FRANCISCO ZÚÑIGA, JULIO ORTEGA, MANUEL DE LLANO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

SUPERCONDUCTIVIDAD Y SUS APLICACIONES

RESUMEN. La superconductividad es un fenómeno físico que involucra desde la exploración de la materia oscura hasta la renovación teórica de principios físicos. Es, por definición, la desaparición completa de resistencia eléctrica en un material por debajo de una temperatura característica de este. En términos generales, en la investigación de superconductividad surgen dos preguntas. La primera se refiere a cuál es la teoría correcta que describe completamente la superconductividad; la segunda es con respecto a su capacidad de desarrollo tecnológico. Aquí tocamos tanto el fenómeno físico de la superconductividad, las teorías más relevantes que la describen, así como sus aplicaciones tecnológicas.

PALABRAS CLAVES: FÍSICA TEÓRICA, SUPERCONDUCTIVIDAD, TECNOLOGÍA

ABSTRACT. Superconductivity is a physical phenomenon encompassing from dark matter exploration to the theoretical updating of physical principles. It can be defined as the complete absence of electrical resistance in a material beyond a certain characteristic temperature. In general, research on superconductivity brings about two questions. The first question aims to find the suitable theoretical framework to completely describe superconductivity; the second one relates to its capacity for technological development. In this work we attempt to deal with both the physical phenomenon of superconductivity and the most relevant theories describing it, as well as with its technological applications.

KEYWORDS: THEORETICAL PHYSICS, SUPERCONDUCTIVITY, TECHNOLOGY

PARTE I. EL FENÓMENO DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

1. INTRODUCCIÓN

La superconductividad (SC), junto con la relatividad general o el descubrimiento de nuevas partículas elementales, es una manifestación extraña y desconcertante de la naturaleza. La peculiaridad más característica de un superconductor es que no presenta resistencia eléctrica alguna; sin embargo, el fenómeno ha resultado ser mucho más complejo, por lo que viene resistiéndose a una explicación completa y correcta. Aun así, la SC cuenta con la capacidad de abordar ambos aspectos, el teórico y el tecnológico.

Desde su descubrimiento en 1911 (Onnes, 1911), el fenómeno ha ofrecido, simultáneamente, principios físicos a la vez que un gran potencial tecnológico. Tan solo en la SC o temas relacionados se han otorgado ocho premios Nobel de Física.¹ En tecnología, hay aplicaciones al nivel de la investigación básica, como aceleradores de partículas elementales o de uso cotidiano en hospitales, por ejemplo, dispositivos de imagenología basada en resonancia magnética nuclear. La amplia variedad de disciplinas que abarca se debe, quizás, a que la SC es un fenómeno mucho más general de lo que se pensaba en un principio.

2. FENOMENOLOGÍA

La SC es un fenómeno cuántico con efectos macroscópicos observables. La parte cuántica y microscópica explica cómo un material se vuelve superconductor cuando, por debajo de una cierta temperatura crítica, característica de cada material, aparece un estado en el que muchos pares de electrones se encuentran en fase o con coherencia macroscópica (similar a la coherencia que presentan los fotones en un láser). Los electrones son fermiones, en tanto que los pares de electrones, llamados pares de Cooper que, por definición, están inmersos en un mar de Fermi de *todos* los electrones del sistema, son bosones.² Una característica de los bosones es la posibilidad de encontrarse en estados coherentes macroscópicos, tal como en un condensado de Bose-Einstein. Al parecer los pares de Cooper son el ingrediente esencial de la SC.

Por lo anterior, la explicación cuántica debe describir una transición de fase del estado normal al estado SC, la cual es emergente y macroscópica. En el momento de esta transición de fase las propiedades termodinámicas y electromagnéticas del material cambian radicalmente. Entre otras, las propiedades más sobresalientes que permiten tecnología como la de los trenes que levitan o los detectores de materia oscura son una resistencia eléctrica nula, la expulsión total de un campo magnético de su interior (llamado efecto Meissner-Ochsenfeld) y el efecto Josephson. En las secciones siguientes se ilustran estos conceptos.





2.1. SUPERCONDUCTORES CONVENCIONALES

La variedad de materiales SC es amplia y diversa. En primer lugar, se tienen los SC convencionales³ descritos por la teoría microscópica de John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schrieffer, conocida como BCS (Bardeen *et al.*, 1957). Estos comprenden los SC elementales, es decir, elementos de la Tabla Periódica de poco más de cien elementos donde más de cincuenta elementos son SC (Figura 1). Además de los elementales, existen SC de compuestos de elementos (por ejemplo, NbTi o H₃S). Aunque usualmente los SC convencionales tienen una temperatura crítica muy baja (< 23K), la máxima temperatura crítica (T_c = 203 K) registrada, apenas en el año 2015, corresponde al sulfuro de hidrógeno (H₃S) que, a presiones extremadamente altas (200 GPa ~ 1 x 10⁶ atm), es un SC convencional.

La SC convencional se explica a través de la formación de un estado coherente de muchos *pares de Cooper* (Cooper, 1956). Para explicarlos, usaremos un modelo simplificado. Imaginemos un material en la fase normal con sus núcleos atómicos posicionados en los vértices de una cuadrícula regular (Figura 2). Alrededor de estos núcleos, con carga neta positiva, hay electrones que deambulan por el material con rumbos aleatorios. A este arreglo regular de átomos se le llama red cristalina. Si disminuimos la temperatura hasta la TC del material, disminuimos también la energía cinética de cada átomo y, por lo tanto, sus vibraciones. Esto modifica la interacción que había entre los electrones libres y la red cristalina de la siguiente forma: al pasar un electrón (carga –q) entre varios iones (carga +q), este los atrae creando una zona con carga neta positiva, es decir, *polariza esa zona*. La zona con carga neta positiva atrae a otro electrón que viaja en sentido opuesto lo que genera una interacción entre electrones a través de la red cristalina (Figura 2). Dado que esto ocurre simultáneamente en todo el material, éste fenómeno tiene como resultado final la formación de un gran número de pares. Además, estos están en fase y se comportan en conjunto como una sola onda: en ese momento emerge la fase de SC.

Las vibraciones de la red cristalina se manifiestan como fonones.⁴ Estos son los cuantos de vibración análogos a los fotones de luz. La interacción mencionada arriba entre electrones y la red cristalina se llama interacción *electrón-fonón* y con ella se explican los pares de Cooper.



Figura 2. Mecanismo de formación de pares de electrones

En este punto conviene describir a la SC según estas propiedades macroscópicas. Para ello usamos la primera teoría fenomenológica correcta de SC, ideada en 1950 por V. L. Ginzburg y L. D. Landau. Esta teoría define la fase superconductora mediante el uso de una función de onda llamada parámetro de orden:

$$\psi(\mathbf{r}) = |\psi(\mathbf{r})| e^{i\phi \mathbf{r}} = \sqrt{(\mathbf{n}_{s}(\mathbf{r}) e^{i\phi \mathbf{r}})}$$

(1)

Este parámetro, como cualquier otra onda, tiene una fase (φ) y una amplitud ($|\psi(r)|$). La ecuación nos dice que *todos* los portadores de carga en un SC (es decir, los pares de Cooper) se comportan en conjunto como una sola onda. A esto se le conoce como coherencia macroscópica. De ella también se puede obtener la velocidad de los electrones que contribuyen al estado SC, así como la densidad de número de electrones en el estado superconductor dado por n_e = $|\psi|^2$.

NÚCLEOS # 6	ABRIL DE 2019	FRANCISCO ZÚÑIGA JULIO ORTEGA MANUEL DE LLANO	SUPERCONDUCTIVIDAD Y SUS APLICACIONES PAG 31 -50

La naturaleza macroscópica de esta teoría le permite ser muy intuitiva y de fácil uso en términos experimentales. Esta explicación de la SC, así como las propiedades del parámetro de orden, se usan en la descripción de SC convencional y las emplearemos más adelante para entender los compuestos llamados cupratos, el efecto Josephson y el mecanismo de sensores magnéticos SC (SQUID).

2.2. SUPERCONDUCTORES NO CONVENCIONALES

Los SC no convencionales son los que no se describen por la teoría BCS, como los SC cupratos (Müller y Bednorz, 1987a), los SC basados en hierro (Kamihara *et al.*, 2006), los SC orgánicos y los SC bismutatos. Las temperaturas críticas de algunos de estos se muestran en la Tabla 1. Puesto que estos tienen, en promedio, temperaturas críticas más altas que las de los SC convencionales, han motivado la investigación con el objetivo de alcanzar temperaturas críticas cada vez más cercanas a la temperatura ambiente (\approx 300 K) y, por lo tanto, con mayor aplicación tecnológica. Después de la teoría BCS y el surgimiento de los llamados SC de alta temperatura (HTSC, en inglés), las teorías han tomado caminos divergentes, pero ninguna en la actualidad explica satisfactoriamente el fenómeno. El panorama experimental es similar en el sentido de que no existe una "receta teórica" para sintetizarlos, y eso a su vez explica el descubrimiento por prueba y error de nuevos SC con cada vez mayores temperaturas críticas (Figura 3). Por último, esto tiene repercusiones directas sobre la ingeniería porque una porción no despreciable de las aplicaciones se basa en los materiales con alta T_c. De acuerdo con lo anterior, y a pesar de ello, la SC es un arquetipo de un cambio de paradigma.

FAMILIA	MATERIAL	тс (К)	MATERIAL	тс (К)
	H ₃ S (200GPa)	203.0	V₃Ga	16.5
	H ₂ S (190GPa)	190.0	NbN	16.0
	Nb ₃ GE	23.0	MoN	12.0
	Nb ₃ Ge (AL _o Ge _{o2})	20.9	La ₃ In	10.4
	Nb ₃ Sn	18.1	NbTi	10
	Nb ₃ Al	17.5	Ti2Co	3.44
	V ₃ Si	17.1	UCo	1.7
CUPRATOS	H _g Ba _z Ca _z Cu ₃ O ₈₊₈ (30Gpa)	164.0	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125.0
	HgBa₂Ca₂Cu₃O _{8+δ} (25Gpa)	155.0	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110.0
	Hg _{os} Pb _{o2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x	133.0	YBa ₂ Cu ₃ O ₇₋₆	95.0
	HgBa2Ca2Cu3O ₈₊₆	133.0	(La _{0.9} Ba _{0.1}) ₂ CuO ₄ (1Gpa)	52.0
	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀ (7Gpa)	131.0		
HIERRO	SmFeAsO _{0.85}	55.0	$La_{\alpha 5}Y_{\alpha 5}FeAsO_{\alpha 6}$	43.1
	GdFeAsO _{o85}	53.5	SmFeAsO _{0.9} F _{0.1}	43.0
	NdFeAsO _{0.89} F _{0.11}	52.0	AlCaAlOFeAs)	30.0
	PrFeAsO _{0.89} F _{0.11}	52.0	LaO _{0.9} F _{0.2} FeAs	28.5
	ErFeAsO _{1-x}	45.0	LaO _{0.89} F _{0.11} FeAs	26.0
ORGÁNICOS	Rb ₃ C ₆₀	30.7	K ₂ RBC ₆₀	21.5
	(NH ₃) ₄ Na ₂ CsC ₆₀	29.6	K ₃ C ₆₀	18.0
	(NH ₃) ₄ K ₃ C ₆₀	28.0	κ-(ET) ₂ CU[N(CN) ₂]CL	13.1
	K2CsC60	24.0	CaC	11.5



Figura 3. Gráfica de las Tc vs. año de su descubrimiento (Nota: 1 GPa = 9870 atm)

Tabla 1. Las Tc de varios SC

2.2.1. CUPRATOS

Los SC cupratos u óxidos de cobre son compuestos cerámicos y generalmente aislantes en el estado normal. Estos materiales presentan una complejidad visible en su diagrama de fases (Figura 4), notablemente más complicado que las dos fases de un SC convencional (cuyas fases son normal y de SC SC). Las teorías actuales apuntan hacia esa complejidad también.



Figura 4. Diagrama de fases de un SC cuprato

Temperatura vs. nivel de dopaje de huecos en los óxidos de cobre. Cada color representa una fase diferente, pero no todas presentan SC. La zona verde presenta SC donde T_{S.onset}, T_{C.onset}, y T_{SC.onset} se refieren a las temperaturas en que inician las fluctuaciones de espín, de carga y superconductora, respectivamente. Aquí T* es la temperatura por debajo de la que ocurre el *pseudogap*, una de las fases más importantes que podría señalar la formación de pares de Cooper preformados. AF indica la región de antiferromagnetismo, mientras que d-SC se refiere a la región de SC de tipo d, establecidas a las temperaturas de Néel TN y crítica TC, respectivamente. La región rayada en la parte inferior al centro representa la presencia del orden de carga situado en TCDW, mientras que la región rayada a la izquierda es análoga para el orden de la densidad de espín situada en TSDW. Las flechas indican puntos donde hay cambios de fase a T = o K para las fases de SC.

La estructura general de los cupratos consiste en capas intercaladas de aislantes y óxidos de cobre. Los portadores de carga (pares de Cooper) se localizan en un número n = 1, 2, 3... de capas de óxidos de cobre CuO_2 unidas por capas intermedias de Ca (Figura 5 y Figura 6). Al conjunto de capas de $(CuO_2/Ca)_{n-1}CuO_2$ se le llama bloque activo. Además, intercalados con estos bloques activos, se tienen bloques de retención de carga compuestos de EO/ $(AO_x)_m$ /EO, donde AO_x es un óxido con A = Bi, Pb, Tl, Hg, Au, Cu, Ca, B, Al o Ga y E = Ba, Sr. La fórmula química general de estos materiales es $A_m E_2 Ca_{n-1} Cu_0 O_{2_{n+m+2+y}}$ y se abrevia A-m2(n-1)n.



Figura 5. Estructura en capas

superconductoras y aislantes alternadas. La estructura electrónica es en general una hibridización de un hueco $3d_x 2^-y^2$ en los sitios del cobre con orbitales de oxígeno coordinados en los planos $2p_x y 2p_y$.



Figura 6. La estructura de los óxidos de cobre es en general A-m2(n-1) $n(A_mE_2Ca_n-_1Cu_nO_{2n}+_m+_2+_y)$ para m=1. AO_x es un óxido arbitrario con A = Bi, Pb, Tl, Hg, Au, Cu, Ca, B, Al, Ga. EO se refiere a una monocapa de algún elemento alcalinotérreo E = Ba, Sr.

2.2.2. SUPERCONDUCTORES BASADOS EN HIERRO

En 2006 (Kamihara *et al.*) se descubrió la SC basada en hierro (FeSC) en el material LaOFeP y en 2008 se descubrió SC de alta temperatura (T = 26K) en LaOFeAs. Este hecho descartó, nuevamente, viejas creencias sobre qué tipos de materiales podrían ser o no SC y mostró que la SC puede ser un fenómeno mucho más común. Los avances experimentales previos realizados principalmente en cupratos permitieron que la FeSC se desarrollara rápidamente. Si bien ahora se sabe que la FeSC tiene muchas similitudes con los cupratos, también difieren drásticamente de ellos en algunos aspectos de principio.



Figura 7. Diagrama de fases de cupratos y SC basados en hierro. La SC en sistemas basados en hierro puede iniciarse no solo por dopaje de huecos,⁵ sino también mediante presión o sustituyendo un elemento isovalente del grupo del nitrógeno por otro. De las fases mostradas, la fase nemática (T > T_N) es de las más debatidas hoy en día. Algunos SC con dopajes altos de huecos son $KF_{e2}A_{s2}$ y $AF_{e2}A_{s2}$ (con A = K, Rb, Cs) para el dopaje con electrones. Adaptado de Basov y Chubukov, 2011.

Al igual que los cupratos, los SC basados en hierro tienen un diagrama de fases muy complejo (Figura 7). Sin embargo, a diferencia de los cupratos, la FeSC no presenta la fase de *pseudogap* y no se encuentran tan fuertemente correlacionados como los cupratos. Otra diferencia importante es que los cupratos se caracterizan por una simetría de onda dx²- y² en su parámetro de orden, ecuación (1), mientras que la FeSC presenta distintas simetrías de onda s dependiendo del material. La mayoría de los compuestos tienen cinco superficies de Fermi (SF) que cruzan el nivel de Fermi (Figura 8).



Figura 8. Topología de la superficie de Fermi (SF).⁶ Se muestran las simetrías del parámetro de orden en el espacio de momentos (ver nota 6). Las figuras mostradas son representaciones en una gráfica polar de la fase y la magnitud del parámetro de orden Las diferentes simetrías mostradas son de "onda s" (llamada simetría esférica, en la cual al girar la imagen 90°, esta se ve igual) o de "onda d" (en la cual al girarla 90°, la imagen ya no se ve igual). El parámetro de orden vale cero en los nodos y en los cambios de color cambia la fase por un valor de π. a) Simetrías en FeSC. Existen tres tipos de simetría de onda s del parámetro de orden, dos isótropas s++ y s± y otra nodal s±. El símbolo ± representa un cambio de signo entre las SF de huecos y de electrones. b) Simetría dx²-y² encontrada en cupratos, que muestra 4 nodos y 4 antínodos. Adaptada de Hirschfeld *et al.*, 2011.

2.3. EFECTO JOSEPHSON

Descubierto en 1962 por el estudiante británico de posgrado Brian Josephson, el efecto Josephson es la manifestación de una corriente eléctrica entre dos superconductores separados. Este fenómeno se puede entender usando el parámetro de onda complejo de la ecn. (1) $\psi(r) = |\psi(r)|e^{i\phi r}$. En este caso se tienen dos fases, una por cada SC. En general, la fase ϕ nos dice que cada uno de los SC está en un estado con fase coherente (es decir, todos los pares de Cooper están en fase). Puesto que las fases son diferentes, la diferencia entre estas genera una corriente superconductora en el medio que separa a los SC. En general, al arreglo de una barrera no superconductora entre dos SC se le llama unión de Josephson.

Una unión de Josephson tiene la idónea característica de convertir DC en AC y viceversa. La potencia de salida y el desempeño general de una unión de Josephson disminuye si el voltaje aumenta mucho. Esto se soluciona agregando más uniones de Josephson en serie y la potencia disponible aumenta con el número de uniones. Además, si las uniones están en fase, pueden formar una fuente de radiación coherente (algo similar a un láser). Es aquí donde se aprovechan las características de los cupratos. Más adelante se verán sus aplicaciones en dispositivos THz y SQUIDs.

3. TEORÍAS ACTUALES

3.1. BARDEEN-COOPER-SCHRIEFFER (BCS)

La teoría BCS del año 1957 es el hito histórico que marca un antes y un después en los principios físicos subyacentes de la SC y, como tal, es el sustento de las teorías más actuales, sin mencionar su impacto en otras áreas de la física.⁷

La teoría BCS se basó en dos principios: el primero, explicado por Cooper, es la formación de pares de electrones o *pares de Cooper* (Cooper, 1956), los cuales siguen siendo el único ingrediente universalmente aceptado en SC convencional y no convencional o HTSC. El segundo, por parte de Schrieffer, fue la formulación de una *función de onda de muchos cuerpos*, la cual explica un estado coherente en un sentido similar al de la ecn. (1), pero en forma microscópica. En esta descripción, los electrones cercanos a un nivel específico de energía en la superficie de Fermi forman pares de Cooper^v. El mecanismo *atractivo* específico de formación de pares de Cooper ligados es un proceso de emisión y absorción de un fonón —o cuanto de la vibración de la red iónica— entre electrones que, de por sí, son repulsivos entre sí.

Cabe mencionar que, aunque la mayoría de los materiales descritos por la teoría de BCS tienen, en general, una TC < 23 K, la BCS no se restringe a esas temperaturas. Es decir, puede predecir TC muy altas. De hecho, la "receta teórica" de BCS para producir materiales con *altas* temperaturas críticas es muy simple y consiste en la combinación de elementos ligeros como hidrógeno (con fonones de alta frecuencia), un acoplamiento electrón-fonón fuerte y una alta densidad de estados de energía.

3.2. ELIASHBERG

La teoría BCS fue modificada y ampliada en la década de 1960 por Eliashberg (Eliashberg, 1960), Nambu, Morel y Anderson y Schrieffer para añadir una interacción dinámica electrón-fonón. Agregaron un efecto temporal a la interacción electrón-fonón, con la cual se describieron correctamente propiedades de los SC para los cuales la teoría BCS no era suficiente, por ser de acoplamiento débil.

Estos avances siguen siendo fundamentales para describir muchos SC, y resaltaron la importancia de la interacción electrón-fonón en la formación del estado SC. El concepto de pares de Cooper ahora se puede interpretar como un efecto retardado de la interacción mediada por fonones. Este proceso retardado atractivo explica por qué pueden existir pares de electrones cuando sabemos que los electrones se repelen entre sí. Específicamente, la teoría de Eliashberg permite calcular propiedades de SC con interacción fuerte como el Pb o el Nb. Así, por ejemplo, una relación universal de todos los SC convencionales (a temperatura absoluta T = 0 K) es $2\Delta(0)/k_BT_c \simeq 3.53$, se modifica según la teoría de Eliashberg para plomo dando un valor de 4,5, que es mucho más cercano a los datos experimentales.

El enfoque de la teoría de Eliashberg, sin embargo, sigue siendo hacia SC convencionales con temperaturas relativamente bajas y no es claro todavía cómo podría aplicarse a SC no convencionales. Este es el caso de los SC hechos de perovskita, con óxidos de bismuto como BaKBiO, el cual se considera distinto de los cupratos y, por lo tanto, entra en la SC mediada por una interacción electrón-fonón. Sin embargo, esta interacción es tan pequeña que no se entiende bien en qué medida participa en la formación del estado SC.

3.3. MÁS ALLÁ DE BCS

La teoría BCS junto con la de Ginzburg-Landau son las bases conceptuales para entender la SC convencional. Sin embargo, durante mucho tiempo se especuló equivocadamente acerca de un límite superior de T_c = 40 K, dado por BCS, y, en consecuencia, se pensaba que la SC se encontraba completamente descrita. Con el descubrimiento en 1986 de la SC de alta temperatura (HTSC en inglés) en óxidos de cobre LaBaCuO (Müller y Bednorz, 1987b) se rompió con este esquema conceptual, convirtiéndose en uno de los eventos científicos más importantes del siglo XX. Después de esto, se descubrieron ocho familias de SC, en su momento llamados de alta temperatura, es decir, T_c > 23 K (la temperatura crítica más alta anterior a 1986). En general, los SC HTSC se definen según si su T_c > T_{NL} (NL= nitrógeno líquido). Al día de hoy, existen SC de tan alta T_c que pueden enfriarse con NL y hasta con freón (Figura 2). Puesto que la producción del NL es bastante más barata que la del helio líquido usada inicialmente y que la tendencia de los precios de los HTSC es a la baja, se espera mucho de ellos.

Después de la teoría BCS el panorama de la SC se encontraba en un punto lejano a su descripción completa. Es más, no es exagerado decir que fue solo el comienzo de un proceso profuso de resultados teóricos, experimentales y tecnológicos. La familia de SC que más recursos intelectuales ha recibido son los cupratos y muchas teorías han sido formuladas. Aunque muchas de ellas han sido muy buenas, ninguna tiene un apoyo universal experimental (a diferencia de la BCS que sí lo tiene en SC convencional). Por otro lado, el caso de la SC basada en hierro, descubierta apenas en 2008 (Kamihara *et al.*, 2006), tiene un panorama similar en el cual no se puede predecir cómo crear dichos materiales. Como se mencionó antes, muchos de estos SC se describen por una interacción electrón-fonón. A continuación se presentan algunas de las teorías actuales que amplían a las pasadas y que incluyen en su descripción a los cupratos y a los SC basados en hierro.

3.4. CROSSOVER BCS-BOSE

Una de las teorías más interesantes en SC la desarrollaron desde antes del año 1957 Schafroth, Blatt y Butler, quienes especularon que la SC surgía de un condensado de Bose-Einstein (BEC, en inglés) de pares de Cooper bosónicos. Es decir, se establece que los pares de Cooper son bosones, a diferencia de los pares de BCS que no lo son (ver nota 2). Ahora se sabe que tanto la teoría BCS como la teoría BEC son dos casos especiales de otra teoría más general llamada *crossover* (o "cruce") BCS-Bose. Esta conecta ambas teorías de manera continua, mientras que por un lado se obtiene el límite BCS con apareamientos en el espacio de momento, en el otro extremo, se obtiene el límite de pares localizados de un BEC. Esta teoría sigue siendo muy estudiada y no se limita a SC, también incluye gases atómicos ultraenfriados y sistemas de átomos en 1D.

3.5. GBEC

De la teoría del *crossover* surgieron modelos de gas *binarios* de bosones y fermiones en los que se incluían pares de electrones y electrones sueltos. Surgieron después modelos de gases *ternarios* tras añadir pares bosónicos de huecos a los modelos binarios. En el formalismo GBEC (del inglés, generalización del condensado de Bose-Einstein) (Tolmachev, 2000; De Llano y Tolmachev, 2003) se incluyen estos pares de huecos (ver nota 5) y de electrones como bosones estrictos (a diferencia de los pares de BCS en donde no lo son). La GBEC es una descripción más general porque incluye como casos especiales las teorías de BCS, del *crossover* BCS-Bose y de la condensación de Bose-Einstein (BEC). En ese sentido, se confirma el condensado de BCS como una teoría muy particular de BEC cuando hay igual número de pares de huecos que de electrones. Lo cual se confirma, cuando a partir de la GBEC se obtienen *precisamente* tanto la ecuación de BCS de la brecha para *toda* temperatura y para *todo* acoplamiento, así como la energía de condensación (o diferencia de energía libre de Helmholtz entre las fases normal y superconductora) para toda temperatura.

3.6. TEORÍAS DE LOS CUPRATOS

• **Banda de valencia resonante** (Anderson, 1987). P. Anderson (premio Nobel) propuso esta teoría en 1987 poco después del descubrimiento de los cupratos. En ella se menciona que el mecanismo de la SC es predominantemente electrónico y magnético, aunque puede haber interacciones fonónicas débiles. Fue el primero en plantear un mecanismo de apareamiento de electrones repulsivos para cupratos.

- *Generalizaciones de BCS y BEC.* Como se mencionó, se tienen teorías como el *GBEC* (Tolmachev, 2000; De Llano y Tolmachev, 2003), que generalizan e incluyen como casos especiales tanto a la teoría BCS como a la BEC. Este tipo de teorías implican que los cupratos no son completamente diferentes de los convencionales. Para describirlos hace falta encontrar un parámetro de orden diferente al de BCS o de Eliashberg, que los describa correctamente.
- *Fluctuaciones superconductoras.* En esta teoría, propuesta por Emery y Kivelson (1995), se supone que en los cupratos el apareamiento ocurre a una temperatura mucho mayor que la temperatura en la que se da la coherencia de fase de los pares de Cooper. Esto es muy diferente a BCS, en donde la formación de pares y el condensado de pares ocurre a la misma temperatura. La discrepancia en temperaturas en el caso de los cupratos se justifica dado que la densidad del superfluido es muy baja ya que la dimensionalidad de los cupratos es 2D (o *cuasi*-2D). Esto, sin embargo, no explica en principio por qué ocurre el apareamiento.
- **Criticalidad cuántica.** S. Sachdev *et al.* (Sachdev y Keimer, 2011) describen la SC mediante transiciones de fases en el cero absoluto, es decir, debidas a un parámetro de orden que no depende de la temperatura. En la imagen del diagrama de fases de la Figura 3 el parámetro de orden no térmico es la cantidad de huecos (llamada dopaje de huecos) en el material. En el caso de los cupratos, se dice que la SC resulta cuando una fase no superconductora (por ejemplo, magnética) desaparece por medio de dopaje o presión. Esta idea ha sido complementada con modelos usando la teoría de cuerdas.
- R. Laughlin *et al.* (Chakravarty *et al.*, 2001) proponen, desde el año 2000, una explicación basándose en la densidad de la onda-d. En 2014, R. Laughlin (premio Nobel) calculó el diagrama de fases completo a partir de un enfoque **Hartree-Fock** (Laughlin, 2014).
- C. Varma propuso un orden llamado *loop-current* (Varma, 1997) en donde se enfatiza un orden orbital que no rompe la simetría traslacional. Esto ha sido corroborado por dispersión de neutrones.
- P. Lee publica una teoría llamada de *apareamiento ampereano* (Lee, 2014) en la que describe la fase del *pseudogap* y otros aspectos experimentales. Según Lee, el *pseudogap* es un estado de apareamiento en el que los electrones se encuentran del mismo lado de la superficie de Fermi (y no en lados contrarios como en BCS). Aquí el *pseudogap* es un tipo de SC sin coherencia de fase donde los pares de Cooper son de momento neto diferente de cero y pertenecen a una clase general llamada onda de densidad de pares.
- Uno de los descubrimientos más importantes en los cupratos es la observación de correlaciones de corto alcance de la *onda de densidad de carga* (CDW, en inglés) por arriba y por abajo de T_c en los cupratos. Varios investigadores, como Emery y Kivelson, y Sachdev, especulan que esto puede ser la explicación definitiva del *pseudogap*, aunque a la fecha aún no es consistente con la fenomenología. Kivelson *et al.*, por otro lado, estudian un orden nemático (filamentos que mantienen un orden direccional, mas no posicional) que es una onda de densidad de carga análoga a un cristal líquido nemático. En ese mismo sentido, se tiene el estudio de franjas (o *stripes*, en inglés) que son ondas de densidad de espín o de carga (SDW o CDW).

3.7. TEORÍAS DE LOS SC BASADOS EN HIERRO

Actualmente no se conocen bien los mecanismos de formación de pares de Cooper en los SC basados en hierro (FeSC) y, por lo tanto, no se conoce exactamente cuál es la estructura electrónica de estos materiales. Su clasificación general depende de la simetría que tiene el parámetro de orden que los describe como se puede ver en la Figura 8. Se piensa que la simetría predominante es de tipo esférica s±, en donde el sistema mantiene globalmente una simetría de "onda s" o esférica, pero su parámetro de onda cambia de signo entre las superficies de Fermi de huecos y de electrones. Se cree que la simetría correcta en la mayoría de los FeSC es s±. La prueba experimental que mejor sustenta esto es por dispersión de neutrones; sin embargo, las otras simetrías no han quedado descartadas.

Apareamiento por fluctuaciones de espín. Como se mencionó arriba, muchos investigadores creen que la simetría de la mayoría de los FeSC es s±. Esto se justifica porque en el diagrama de fases (Figura 7) la fase magnética (o SDW) se encuentra muy cercana a la superconductora y puede ser un precursor de la SC.

- Apareamiento por anidamiento de la superficie de Fermi. El anidamiento (nesting en inglés) de superficies de Fermi ocurre cuando segmentos paralelos de una superficie de Fermi se conectan a través de un vector k en el espacio de momentos (ver nota 6). Esto se asocia con algún mecanismo de dispersión de electrones, añadiéndoles una cantidad de momento. Esta cantidad de momento es el vector k que conecta muchos estados en una misma celda unitaria de la red cristalina. Bajo este mecanismo es posible generar brechas de energía. Además, es indicativo de una fase magnética y se asocia también con SDW, por lo que puede explicar gran parte del diagrama de fases asociado.
- Criticalidad cuántica (Sachdev y Keimer, 2011). Al igual que en los cupratos, las intersecciones a T = o K en el diagrama de fases se pueden explicar con una teoría de transiciones de fase cuánticas. Esto explicaría, en parte, la fase nemática en el diagrama de fases.
- GBEC. La GBEC puede describir este fenómeno, siempre y cuando se encuentren tanto los parámetros adecuados como la simetría apropiada de acoplamiento de los CP. De dicha labor surgen diversas teorías que pueden ser aplicables para este caso particular.

PARTE II. APLICACIONES DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

4. SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE CONTAMINANTES

El uso de la SC en el *tratamiento de agua* o separación en general de sólidos disueltos en líquidos se basa en un proceso de separación magnética. Este proceso separa materiales sólidos suspendidos usando campos magnéticos. Desde 1976 la separación magnética ha sido probada para separar óxidos de hierro en arcillas (caolinitas). Pero también se puede hacer en materiales con baja respuesta a campos magnéticos de baja susceptibilidad magnética agregando un adsorbente ferromagnético (alta susceptibilidad magnética). Para lograr una separación rápida sin importar el tipo de material, se agregan materiales ferromagnéticos que puedan ser adsorbidos por el sólido. En conjunto con los fuertes campos magnéticos muchos tipos de materiales orgánicos o incluso iones pueden separarse selectivamente.

La fuerza con que se separa un sólido suspendido en un medio, como agua, se expresa como

$$F_{M} = \frac{V\Delta_{X}}{\mu_{0}} (B \cdot \nabla) B \approx \frac{V_{Xsolido}}{\mu_{0}} (B \cdot \nabla) B = V(M \cdot \nabla) B$$
⁽²⁾

donde F_{M} es la fuerza magnética con que se atrae a la partícula suspendida, V es el volumen del sólido, $\Delta \chi$ la diferencia de susceptibilidades entre el medio y de la partícula, *B* el campo magnético y $M = \chi/\mu_{o}B$ la magnetización.⁸

De acuerdo con esta ecuación, para separar un sólido suspendido en agua hay que aumentar la fuerza magnética y para ello es necesario aumentar el volumen del sólido (V), la magnetización (M = χ H, que depende del material) o el gradiente del campo magnético (∇ H, que depende de la geometría del dispositivo). Un material ferromagnético tendrá, en general, una alta magnetización incluso cuando el campo magnético sea bajo. Los materiales paramagnéticos y diamagnéticos, en cambio, tendrán una baja magnetización que aumenta si aumenta el campo magnético y la F_M será lo suficientemente fuerte solo si el campo magnético lo es. Los imanes SC pueden generar campos muy fuertes capaces de separar estos materiales, pero no a la velocidad industrial requerida normalmente con otro tipo de métodos.

El proceso de separación magnética se vuelve práctico con el uso de superconductores porque estos producen un fuerte campo magnético (> 1T) en un espacio amplio y usando relativamente poca energía. En comparación con otros sistemas de aguas residuales (por ejemplo, lodos activados), y considerando el tipo de sólidos por separar, este sistema puede tener rendimientos muy altos y reducir los costos de instalación, operación y mantenimiento. Por su pequeño tamaño es versátil y puede usarse de manera independiente o implementarse a sistemas nuevos o viejos. Por ejemplo, si se incorpora a un sistema de lodos activados en funcionamiento, el exceso de lodo residual puede separarse con separación magnética y hacer más eficiente el proceso.

Algunas aplicaciones prácticas comprobadas de sistemas de separación magnética usando SC son:

- Tratamiento de aguas de una planta de papel (Nishijima y Takeda, 2006) (Figura 9).
- Purificación de agua (Oka et al., 2008) y de agua de río (Morita et al., 2014).
- Separación de cobre de aguas residuales.
- Remoción de arsénico en aguas geotérmicas.
- Separación de lixiviados.
- Recuperación del uranio en cobre mineral.



En conclusión, los sistemas de separación magnética con SC son una herramienta con varias aplicaciones prácticas, de tamaño pequeño y de bajo costo. Existen casos comprobados, como se mostró arriba, en donde estas aplicaciones pueden funcionar independientemente o integrarse a sistemas ya instalados. El problema de los contaminantes y en particular de la contaminación del agua se acentúa con el rápido crecimiento de zonas urbanizadas. Esto puede implicar, además, la disminución de agua potable. Este tipo de sistemas ofrece una solución eficiente al tratamiento de agua residual industrial, a la purificación de agua y a la recuperación de sólidos suspendidos. Además, por el bajo costo de operación es aplicable en cualquier país, sea desarrollado o en desarrollo.

5. TECNOLOGÍA TERAHERTZ (TH_z)

La tecnología THz es una de las grandes promesas en cuanto a avances tecnológicos. Entre otras aplicaciones, incluye detección de bombas, detección de alta precisión de sustancias químicas y biológicas, así como análisis estructural de concreto, polímeros y metales. Todo esto sin ser dañino a tejidos celulares vivos.

La radiación en THz se encuentra entre ondas milimétricas (100 GHz) y el infrarrojo lejano (10 THz), o sea, la afamada brecha THz (Figura 10). Esta región del espectro electromagnético se distingue por tener una alta sensibilidad a líquidos polares, materiales no conductores y resulta en una respuesta espectroscópica a muchos otros materiales.

El problema más grave de la tecnología THz ha sido la dificultad de crear emisores y detectores sensibles a esas frecuencias (Armstrong, 2012). Desde los años 60 hasta finales de los 90, el desarrollo de estos dispositivos se mantuvo estancado. En los últimos años, sin embargo, con el avance de la HTSC, el panorama ha cambiado favorablemente. Los cupratos, debido a propiedades intrínsecas, facilitan la fabricación de tecnología THz. Dado el poco tiempo de desarrollo de ambas tecnologías, las aplicaciones, aunque con mayor sensibilidad que la de sus predecesores semiconductores, tienen una eficiencia energética baja. En esta sección se presenta una introducción de su funcionamiento y se discuten las posibles aplicaciones de la tecnología THz con el uso de SC.

Figura 9. Esquema del sistema de separación magnética con SC en el tratamiento de agua residual de una fábrica de papel. El sistema es pequeño, con no más de 6 m × 6 m de superficie; el agua tratada tiene calidad aceptable; y puede procesar hasta 2000 L/día.

FRANCISCO ZÚÑIGA JULIO ORTEGA MANUEL DE LLANO



Figura 10. Región del espectro electromagnético con frecuencias entre 100 GHz y 10 THz. La longitud de onda a esta escala es del orden de las vibraciones intramoleculares e intermoleculares.

5.1. FUNCIONAMIENTO

La fabricación de emisores de radiación THz coherente se basa en la estructura por capas de los SC cupratos y en aprovechar el efecto Josephson.

La estructura de los SC cupratos consiste en capas superconductoras de CuO2 alternadas con capas aislantes, como se mencionó en la sección 2.2.1. En algunos SC las capas de CuO2 se acoplan débilmente de tal forma que el material se comporta como un conjunto de uniones de Josephson en serie (Figura 11). Esta característica de los cupratos es lo que se busca explotar para fabricar emisores THz.



Figura 11. Estructura del SC Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+ δ} (o bien BSCCO) usado para la fabricación de emisores THz. La estructura en capas superconductoras y aislantes alternadas permite que el material mismo sea una colección de uniones de Josephson en serie.

Las propiedades más llamativas son una radiación intrínsecamente segura, no destructiva y altamente sensitiva. La seguridad, sin embargo, no es una característica exclusiva de esta porción del espectro electromagnético, también son seguras las ondas de radio, las interferométricas y las milimétricas. Todos estos sistemas de radar también sirven para la evaluación no destructiva de estructuras o detección de sustancias y cada uno destaca en alguna labor en particular. En general, el monitoreo con radares tiene varias desventajas: no pueden penetrar cualquier material (por ej., conductores); a menores frecuencias y mayor profundidad de penetración hay menor resolución; el procesamiento e interpretación de señales puede ser complicado y caro; y los niveles de radiación permitidos están fuertemente regulados por los gobiernos, que limitan la profundidad de penetración por consecuencia. Por lo anterior, la sensibilidad de los radares en THz, aunque sobresaliente, se restringe a capas cercanas a la superficie (< 20 mm).

Para fabricar un emisor THz a partir de un cuprato se requiere diseñar una "mesa." Esta se crea a partir de un solo bloque de cristal SC. La mesa, que queda en la parte superior del cristal, se comporta como una caja resonante (Figura 12). La resonancia depende de la geometría y de la fase en que se encuentren las uniones de Josephson. El voltaje se escala proporcionalmente al número de uniones de Josephson y si un voltaje se aplica en dirección vertical, la radiación THz se emite por los lados de las uniones de Josephson. Hay dispositivos fabricados con emisiones a frecuencias entre 250 GHz y 1 THz. La frecuencia de emisión puede calibrarse de acuerdo con el ancho, al voltaje (variando el número de uniones de Josephson que oscilan coherentemente) o a la forma de la mesa.

FRANCISCO ZÚÑIGA JULIO ORTEGA MANUEL DE LLANO

Figura 12. Emisor THz hecho de BSCCO. Una "mesa" es una cavidad resonante hecha de un solo cristal de BSCCO. Sus dimensiones se restringen por el ancho w. El dispositivo emite radiación THz por los lados con una frecuencia que depende del ancho w y del voltaje aplicado verticalmente. Las dimensiones aproximadas de una mesa son de 1-2 micrones de alto (aproximadamente 1000 juntas de Josephson), 40-100 micrones de ancho y varios cientos de micrones en longitud. Ver Welp *et al.*, 2013.



5.2. APLICACIONES

- Sensores de sustancias químicas. La tecnología THz puede detectar sustancias peligrosas o contaminantes porque la absorción y emisión electromagnética de estas es mayoritariamente en THz (esto es, las vibraciones intermoleculares e intramoleculares emiten precisamente en esa región del espectro). Cada sustancia tiene un patrón espectral a esas frecuencias y la detección de sustancias implica también su identificación. Por otro lado, también sirve para obtener información espacial, sobre todo, en sistemas inhomogéneos, tales como aquellos que incluyen alto contenido biológico (Walther et al., 2010).
- Detectores de sustancias no metálicas. La sensibilidad de los dispositivos THz permite la detección con alta precisión de materiales sólidos no metálicos enterrados. En particular se ha estudiado la detección de materiales explosivos y minas no metálicas, con resultados positivos (Osiander *et al.*, 2003). En este estudio, se encontró que un dispositivo THz puede identificar minas enterradas a 20 cm de profundidad con alta precisión en condiciones adversas (arena húmeda).
- Inspección de la integridad de adhesivos, tales como soldaduras termoplásticas, selladores, burbujas de aire o separación de láminas.
- *Caracterización de polímeros:* índice de refracción, coeficiente de absorción, grosor o temperatura de transición vítrea de un polímero.
- Inspección de calidad de plásticos. Distribución y orientación de las fibras en compuestos RFP o defectos en materiales compuestos.
- *Detección de corrosión*. Una demostración de la sensibilidad de sensores THz a la corrosión bajo una capa aislante térmica se presentó en un estudio realizado por la NASA en el transbordador espacial (*Space shuttle*) (Madaras *et al.*, 2008) (Figura 13).
- Evaluación de estructuras de concreto. El concreto y la madera son materiales adecuados para ser estudiados con radicación THz porque muestran una alta transmitancia en este rango de frecuencias. Por esta razón, es fácil detectar vacíos, grietas o agua difundida en el interior de la estructura (Oyama et al., 2009) (Figura 14). También es útil en la detección de inclusiones de cloro, responsable de la corrosión del acero de refuerzo en concreto armado.

Figura 13. Detección de corrosión en un sustrato metálico. A la izquierda se ve la corrosión sobre la placa metálica. En el centro, la imagen generada con un dispositivo THz sin cubrirse. A la derecha, la imagen en THz de la placa cubierta por una capa de 24,5 mm del material aislante (Madaras *et al.*, 2008).



FRANCISCO ZÚÑIGA JULIO ORTEGA MANUEL DE LLANO



6. DISPOSITIVOS SQUID

Los dispositivos SC de interferencia cuántica (SQUID, por sus siglas en inglés) son probablemente los sensores más sensibles ante perturbaciones de un campo magnético. Con exquisita precisión y respuesta, pueden servir como amplificadores de señales minúsculas. Esto los hace muy versátiles y, entre otras aplicaciones, se encuentran la evaluación no destructiva de estructuras, sensores magnéticos de muy alta precisión, detectores de materia oscura, medición electromagnética de fenómenos geosísmicos, etc.

6.1. FUNCIONAMIENTO

Un SQUID se basa en el efecto Josephson (ver sección 2.3). Para formar un SQUID se requiere juntar dos uniones de Josephson y formar un anillo como el mostrado en la Figura 15. La corriente a través de cada unión depende de la diferencia de fases y la corriente total es la suma de las corrientes en cada unión.



Figura 15. Esquema de un SQUID formado por dos uniones de Josephson.

6.2. APLICACIONES DE LOS SQUID

- Detección de materia oscura. Según la astrofísica y sus precisas mediciones, la materia común que conocemos en forma de electrones, protones, neutrones, etc. forma apenas una sexta parte de la masa del universo. La masa restante, que conforma la mayoría del universo, se encuentra en una forma de materia que no emite radiación alguna y, por lo tanto, no se puede detectar con telescopios, de ahí su nombre "materia oscura". Esta materia rodea y permea todo lo contenido en las galaxias. Existen dos candidatos de partículas que forman la materia oscura: o son WIMPS (partículas masivas que interactúan débilmente) o son axiones. En ambos casos existen detectores basados en SQUID para detectarlas.⁹
- *Evaluación no destructiva en aeronaves*. Se puede usar para detectar grietas en aviones (Allweins *et al.,* 2003) y llantas de aviones.
- Inspección de puentes. Se puede usar para evaluar anomalías en el acero dentro de estructuras de concreto. Las anomalías en un elemento metálico (por ejemplo, un tensor de acero embebido en el concreto de un puente) incrementan el llamado campo de demagnetización. Este corresponde al campo dentro del volumen del material y se suele llamar así porque apunta en la dirección opuesta a la magnetización. Cuando existen anomalías, como grietas, se distorsiona la guía del flujo de alta permeabilidad y, como consecuencia, afecta la magnetización local. Por lo tanto, hay un aumento en el campo de demagnetización. Con un SQUID se pueden detectar las anomalías sin destruir el concreto (Figura 16).

Figura 16. Esquema del sistema para detectar grietas en el acero de un puente. Un electroimán magnetiza el elemento de acero pretensado longitudinalmente y un SQUID detecta la distorsión del campo generada por la grieta. Adaptado de Krause *et al.*, 2002.



- Investigación previa y posterior a un sismo. En el laboratorio subterráneo de bajo ruido (LSBB, Laboratoire Souterrain à Bas Bruit) se realizan investigaciones previas y posteriores a un sismo. De momento no es posible predecir sismos, pero estos estudios muestran los efectos electromagnéticos de uno: el uso del SQUID mide alteraciones magnéticas diminutas en la ionósfera *previas* a un sismo, debidas al movimiento de la Tierra, y su efecto en la atmósfera; en segundo lugar mide el efecto electromagnético en las partículas de suelo posteriores a las ondas sísmicas (Waysand *et al.*, 2011). Ambos efectos sirven para caracterizar sismos de magnitudes grandes con M > 5 en la escala de Richter.
- Evaluación de compuestos con refuerzo de fibras poliméricas (RFP). Los SQUID tienen la ventaja de generar mapeos tridimensionales del volumen del material con gran precisión. Por ejemplo, se han usado SQUID de HTSC para medir el deterioro en paneles compuestos de RFP debido a cargas transversales concentradas. En estas aplicaciones las distorsiones del campo magnético se correlacionan con el deterioro de los paneles. También se pueden detectar grietas internas (a más de 20 mm) en compuestos de RFP y en paneles con múltiples capas.

7. TRENES DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA (MAGLEV)

Quizás los trenes de levitación magnética (maglev) son la aplicación más emblemática de la SC. Los maglev propulsados y suspendidos con SC (maglev SC) son una de las aplicaciones de la SC más desarrolladas. Además, son totalmente interdisciplinarios entre investigación básica, desarrollo tecnológico e infraestructura civil. Esto ha dotado a los maglev de la innovación necesaria para ser competitivos contra transporte aéreo en distancias medias (Figura 17).



Figura 17. Tiempo total de viaje contra distancia recorrida de diferentes modos de transporte. Por debajo de 2000 km un sistema maglev SC ofrece un tiempo total de viaje más corto que un avión.

7.1. FUNCIONAMIENTO

En general, un sistema maglev se puede definir como un método de propulsión y levitación magnética sin el uso de motores o ruedas tradicionales. La levitación de un maglev es usualmente del orden de centímetros sobre una guía magnética, con lo que reducen las vibraciones, anulándose cualquier fricción con las vías y, por ello, es más silencioso. Consecuentemente, no depende de la tracción y su aceleración y velocidad —hasta 603 km/h— son mejores y su desgaste es menor que los de sus contrapartes con ruedas. Los trenes maglev SC logran esta levitación con imanes SC y no es raro que su infraestructura sea completamente diferente a los ferrocarriles tradicionales y que, por eso, constituyan un modo estrictamente diferente que los ferrocarriles. El término maglev es por esa razón más amplio y comprende no solo a los vehículos, sino también al sistema de vías de levitación y propulsión.

Para lograr la levitación y propulsión de un maglev SC (con SC convencionales) el tren es equipado con imanes SC a ambos lados (Figura 18). En cada imán hay cuatro bobinas superconductoras de niobio-titanio (Nb-Ti), un SC con una temperatura crítica de ~10 K. Cada imán SC puede producir un campo magnético de 5,5 T y sus dimensiones son de 5,4 m de largo, 1,17 m de alto y pesa alrededor de 1400 kg. La fuerza que generan estos imanes es suficiente para hacer levitar unos 10 cm de manera estable a un tren cargado con pasajeros.

Este tipo de tren usa levitación electrodinámica (EDS en inglés) a diferencia de los maglev no SC que usan levitación electromagnética (EMS, como el *Transrapid* alemán). La EDS implica la exposición de un material conductor ante campos magnéticos variables en el tiempo. En este caso, el movimiento relativo de los imanes SC a bordo del tren representan tales campos magnéticos variables y en las vías (a los costados) se tiene el material conductor. Esto es, en principio, levitación por la ley de inducción de Faraday y específicamente por la ley de Lenz: $\xi = -\partial \emptyset / \partial t$. Según esta ley, si existe un flujo de corriente eléctrica, su dirección siempre será opuesta al cambio que la produjo; similar a lo que ocurre según la tercera ley de Newton de acción-reacción en un sistema mecánico.



Figura 18. Imán SC a bordo de un tren maglev. Adaptado de Nishijima *et al.*, 2013.

Los sistemas EDS y EMS tienen ventajas y desventajas. Una desventaja de un sistema EDS es evidente por la ley de Lenz mencionada arriba. La variación en el campo ($\partial \phi / \partial t$) depende directamente de la velocidad del tren, por esta razón, si la velocidad es menor a 150 km/h, la variación en el flujo no será suficiente para producir la levitación. En consecuencia, el tren debe estar equipado para avanzar sobre vías con ruedas antes de levitar y, por lo tanto, toda la instalación debe tener una "doble infraestructura", una de levitación y una de vías. En última instancia, esto incrementa el costo total. Estas desventajas tienen su contraparte positiva, porque un sistema EDS es inherentemente estable comparado con uno EMS y más estable que uno de vías tradicional. Los sistemas EMS funcionan por medio de atracción electromagnética con electroimanes tradicionales, los cuales son inestables *per se* según el teorema de Earnshaw. En cambio, los sistemas EDS, que funcionan por medio de repulsión, no se ven afectados en principio por esa misma inestabilidad. Así, un tren con EDS, regresa siempre a su punto de equilibrio por un balance de fuerzas repulsivas hacia arriba (ley de Lenz entre el imán SC y las vías) y otra hacia abajo (la gravedad). En la Figura 18 se muestra cómo se pueden adaptar HTSC en lugar o al mismo tiempo que un refrigerante de helio líquido. Esta implementación y/o el cambio de imanes de Nb-Ti por algún HTSC puede reducir eventualmente el costo de operación, disminuir el uso de energía y evitar el uso de ruedas y, por lo tanto, evitar una "segunda infraestructura". Por otro lado, los trenes maglev SC aprovechan la generación de energía por medio de un sistema de inducción electromagnética. En el piso de las vías se instalan circuitos alimentados de corriente alterna, los cuales tienen formas cerradas y generan por ley de Faraday un campo magnético dinámico. Cuando pasa un tren, unas bobinas instaladas a bordo generan una corriente que alimenta el equipo a bordo del tren.

8. ENERGÍA

8.1. APLICACIONES EN ENERGÍA

- Motores SC de barco con potencias de hasta 36 MW (Gamble et al., 2011) y eficiencias muy altas.
- *Generadores eólicos de 10 MW*. El generador llamado *Sea Titan*, fabricado por la compañía AMSC, será el más grande del mundo. ¹⁰
- *Computadoras superconductoras* de alta eficiencia energética y, por lo tanto, idóneas para construir supercomputadoras (Volkmann *et al.*, 2013).
- Cables SC. Los cables SC son una tecnología reciente y con aplicaciones prácticas en un futuro cercano con la capacidad de cambiar por completo el panorama de la transmisión de energía eléctrica. Hoy en día, la centralización de la generación de energía eléctrica —en grandes proyectos hidroeléctricos, termoeléctricos, etc.— implica que las distancias de transmisión sean del orden de cientos de km. A grandes distancias, un cable de transmisión no SC tiene pérdidas debidas a procesos físicos inherentes e inevitables." Es aquí donde los SC tienen una ventaja notable en desempeño y en costos. Según Oestergaard *et al.* (2001), las pérdidas de energía en cables SC disminuyen notoriamente al aumentar la corriente, comparado con cables de alta tensión usuales (Figura 19 y Figura 20).
- Almacenamiento de energía magnética superconductora (SMES). Un sistema SMES es un sistema que almacena energía magnética en un solenoide SC. Es prometedor porque aporta altas eficiencias (> 97 %), una respuesta muy rápida (ms) y una alta energía de salida (MW). Existen SMES con capacidad de producir salidas del orden de MW en milisegundos, lo cual es útil en la estabilización de sistemas y control de frecuencia y, por lo tanto, en generadores por viento (Shi et al., 2008). Un SMES se compone de tres partes: un sistema criogénico, un imán SC y un convertidor (ver Figura 21).



Figura 19. El cable de cobre a la derecha, con dimensiones de 11 cm de alto, 8 cm de ancho y 28 cm de largo, puede conducir una corriente de 12,500 A a temperatura ambiente. El cable de NbTi, a su derecha, en el estado SC, con una $T_c = 1.9$ K, conduce la misma corriente (Imagen: CERN).



Figura 20. Pérdidas totales contra corriente en cables normales y SC. A corrientes muy altas, los cables de HTSC mantienen las pérdidas muy bajas. A corrientes pequeñas, las pérdidas en los cables HTSC se deben al sistema de nitrógeno líquido.



Figura 21. Componentes de un dispositivo SMES (Molina, 2010)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allweins, K., Gierelt, G., Krause, H. J. y Kreutzbruck, M. (2003). "Defect detection in thick aircraft samples based on HTS SQUID-magnetometry and pattern recognition". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, *13*, 250.
- Anderson, P. W. (1987). "The Resonating Valence Bond State in La₂CuO₄ and Superconductivity". *Science*, 235, 1196.
- Armstrong, C. M. (2012). "The Truth About Terahertz". IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News. Recuperado de: https:// spectrum.ieee.org/aerospace/military/the-truth-about-terahertz.
- Bardeen, J., Cooper, L. N. y Schrieffer, J. R. (1957). "Theory of Superconductivity". *Physical Review* 108, 1175.
- Basov, D. N. y Chubukov, A. V. (2011). "Manifesto for a higher *Tc*", *Nature Physics*, Comments and Opinion. Recuperado de: https://

doi.org/10.1038/nphys1975.

- Chakravarty, S., Laughlin, R. B., Morr, D. K. y Nayak, C. (2001). "Hidden order in the cuprates". *Physical Review B, 63*, 094503.
- Cooper, L. N. (1956). "Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas". *Physical Review 104*, 11890.
- Eliashberg, G. M. (1960). "Interactions between Electrons and Lattice Vibrations in a Superconductor". *Sov. Phys. JETP*, *11*, 696.
- Emery, V. J. y Kivelson, S. A. (1995). "Importance of phase fluctuations in superconductors with small superfluid density". *Nature*, *374*, 434.
- Gamble, B., Snitchler, G. y MacDonald, T. (2011). "Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity 21*, 1083.

- Ginzburg, V. L. y Landau, L. D. (1965). "On the theory of superconductivity". *Collected papers of L.D. Landau*, Nueva York: Pergamon Press.
- Hirschfeld, P. J., Korshunov, M. M. y Mazin, I. I. (2011). "Gap symmetry and structure of Fe-based superconductors". *Reports on Progress in Physics* 74, 124508.
- Kamihara, Y., Hiramatsu, H., Hirano, M., Kawamura, R., Yanagi, H., Kamiya, T. y Hosono, H. (2006). "Iron-Based Layered Superconductor: LaOFeP" *Journal of the American Chemical Society 128*, 10012.
- Krause, H. J., Wolf, W., Glaas, W., Zimmermann, E., Faley, M. I., Sawade, G., Mattheus, R., et al. (2002). "SQUID array for magnetic inspection of prestressed concrete bridges". *Physica C: Superconductivity*, *368*, 91.
- Laughlin, R. B. (2014) "Hartree-Fock computation of the high-Tc cuprate phase diagram". *Physical Review B 89*, 035134.
- Lee, P. A. (2014). "Amperean Pairing and the Pseudogap Phase of Cuprate Superconductors". *Physical Review X* 4, 031017.
- De Llano, M. y Tolmachev, V. V. (2003). "Multiple phases in a new statistical boson-fermion model of superconductivity". *Physica A* 317, 546.
- Madaras, E. I., Anastasi, R. F., Smith, S. W., Seebo, J. P., Walker, J. L., Lomness, J. K., Hintze, P. E., et al. (2008). "Application of terahertz radiation to the detection of corrosion under the shuttle's thermal protection system". *AIP Conference Proceedings 975*, 421.
- Molina, M. G. (2010). "Dynamic Modelling and Control Design of Advanced Energy Storage for Power System Applications". Recuperado de :https://doi.org/10.5772/7092.
- Morita, M., Isogami, H. y Yumoto, S. (2014). "Application to River Water Purification of Super-conducting Magnetic Separation with Magnetic Particles as Seeding Agents". *Journal of the Japan Society* of Powder and Powder Metallurgy, 61, S145.
- Müller, K. A. y Bednorz, J. G. (1987a). "The discovery of a class of high-temperature superconductors". Science (New York, N.Y.) 237, 1133.
- Müller, K. A. y Bednorz, J. G. (1987b). "The discovery of a class of high-temperature superconductors". *Science* 237, 1133.
- Nishijima, S., Eckroad, S., Marian, A., Choi, K, Kim, W. S., Terai, M., Deng, Z., Zheng, J., Wang, J. y Umemoto, K. (2013) "Superconductivity and the environment: a Roadmap". *Superconductor Science and Technology 26*, 113001.
- Nishijima, S. y Takeda, S. (2006) "Superconducting High Gradient Magnetic Separation for Purification of Wastewater From Paper Factory". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity 16*, 1142.

NOTAS

 1913: H. K. Onnes; 1962: L. D. Landau; 1972: J. Bardeen, L. N. Cooper y J. R. Schrieffer; 1973: L. Esaki y I. Giaever; 1978: P. L. Kapitsa; 1987: J. G. Bednorz y K. A. Müller; 1996: D. M. Lee, D. D. Osheroff y R. C. Richardson; 2003: A. A. Abrikosov, V. L. Ginsburg y A. J. Leggett.

- Oestergaard, J., Okholm, J., Lomholt, K. y Toennesen, O. (2001). "Energy losses of superconducting power transmission cables in the grid". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 11, 2375.
- Oka, T., Kanayama, H., Fukui, S., Ogawa, J., Sato, T., Ooizumi, M., Terasawa, T., Itoh, Y. y Yabuno, R. (2008). "Application of HTS bulk magnet system to the magnetic separation techniques for water purification". *Physica C*, 468, 2128.
- Onnes H. K. (1911). "Further experiments with liquid helium. C. On the change of electric resistance of pure metals at very low temperatures etc. IV. The resistance of pure mercury at helium temperatures". *Proc. K. Ned. Akad. Wet* 13, 1274.
- Osiander, R., Miragliotta, J., Jiang, Z., Xu, J. y Zhang, X. C. (2003) "Mine Field Detection and Identification using THz Spectroscopic Imaging". Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 5070, 1.
- Oyama, Y., Zhen, L., Tanabe, T. y Kagaya, M. (2009) "Sub-terahertz imaging of defects in building blocks". NDT & E International 42, 28.
- Sachdev, S. y Keimer, B. (2011) "Quantum criticality" *Physics Today.* Recuperado de : https://doi.org/10.1063/1.3554314.
- Shi, J., Tang, Y. J., Ren, L., Li, J. D. y Chen, S. J. (2008). "Application of SMES in wind farm to improve voltage stability". *Physica C* 468, 2100.
- Tolmachev, V. V. (2000). "Superconducting Bose-Einstein condensates of Cooper pairs interacting with electrons". *Physics Letters A*, *266*, 400.
- Varma, C. M. (1997). "Non-Fermi-liquid states and pairing instability of a general model of copper oxide metals". *Physical Review B* 55, 14554.
- Volkmann, M. H., Sahu, A., Fourie, C. J. y Mukhanov, O. A. (2013). "Implementation of energy efficient single flux quantum digital circuits with sub-aJ/bit operation". *Superconductor Science and Technology 26*, 015002.
- Walther, M., Fischer, B. M., Ortner, A., Bitzer, A., Thoman, A. y Helm, H. (2010) "Chemical sensing and imaging with pulsed terahertz radiation". *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 397, 1009.
- Waysand, G., Pozzo di Borgo, E., Soula, S., Pyée, M., Marfaing, J., Bois J., Yedlin, M., Blancon, R., Gaffet, S., Barroy, P., Auguste, M., Boyer, D. y Cavaillou, A. (2011). "Azimuthal analysis of [SQUID]2 signals for mesopause and sprites excitations". *I-DUST 2010 - 3rd Inter-Disciplinary Underground Science & Technology Conference*, N.^o 02004, 6.
- Welp, U., Kadowaki, K. y Kleiner, R. (2013). "Superconducting emitters of THz radiation". *Nature Photonics* 7, 702.
- 2. Bosones y fermiones. Todas las partículas, como los fonones y los fotones o los electrones y los protones, tienen una característica intrínseca llamada *espín*, que en muchos casos actúa como un momento angular (una cantidad vectorial que caracteriza la rota-

ción de un cuerpo). Según su espín, las partículas se clasifican en dos grandes grupos: *bosones o fermiones*. Un *bosón* es una partícula con espín total entero, es decir, con un valor \hbar n, con n= o, 1, 2, 3,... siendo \hbar la constante de Planck. Los bosones se caracterizan por seguir una estadística de Bose-Einstein y pueden generar condesados de Bose-Einstein. Ejemplos de bosones son los fonones, los fotones, los gluones, así como partículas compuestas como los pares de Cooper o como núcleos estables con masa atómica par como el Helio-4. Los *fermiones*, en cambio, tienen un espín total múltiplo de un medio, es decir, con un valor \hbar n/2, con n= 1, 3, 5... y obedecen a una estadística de Fermi-Dirac y al principio de exclusión de Pauli. Ejemplos de fermiones son los electrones, quarks, o partículas compuestas como los protones, o núcleos estables con masa atómica impar como el Helio-3.

- 3. En este texto se usarán dos diferentes clasificaciones de la SC. La primera depende de la teoría que los describe: esto es, si los describe la teoría BCS son SC convencionales, si no los describe la BCS, son no convencionales. La segunda clasificación depende de su temperatura crítica: son superconductores de baja temperatura si su temperatura crítica es menor que la temperatura de ebullición del nitrógeno líquido (NL), es decir, si T_c < T_{NL}. Y son SC de alta temperatura si al contrario, T_c > T_{NL}. La primera clasificación es mejor para describir las teorías y por eso se usa en la primera parte, en cambio, la segunda sirve mejor para describir las aplicaciones y por eso se usa en la segunda parte.
- 4. Fonón. Se refiere al cuanto de vibración en una red cristalina o arreglo periódico de átomos, como en un metal, por ejemplo. Es el análogo al cuanto de luz o *fotón*. Los fonones vienen de ondas de sonido o vibraciones en un sólido. La dualidad onda-partícula, que dice que existe una onda asociada a cada partícula, también funciona inversamente: existe una partícula asociada a cada onda. De esta forma los fonones son también partículas con momento y energía. Sin embargo, al existir solamente en redes cristalinas no son partículas elementales y por eso se les llama cuasipartículas. Estas partículas interactúan con los electrones en la red formando la llamada interacción electrón-fonón, la cual, en SC, da lugar a la formación de pares de Cooper.
- 5. Un hueco es la ausencia de un electrón en un material y, por lo tanto, no es una partícula física. A pesar de esto, se comporta como si lo fuera porque tiene las características opuestas a un electrón (carga, movimiento, etc.). Los pares de huecos son bosones al igual que pares de electrones.

- 6. Superficie de Fermi. Superficie en el espacio de momentos, que separa los estados electrónicos ocupados (dentro del mar de Fermi) de los desocupados (fuera del mar de Fermi) a temperatura T = o K. El espacio de momento se refiere a un formalismo en materia condensada que aprovecha la periodicidad de los átomos en un sólido y, en vez de asociar cada electrón con una posición, se asocia con un vector de momento, k.
- 7. Una breve historia de la superconductividad de C. Slichter se encuentra en "Superconductivity: Moments of Discovery," sección de la página web del American Institute of Physics, https://history. aip.org/history/exhibits/mod/superconductivity/.
- 8. La susceptibilidad magnética, χ , es una constante de proporcionalidad que relaciona la magnetización M de un material en presencia de un campo magnético H: M = χ H. χ puede tomar valores positivos o negativos. La susceptibilidad magnética es positiva en materiales magnéticos permanentes, como los ferromagnéticos, ferrimagnéticos o antiferromagnéticos, y en materiales magnéticos no permanentes, como los paramagnéticos; es negativa en materiales diamagnéticos. La susceptibilidad no siempre es una constante: existen materiales para los cuales la magnetización no sigue una relación lineal como en ferromagnéticos. En esos casos, se debe sustituir por una función M(H) que describa al material.
- Para ver más información sobre el generador eólico Sea Titan visitar: http://www.amsc.com/documents/seatitan-10-mw-windturbine-data-sheet/
- 10. Los gastos por pérdidas de energía son uno de los principales motivos por los que esta tecnología u otras, como redes inteligentes, pueden tener éxito. En países como EUA o Alemania, las pérdidas son aproximadamente del 6 % o 4 %, respectivamente. En países como México, las pérdidas alcanzan hasta 13,5 % y equivalen a pérdidas monetarias importantes.
- Para saber más sobre los experimentos de detección de materia oscura visitar las siguientes páginas del Departamento de Energía de Estados Unidos: https://science.energy.gov/hep/community-resources/next-generation of-direct-detection/. O el experimento Axion Dark Matter Experiment (ADMX): http://depts. washington.edu/admx/index.shtml.

Manuel de Llano. Luego de laborar en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se pasó al Instituto de Investigaciones en Materiales, también en la UNAM. Publicó un libro de texto Mecánica cuántica cuya tercera edición apareció en 2015. Ha publicado más de 210 artículos en revistas indizadas. Cuenta con más de 1600 citas hasta el 2017. Dirigió 40 tesis (27 de posgrado y 13 de licenciatura). Ha llevado adelante extensas colaboraciones internacionales productivas y ha sido profesor invitado en universidades de Argentina, Brasil, Chile, España, Estados Unidos, el Reino Unido y Sudáfrica.

Julio Ortega Segura. Es candidato al grado de doctor en Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Actualmente desarrolla el trabajo "Cuantificación de la energía de condensación de un material superconductor BCS para toda temperatura por debajo de Tc", para la obtención del grado de doctor.

Francisco Zúñiga Frías. Es ingeniero y maestro en Ciencias por la UNAM. Sus intereses se centran en la física teórica de materia condensada y, en particular, en la investigación de superconductividad y el condensado de Bose-Einstein generalizado (GBEC), así como en las aplicaciones tecnológicas de estas dos áreas en ingeniería.