Keesom, Arend J. Rutgers y Cornelis J. Gorter	Holanda	Aplican la termodinámica para explicar la superconductividad (1924-1933)
Walter Meissner y Robert Ochsenfeld	Alemania	Descubren el efecto Meissner (1933)
Fritz y Heinz London	Alemania	Teoría de London (1935)
Lev Landau y Vitaly Ginzburg	URSS	Teoría de Ginzburg-Landau (1950)
Herbert Fröhlich	Reino Unido	Sugiere la existencia de pares de electrones (1950)

Nombre	País	Aportación
John Bardeen, Leon Cooper y John R. Schrieffer	EU	Teoría BCS (1957)
Eleksey Alekseyevich Abrikosov	URSS	Predice teóricamente la existencia de los superconductores Tipo II (1957)
Johannes G. Bednorz y Karl A. Müller	Alemania Suiza	Descubren los superconductores de Alta T_c (1986)

Aplicaciones tecnológicas e impacto en la sociedad

Los superconductores, sobre todo de alta temperatura crítica, tiene aplicaciones tecnológicas muy interesantes tales como la fabricación de chips electrónicos o la construcción de trenes que se desplazan gracias a la levitación magnética (efecto Meissner), así como la distribución de energía eléctrica a través de cables fabricados con materiales superconductores que no permiten pérdidas de energía o la producción de campos magnéticos intensos en equipos de resonancia magnética utilizados en la investigación médica y hospitales; pero la mayoría de estas aplicaciones sólo son posibles en países desarrollados como Japón, Alemania o Estados Unidos debido a los altos costos que implican mantener a los superconductores a bajas temperaturas. En un futuro se desea encontrar materiales con temperaturas críticas cercanas a la temperatura ambiente, con lo cual se evitaría el problema de refrigeración, además de provocar su fabricación en serie y una masificación de su uso en la vida cotidiana. Muchos dispositivos como computadoras o teléfonos celulares funcionarían con el máximo de energía sin que haya pérdidas debido al efecto Joule, provocando un impacto en la sociedad. Es bien sabido, que la tecnología

genera cambios tanto sociales como económicos en la población y el uso cotidiano de superconductores no será la excepción.

Conclusiones

La superconductividad puede ser estudiada desde el punto de vista termodinámico, electromagnético o cuántico, lo que la hace un fenómeno fascinante. Para su estudio más profundo se requiere de conocimientos especializados en ciertas áreas de la Física; sin embargo, esto no exenta a los estudiantes comprender de manera general y sencilla al fenómeno, pero sobre todo conocer sus aplicaciones tecnológicas, en las cuales hay bastante expectativa especialmente con los superconductores de alta T_c cercanas a la temperatura ambiente, que en caso de lograrse, su descubrimiento y posterior aplicación provocaría un revolución tecnológica que impactaría su entorno, situación de la que se debe estar consciente.

Notas

1. Programas de Estudio de Física I a IV. Universidad Nacional Autónoma de México, Colegio de Ciencias y Humanidades, Área de Ciencias Experimentales (2003).
2. Al aplicar un voltaje en un material conductor, habrá un movimiento de electrones dando origen a una corriente eléctrica. Durante el proceso, los electrones colisionan entre sí provocando pérdida de energía, que se manifiesta de manera macroscópica con el calentamiento del material, conocido como efecto Joule.
3. Un material diamagnético es aquel que tiene la propiedad de ser repelido por el campo magnético de un objeto magnetizado (por ejemplo, un imán), cuyo caso contrario son los materiales ferromagnéticos que son atraídos por el campo magnético.
4. Así como los fotones son cuasipartículas asociadas a las ondas electromagnéticas, como la luz, cuya energía está cuantizada y es proporcional a la frecuencia de la onda, los fonones son partículas virtuales asociados al movimiento o vibración de los átomos en un sólido y cuya energía también está cuantizada y es proporcional a la frecuencia de vibración. Gracias a los fonones, se pueden explicar

muchas de las propiedades físicas de los sólidos a nivel microscópico, incluyendo las conductividades térmicas y eléctricas.

Créditos de imagen

Figura 1: Imágenes tomadas de: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/22/EXPULSION.png/220px-EXPULSION.png> (Modificada por el autor de este artículo). http://3.bp.blogspot.com/-DvDlpSd5hdk/T_ySQ4qK4AI/AAAAAAAAA7A/GP9R XuYiUv8/s1600/Magnet_4.jpg

Créditos de tabla

Tabla 2: Datos tomados de: Posadas Velázquez Yuri. *Física 2. Ondas, Electromagnetismo y Física Contemporánea*. Editorial Pegaso, México, 2006. <http://superconductors.org/Type1.htm>

Bibliografía

- ESCUADERO Roberto. *Superconductividad, ¿Qué es y en dónde buscar? Materiales Avanzados* Año 1, No. 2, pp. 6-8, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, México, 2004.
- GOODSTEIN David, Goodstein Judith. *Richard Feynman and the History of Superconductivity. Physics in Perspective 2*, pp. 30-47, 2000.
- MAGAÑA SOLÍS Luis Fernando, Los Superconductores, Colección *La Ciencia para Todos* No. 64, Fondo de Cultura Económica, México, 1997.
- Posadas Velázquez Yuri. *Física 2. Ondas, Electromagnetismo y Física Contemporánea*. Editorial Pegaso, México, 2006.
- RAMOS, Edmundo. D. y Sánchez Daniel. H. Premios Nobel 1972 Física: J. Bardeen, L. N. Cooper y J. R. Schrieffer. Superconductividad. *Ciencia Nueva 21*, pp. 3-7, Uruguay, 1972.
- TRISCONE Jean-Marc, Fisher Oystein. Las Superredes de Superconductores. *Mundo Científico 35*, Vol. 13. 1993.
- Materiales Superconductores. Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón ICMA-Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC-Universidad de Zaragoza. Archivo PDF. <http://www.unizar.es/icma/divulgacion/pdf/pdflevitsupercon.pdf>