

LOS PRIMEROS 10 AÑOS DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD DE ALTA TEMPERATURA

por

Pedro Antonio Prieto Pulido¹

Resumen

Prieto Pulido, P. A.: Los primeros 10 años de la superconductividad de alta temperatura. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21**(80): 271-280, 1997. ISSN 0370-3908.

Han pasado 10 años desde que el primer superconductor de alta temperatura crítica fue descubierto, este acontecimiento en la última parte del presente siglo dio lugar a una verdadera revolución en la física. En este artículo se describirán los acontecimientos que dieron lugar a su descubrimiento y los desarrollos logrados desde esa fecha hasta hoy. Se hará énfasis en la estructura laminar cuasi-bidimensional y anisotrópica de estos materiales así como en las propiedades básicas de los cupratos superconductores. Se presentará el estado actual de nuestro entendimiento teórico de la física asociada con la superconductividad a alta temperatura. Se mostrarán las aplicaciones actuales de estos nuevos materiales y los desarrollos más probables en el próximo futuro.

Palabras claves: Superconductores, Superconductividad de Alta Temperatura, Películas Delgadas.

Abstract

It is now 10 years since the first high-temperature superconductor was discovered. This event leads to a revolution in the physics of the last part of the present century. In this article the background leading to their discovery and the heady events during these years will be described. The two-dimensional layer-like and anisotropic structure of these materials, as well as the basic properties of the superconducting cuprates are emphasized. Our present theoretical understanding of the physical nature of their superconducting behavior will be described. A discussion is given of the application of these new materials and likely near future developments.

Key words: Superconductors, High- T_c Superconductivity, Thin Films.

¹ Director Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle A.A. 25360 Cali, Colombia.

1. Introducción

El flujo de corriente eléctrica sin resistencia a través de un material conductor, un sueño de cualquier ingeniero eléctrico, fue encontrado por primera vez por el científico holandés Heike Kamerlingh Onnes en 1911 (Onnes, 1911). La superconductividad, como Kamerlingh denominó a este fenómeno, posibilita una serie amplia de aplicaciones; sin embargo las bajas temperaturas a las cuales la superconductividad podía ocurrir, unos cuantos grados kelvin por encima del cero absoluto de temperatura, presentaba enormes dificultades técnicas. Además, el paso de una corriente eléctrica alta a través de un material superconductor genera un campo magnético lo suficientemente intenso que por encima de un cierto valor crítico, que depende del material, destruye la superconductividad. Los campos magnéticos críticos para elementos superconductores tales como plomo o estaño son tan bajos como unos cuantos gauss. El mismo Onnes, galardonado en 1913 con el premio Nobel de Física, se dio rápidamente cuenta de que si la superconductividad pudiese tener alguna aplicación práctica, la temperatura crítica T_c , temperatura que marca el inicio del estado superconductor, y el campo magnético crítico tendrían que incrementarse dramáticamente.

Por muchos años la superconductividad permaneció como un oscuro e intrincado efecto. En 1933 Meissner y Ochsenfeld en Berlín, (Meissner et al. 1933) hicieron otro descubrimiento de fundamental importancia: Ellos observaron que cuando un material superconductor es enfriado en presencia de un campo magnético, por debajo de su temperatura crítica el flujo magnético es expelido de su interior. Este efecto conocido como efecto Meissner indica que un superconductor se comporta como un diamagneto perfecto. Sin embargo, este efecto no puede ser explicado partiendo de considerar la resistividad cero del material conductor y de las ecuaciones de Maxwell que rigen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos. Esto significa que el diamagnetismo perfecto (efecto meissner) junto con la resistividad cero son las propiedades fundamentales del estado superconductor. Superconductores en los cuales la expulsión de flujo es total se conocen como superconductores tipo I y son normalmente los elementos simples en la tabla periódica.

En la década de los 50 se hacen enormes progresos en la búsqueda de materiales superconductores con temperaturas críticas mayores y campos críticos más intensos, especialmente en los grandes laboratorios americanos tales como los de la General Electric, Bell Telephone, Westinghouse, etc., dando lugar a la aparición de super-

conductores tipo II caracterizados por una expulsión parcial del flujo magnético conservándose la resistividad cero. Este tipo de materiales normalmente son aleaciones intermetálicas que poseen temperaturas críticas más altas y campos magnéticos críticos más intensos que los correspondientes a superconductores tipo I. Los superconductores más usados en la generación de campos magnéticos de varias Teslas son compuestos de Nb-Ti y Nb-Sn.

Desde el punto de vista de encontrar una teoría que explique la superconductividad, solo hasta el final de los años 30 Gorter y Cassimir (Cassimir 1940) plantean el modelo de los dos fluidos; en el cual el gas de electrones tiene dos componentes, una componente, sin entropía que transporta la supercorriente mientras que la otra se comporta como un gas normal de electrones. Por debajo de T_c los electrones superconductores cortocircuitan los normales y la resistencia se hace cero. En la misma década los hermanos Fritz y Heinz London (London-London, 1935) asumiendo que un superconductor es un diamagneto perfecto y aplicando las ecuaciones de Maxwell fueron capaces de predecir el efecto Meissner y de mostrar que el campo magnético decae en el interior del superconductor con una longitud característica conocida como longitud de penetración λ .

Una explicación a nivel microscópico del fenómeno superconductor solo aparece en 1956 cuando Leon Cooper (Cooper 1956) plantea la existencia de los "Pares de Cooper", como una pareja de electrones con momento y spin opuestos unidos por una fuerza de tipo atractivo producida por la interacción con la red de iones positivos en la cual ellos se mueven. El desarrollo de esta idea condujo a Bardeen, Cooper y Schrieffer (Bardeen et al, 1957) a la famosa teoría conocida como BCS, por sus autores en la cual la superconductividad aparece como consecuencia de la existencia de los pares de Cooper mediados por la interacción electrón-fonón. La teoría BCS predice la existencia de una brecha de energía $\Delta(T)$ sobre el nivel de Fermi que desaparece a la temperatura crítica T_c con una relación $2\Delta(0)/k_B T_c \approx 3.5$, donde k_B es la constante de Boltzmann. Una serie de experimentos confirmaron este valor en los ahora llamados superconductores clásicos. Así mismo la teoría BCS permite determinar la distancia promedio a la cual se encuentran los dos electrones que forman el par de Cooper, conocida como longitud de coherencia ξ , concepto que había sido introducido por los teóricos rusos Ginzburg y Landau en 1950 (Ginzburg-Landau, 1950) en una descripción fenomenológica de la superconductividad. Los parámetros longitud de penetración λ y longitud de coherencia ξ son

fundamentales en la superconductividad y aparecen en forma natural en el marco de la teoría BCS.

En 1973 Gvaler (Gvaler et al, 1973) produce una película estequiométrica de Nb_3Ge con una T_c de 23.1 K, temperatura que se encuentra por encima de la temperatura de ebullición del hidrógeno líquido (20 K). Por un buen número de años los intentos de obtener materiales con temperaturas críticas más altas fueron infructuosos lo que llevó a pensar que el fenómeno superconductor estaba restringido a temperaturas muy bajas.

2. La búsqueda de superconductores de alta temperatura, SATC

Dos investigadores, Berdnoz y Müller (Müller et al. 1980) de la IBM en Zurich, Suiza, notaron que el enorme trabajo para aumentar la T_c había estado dirigido a compuestos intermetálicos especialmente del tipo A15 y cayeron en cuenta que era muy poco probable que este camino tuviese algún futuro; así que se centraron en el estudio de óxidos metálicos. El $SrTiO_3$ es un ferroeléctrico que se hace superconductor cuando es deficiente en oxígeno. Su T_c es muy baja, del orden de 0.3 K y puede llegar a 0.7 K si se dopa con Nb. Una T_c de 13 K fue encontrada en los óxidos de Li-Ti (Johnston et al. 1973) y en el compuesto de $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$ por Sleight y colaboradores (Sleight et al. 1975). En el otoño de 1985 Berdnoz y Müller analizando el trabajo llevado a cabo en el grupo francés de Bernard Raveau en Caen en el sistema La-Ba-Cu-O (Michel et al. 1985) que posee una estructura tipo perovskita y que exhibía un comportamiento metálico en la conductividad en el rango entre 300 y 100 K, consideraron que este compuesto podría hacerse superconductor variando la composición y el tratamiento térmico. Fue así como a mediados de enero de 1986 ellos observaron una caída brusca en la resistencia alrededor de 11 K como se muestra en la figura 1, que podría indicar el inicio del estado superconductor. En abril de 1986 Bednorz y Müller enviaron a la revista Zeitschrift für Physik el artículo titulado "Possible high- T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system" (Bednorz - Müller 1986) donde discutían la síntesis del compuesto deficiente en oxígeno $Ba_{0.75}La_{1-x}Cu_5O_{5(3-y)}$. Este trabajo pionero apareció en la edición de Septiembre de 1986 y al final del mismo año las medidas de efecto Meissner (Bednorz et al. 1987b) comprobaron efectivamente la existencia inequívoca de la superconductividad en estos óxidos de cobre. Medidas cuidadosas llevadas a cabo en diferentes laboratorios alrededor del mundo, permitieron concluir un carácter bidimensional de la superconductividad en estos compuestos debida probablemente al

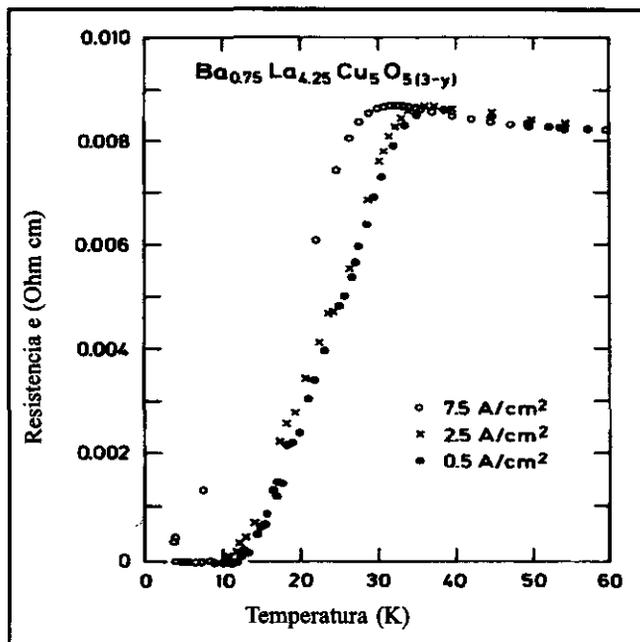


Figura 1. Dependencia con la temperatura de la resistividad eléctrica en el compuesto La-Ba-Cu-O, que representa la primera indicación de SATC en los cupratos (Bednorz & Müller 1987).

comportamiento de los electrones en los planos de óxido de cobre.

El reemplazo de Ba por Sr y otros metales alcalinos permitió elevar la temperatura crítica a 36 K (Cava et al. 1987). Simultáneamente el grupo de Chu en Texas (Chu et al. 1987) mostró que la T_c de estos compuestos aumentaba la presión, alcanzando T_c hasta de 52 K, indicando con esto que lo que se requería a fin de elevar la T_c era encontrar un elemento que ejerciera una presión interna en la estructura. Esto condujo al grupo de Chu a introducir Y en reemplazo de La, lo que permitió por primera vez producir el compuesto $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Wu et al. 1987) conocido como YBCO o compuesto tipo 123 por su estequiometría. Este compuesto mostró una T_c de 90 K, temperatura crítica muy por encima de la temperatura del nitrógeno líquido, 77 K. La figura 2 muestra el comportamiento de la resistividad y la susceptibilidad magnética con la temperatura para una película delgada epitaxial del sistema $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ con una T_c de 91 K y con una clara señal del efecto Meissner.

El descubrimiento de Wu y Chu marcó el inicio de una revolución tecnológica basada en las aplicaciones de la superconductividad a temperaturas por encima de la del nitrógeno líquido. En la reunión de Marzo de 1987 del

American Institute of Physics, conocida como el "Woodstock of Physics", se dieron a conocer los nuevos hallazgos que mostraban el inicio de una nueva era tecnológica.

Una indicación del dramático incremento en el valor T_C después del descubrimiento de Bednorz y Müller se aprecia en la figura 3, que muestra el valor de T_C como función del año: En los 75 años que siguieron al descubrimiento de Kamerlingh Onnes en 1911 la T_C aumentó a una tasa de 3 K/década mientras que en los 10 años de la superconductividad a alta temperatura la tasa de crecimiento ha sido aproximadamente de 100 K/década.

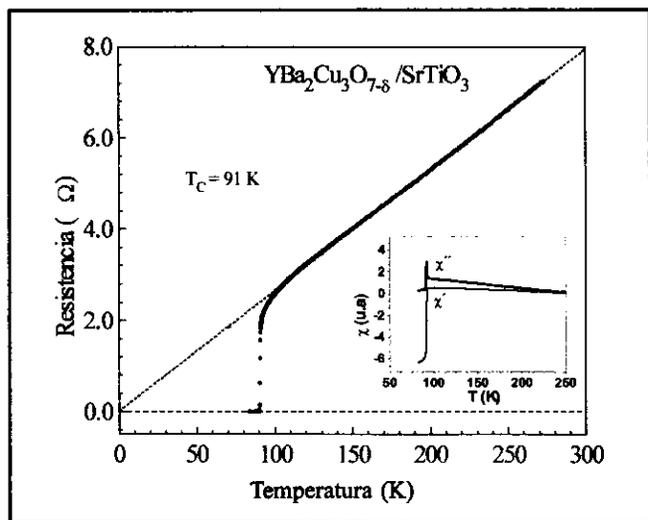


Figura 2. Dependencia con la temperatura de la resistencia en una película delgada epitaxial de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ que muestra un T_C de 91 K. El recuadro interior muestra la dependencia de la susceptibilidad magnética con la temperatura para la misma muestra mostrando el efecto Meissner a la misma T_C .

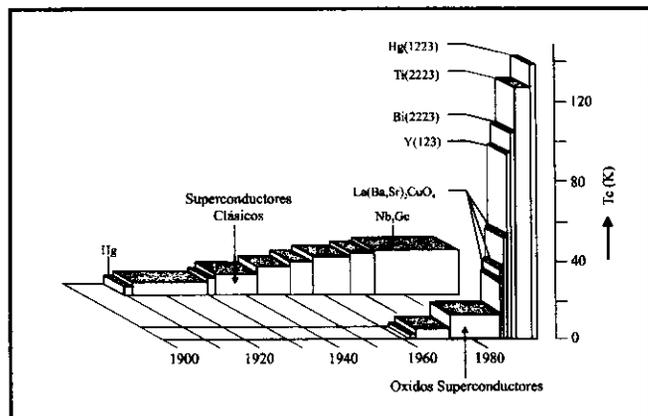


Figura 3. Variación temporal de la temperatura crítica en los cupratos superconductores comparada con los superconductores tradicionales.

Cerca de un año después del descubrimiento de Chu y su grupo el interés se centró en el descubrimiento de compuestos con temperaturas por encima de 100 K. El grupo japonés de Maeda (Maeda et al. 1988) reportó por primera vez una T_C de 105 K en un compuesto de Bi-Sr-Ca-Cu-O, conocido como BSCCO. Meses después Sheng y Hermann (Sheng-Hermann 1988) encontraron en el compuesto $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ una T_C de 125 K que constituyó el récord por varios años a pesar de los enormes esfuerzos fallidos y de varios anuncios no confirmados de compuestos con T_C aún más altas; sin embargo en 1993 un grupo en Zurich liderado por Hans Ott, señaló superconductividad por encima de 130 K en compuestos basados en Hg-Ba-Ca-Cu-O. (Schilling et al. 1993) Trabajos posteriores llevados a cabo en el grupo de Chu en Texas (Chu et al. 1993) en compuestos de mercurio sometidos a presiones mayores que 150 Kbar. condujeron a una T_C de 150 K y hasta la fecha es el compuesto con más alta T_C elaborado en forma reproducible.

Una nueva línea de búsqueda de SATC había sido mostrada por Little (Little 1964) quien mostró que en materiales orgánicos se podía presentar un nuevo mecanismo de apareamiento de electrones, lo cual podría conducir a superconductores con alta T_C . De esta manera se inició una búsqueda de materiales orgánicos superconductores que condujo a los denominados BEDT bis(ethylenedithio)tetrathiafulvalene abreviado $(\text{ET})_2\text{X}$. Uno de estos compuestos con $\text{X} = \text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Br}$ muestra una T_C de 12 K, la cual hasta el presente representa el récord en este tipo de materiales orgánicos (Bechgaard and Jerone 1991).

A partir del descubrimiento de los fullerenos, una nueva forma cristalina del carbono, diversos grupos se interesaron en las propiedades de transporte del denominado C_{60} , llegando a encontrar que ciertas sales de C_{60} eran superconductoras; así el C_{60} dopado con potasio con una estequiometría K_3C_{60} tiene una T_C de 18 K y el dopaje con rubidio conduce a T_C del orden de 28 K (Hebard et al. 1993). A pesar de muchos esfuerzos en la búsqueda de otros tipos de materiales son los cupratos los materiales que, a la fecha, muestran T_C por encima de los 100 K.

3. Elaboración y estructura de los cupratos superconductores

Inicialmente uno de los puntos más importantes en la superconductividad de alta temperatura de los cupratos fue la de establecer su composición, estructura y propiedades físicas básicas por lo que estos nuevos materiales fueron sometidos a toda clase de análisis con las más

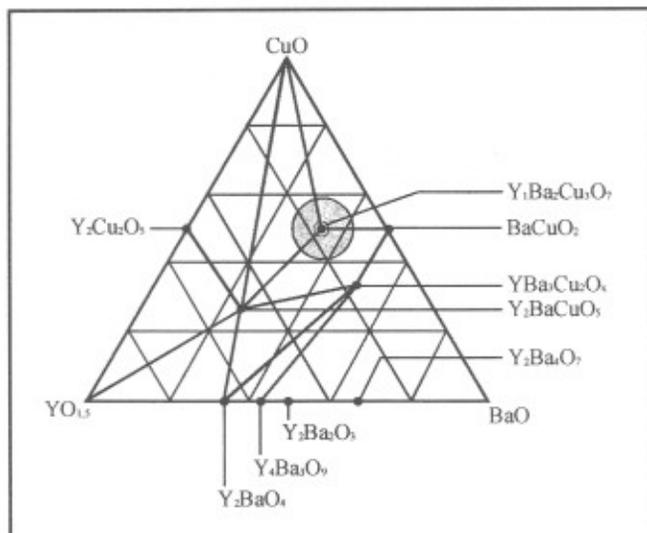


Figura 4. Fases presentes durante la fabricación del $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ a partir del Y_2O_3 , BaO , y CuO a 950°C . La fase verde denominada 211 tiene una composición Y_2BaCuO_5 , mientras que la fase superconductora denominada 123 tiene la composición $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (Beyers and Ahn 1991)

diversas técnicas (Batlogg et al. 1991). La atención se centró en los compuestos tipo 123 y en los cupratos a base de Bi, conocidos como bismutatos.

El YBCO, uno de los compuestos de la familia de SATC tipo 123, es generalmente fabricado a partir de una reacción en estado sólido de los óxidos básicos, Y_2O_3 , BaO , y CuO . La reacción a alta temperatura de estos óxidos da lugar a una serie de fases, de acuerdo con el diagrama de la figura 4. La fase superconductora tiene una estequiometría cercana a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Desde el punto de vista estructural posee una estructura ortorrómbica tipo perovskita deficiente en oxígeno, como se esquematiza en figura 5. Sus propiedades físicas dependen marcadamente del contenido de oxígeno, el cual a su vez está determinado por el método de preparación empleado. A pesar de la alta complejidad estructural del YBCO, en los últimos años se han perfeccionado los métodos de preparación de monocristales y especialmente de películas delgadas epitaxiales que muestran T_c mayores a 90 K y corrientes críticas por encima de 10^6 A/cm^2 , como puede verse en el experimento de levitación mostrado en la figura 6. En esta fotografía una película de YBCO de solo 100 nanómetros de espesor, depositada sobre un sustrato de SrTiO_3 de medio milímetro de espesor, a temperatura por encima a la del nitrógeno líquido, se suspende de un imán de Cobalto-Samario como resultado de las corrientes superficiales inducidas y del

efecto Meissner. La película permanece suspendida siempre que la temperatura con la cual se encuentre por debajo de la T_c .

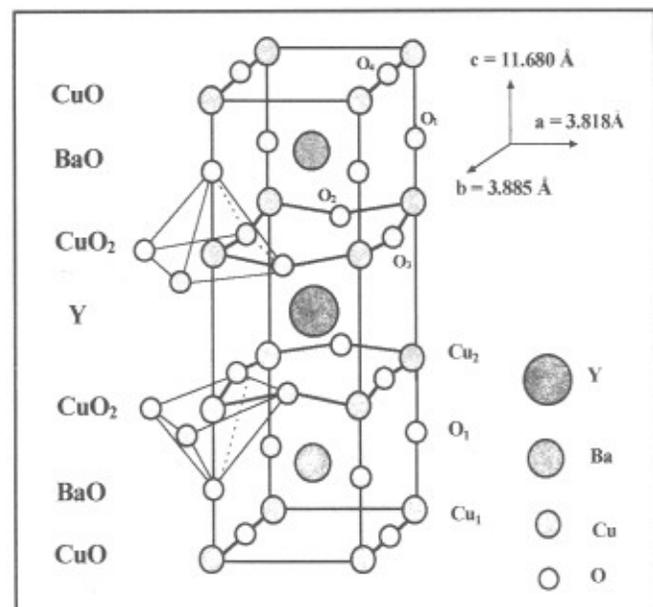


Figura 5. Estructura cristalina del $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Note los planos de CuO_2 en el plano a-b y los cadenas de CuO a lo largo del eje cristalográfico b.

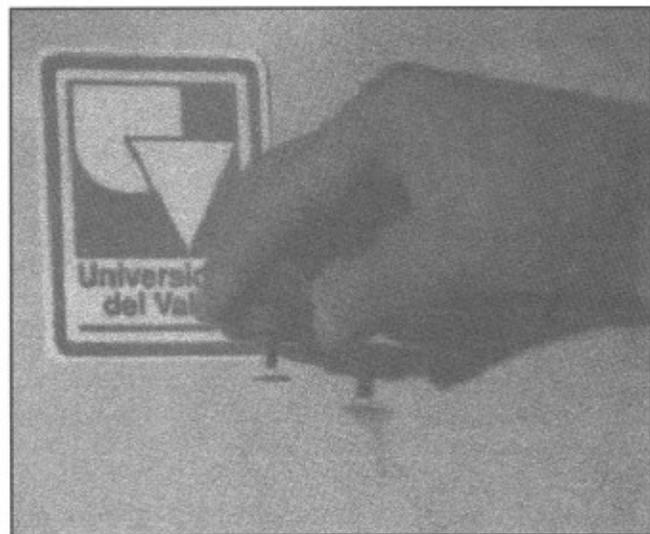


Figura 6. Experimento de suspensión inducida por las corrientes superficiales y el efecto Meissner en una película de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ depositada sobre SrTiO_3 , elaborada en la Universidad del Valle, Cali-Colombia.

La estructura cristalina del YBCO es laminar y altamente anisotrópica con la presencia de planos de CuO_2 y cadenas de CuO a lo largo de eje b. Las propiedades superconductoras en estos materiales están prácticamente confinadas a los planos bidimensionales de CuO_2 mientras que las cadenas de CuO transfieren la carga a los planos controlando de esta forma la T_c .

La estructura cristalina de los bismutatos, notados BSCCO, ha sido así mismo completamente determinada; en esta familia existen dos fases superconductoras de alta T_c que varían en su composición y estructura; la fase conocida como Bi2212 con una composición $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-x}$ con un T_c de 85 K, y la fase Bi2223 con una composición $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ con un T_c de 110 K (Bordet et al. 1989). Como el YBCO estas fases poseen una estructura laminar sin la presencia de cadenas de CuO y con una mayor estabilidad respecto al contenido de oxígeno (Grant 1990). La figura 7 muestra la estructura cristalina del Bi2212 donde puede apreciarse los planos de CuO_2 situados entre las reservas de carga provista por las capas de BiO y SrO.

Las características físicas de los cupratos superconductores están fuertemente determinadas por su estructura laminar y anisotrópica. En particular, la resistividad en el estado normal, por encima de T_c , muestra a lo largo del eje-c una dependencia como T^{-1} , con un valor que es del orden de 2 órdenes de magnitud mayor que la resistividad a lo largo del plano a-b; la resistividad en el estado normal muestra una dependencia lineal con la temperatura, como se muestra en la figura 8. Cualquier teoría que intente dar una explicación a la superconductividad en estos materiales debe tener en cuenta el marcado carácter bidimensional y anisotrópico de la misma.

4. Origen de la superconductividad de alta temperatura

El entendimiento de la superconductividad de alta temperatura presenta un reto formidable a los físicos de la materia condensada. Una pregunta básica que debe ser respondida es ¿Por qué la T_c es más alta en los SATC que en los superconductores tradicionales?

Dado que la teoría BCS resultó exitosa en la explicación de los superconductores clásicos, un primer punto de partida fue adaptar varios de los resultados de esta teoría a los SATC. En los superconductores tradicionales dos electrones con spin y momento opuesto forman un par debido a una interacción atractiva producida por un intercambio de fonones. El par tiene una función de onda simétrica "tipo-s" como la mostrada en la figura 9-a (mo-

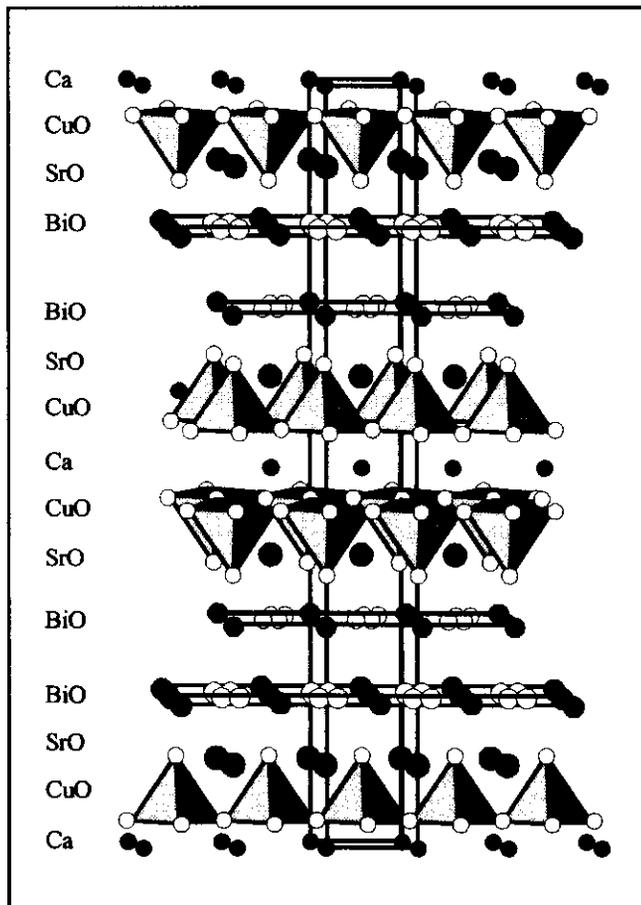


Figura 7. Estructura cristalina del Bi2212. Note la estructura laminar y anisotrópica de este compuesto. (Bordet et al. 1989)

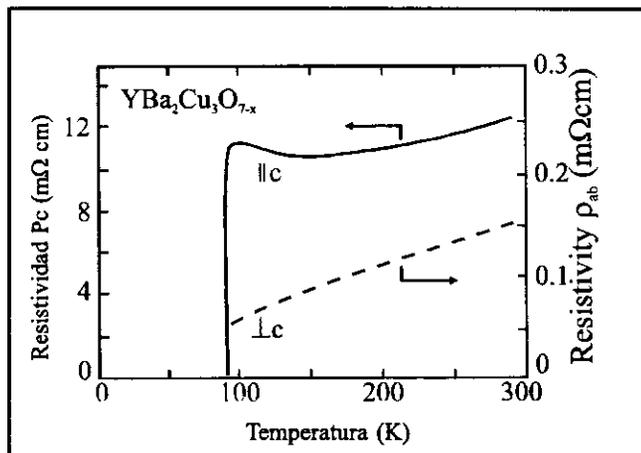


Figura 8. Dependencia de la resistividad con la temperatura para un monocristal de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ a lo largo del eje-c y en los planos a-b. Note los valores de resistividades a lo largo de las dos direcciones. (Hagen et al. 1988)

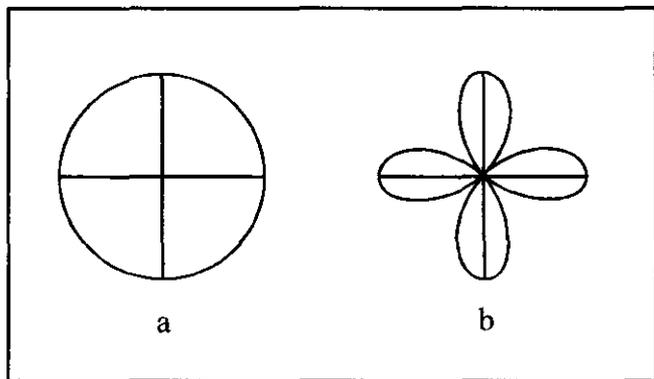


Figura 9. Forma de las funciones de onda para el par de electrones: (a) Tipo s isotrópica y (b) Tipo d anisotrópica, la cual puede describir el par de electrones en los SATC.

mento angular $l=0$) y los pares se condensan en un solo estado cuántico. Un hecho perfectamente comprobado desde los inicios mismos de la superconductividad de alta temperatura es el que, como en los superconductores clásicos, involucra la formación de pares (Gough et al. 1987), y la pregunta fundamental acá es: ¿Cuál es la naturaleza del estado del par? Diversos experimentos de tunelamiento (Wollman et al. 1996) favorecen la suposición de que la función de onda del par es asimétrica “tipo d” (momento angular $l=2$), como la mostrada en la figura 9-b, aunque probablemente un modelo que involucre tanto ondas tipo-s y tipo-d podría dar una explicación satisfactoria a diversos resultados aparentemente contradictorios.

La segunda pregunta, que históricamente fue la primera, es: ¿Cuál es el mecanismo que conduce al apareamiento en los SATC? Muchos investigadores consideran que la formación de pares en los SATC no es debido, como en los superconductores clásicos, a la interacción electrón fonón y han propuesto una serie de mecanismos alternativos como el bipolaron propuesto por Mott (Mott et al. 1990). Un polarón describe la deformación de la red que acompaña el movimiento de los electrones a través del sólido. Un bipolarón son pares de polarones que se atraen debido a la deformación de la red; varias de las propiedades de los SATC pueden ser aclaradas usando este modelo pero las características anisotrópicas de los SATC no son explicadas.

Una visión enteramente diferente fue adoptada por Phil Anderson (Anderson 1990) quien argumenta que los SATC representan una nueva clase de materiales para los cuales se requiere una física diferente a la usada en los materiales tradicionales, la cual está basada en el con-

cepto del líquido de Fermi. Para los SATC reviste interés el concepto de “Líquido de Luttinger” originalmente introducido para explicar el comportamiento de conductores unidimensionales y que de acuerdo con Anderson es también aplicable a conductores bidimensionales. En el modelo RVB (Resonance Valence Bond) se muestra que el espín y la carga son transportadas por cuasipartículas llamadas “Espinones” y “Holones” respectivamente con lo cual logra dar cuenta de varias de las propiedades del estado normal de los SATC sin dar una explicación de muchas de las propiedades superconductoras de los SATC. A pesar de la enorme cantidad de trabajos teóricos llevados a cabo en todo el mundo la situación actual es que se carece de una explicación satisfactoria de cómo funcionan los SATC que nos permita descubrir nuevos SATC con T_c aun más alta; pero, hasta ahora, no hay ninguna restricción que impida que las T_c sean aun mayores que las encontradas hasta la fecha.

5. Aplicaciones de los superconductores de alta temperatura

Con el advenimiento de los SATC capaces de operar a temperaturas por encima de la del nitrógeno líquido, 77 K, las aplicaciones previstas para los superconductores tradicionales no se ampliaron. La principal ventaja de los SATC respecto a los superconductores clásicos estriba en el hecho de que estos pueden operar a temperaturas por encima de 77 K lo que hace que los requerimientos de refrigeración sean mas simples y baratos que los usados con los superconductores tradicionales. El calor latente del nitrógeno líquido es 70 veces mayor que el del helio líquido lo cual significa que un dispositivo enfriado con NL permanece frío por más tiempo que el enfriado en el mismo volumen de helio.

La figura 10 muestra el diagrama JBT para un SATC. Los valores de campo crítico B_c son extremadamente altos por lo que las limitaciones están fundamentalmente en lograr SATC con corrientes críticas suficientemente altas que permitan su utilización a la temperatura del NL.

La tecnología superconductor puede dividirse en dos grandes categorías: Aplicaciones a gran escala y aplicaciones electrónicas a pequeña escala. La mayoría de las aplicaciones a gran escala involucra la producción de campos magnéticos intensos. La posibilidad de hacer circular corrientes altas a través de un material posibilita la elaboración de bobinas superconductoras que producen altos campos, para esta aplicación se requieren superconductores tipo II cuyos campos magnéticos críticos sean muy intensos. El carácter cerámico de los SATC ha hecho

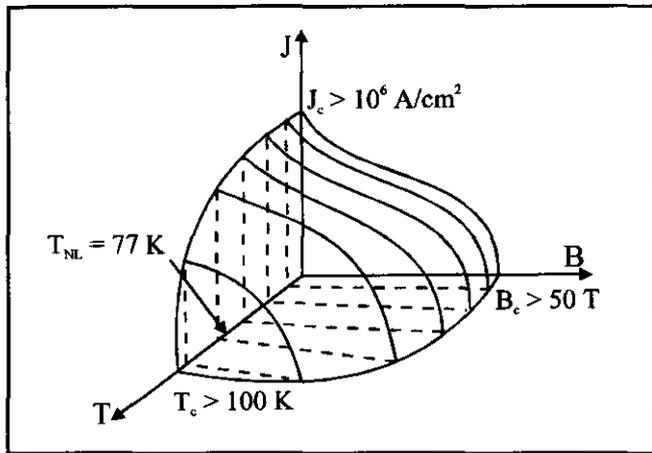


Figura 10. Diagrama de fases en un material superconductor indicando los parámetros críticos T_c , B_c y J_c la temperatura ideal de operación del superconductor es aproximadamente $3T_c/4$

difícil la elaboración de los cables necesarios para la fabricación de bobinas superconductoras. Las corrientes críticas alcanzadas en SATC policristalinos están por debajo de 10^3 A/cm^2 a 77 K y las aplicaciones en electroimanes, como los utilizados en escanógrafos de resonancia magnética, requieren valores de J_c por encima de 10^5 - 10^6 A/cm^2 a campos de varias Teslas; sin embargo se han realizado diversos progresos que permiten alcanzar corrientes críticas de 10^5 A/cm^2 en alambres elaborados usando una técnica que consiste en colocar BSSCO en tubos de plata que hace que el problema de resistencia mecánica se pueda superar sin debilitar sus propiedades superconductoras (Lubkin 1996).

Una de las aplicaciones a gran escala más excitantes de los SATC es el desarrollo de trenes levitados magnéticamente (MAGLEV): debido a los problemas de fricción la máxima velocidad que puede alcanzarse con sistemas de ruedas es de 300 Km/h una velocidad que es actualmente alcanzada por el TGV, tren de alta velocidad francés; en los MAGLEV el efecto de un imán moviéndose sobre un metal normal produce una interacción magnética que conduce a la levitación. Usando materiales superconductores es posible lograr campos suficientemente intensos para lograr la suspensión del tren. Una pista experimental de 43 Km que usa superconductores tradicionales ha sido construida en Japón para mostrar la viabilidad del uso de los MAGLEV (Tanaka et al. 1990). El empleo de alambres de SATC podría reducir drásticamente los problemas involucrados con la refrigeración.

Es muy probable que la primera aplicación comercial de los SATC sea en electrónica donde los problemas tec-

nológicos son menos formidables que los necesarios para elaborar alambres requeridos para la creación de campos magnéticos intensos. Las aplicaciones en electrónica dependen fundamentalmente de la capacidad de crecer estos materiales en forma de película delgada con las mismas o mejores propiedades superconductoras que las del mismo material en bloque. Esto se ha logrado por diferentes grupos alrededor del mundo usando diferentes técnicas de crecimiento como deposición por haz molecular MBE ablación láser, evaporación o pulverización catódica (Simon et al. 1991). Se ha logrado crecer capas delgadas con J_c mayores que 10^6 A/cm^2 a 77 K sobre sustratos cristalinos de SrTiO_3 , LaAlO_3 , MgO , zafiro cubierto con capas de protección, etc. En el área de microondas se emplean las películas delgadas de SATC en resonadores de microondas, filtros, osciladores de bajo ruido, que sacan ventaja de la resistencia superficial más baja de los superconductores comparadas con los metales normales. Un área de mucho futuro para los SATC lo constituye el uso en filtros de muy bajo ruido en sistemas de telefonía celular (Lubkin 1995).

Una segunda aplicación a pequeña escala de los SATC está en el desarrollo de dispositivos superconductores de interferencia cuántica o SQUIDS basados en películas delgadas de SATC usados como sensores de campo magnético. Los SQUIDS basan su funcionamiento en dos efectos superconductores: la cuantización del flujo y el tunelamiento de pares a través de una barrera o efecto Josephson. El SQUID es el sensor de campo magnético más sensible para la detección y medición de campos magnéticos débiles y por lo tanto es aplicable en varios campos de la ciencia y la tecnología, que van desde el biomagnetismo, geomagnetismo, instrumentación y análisis no destructivo de materiales. SQUIDS basados en SATC con sensibilidades cercanas a los elaborados con superconductores tradicionales comienzan a ser disponibles comercialmente con la ventaja de que pueden operar a temperaturas por encima del NL.

6. Tendencias actuales

La superconductividad de alta temperatura en sus 10 años ha conducido a un trabajo interdisciplinario en el cual han estado involucrados físicos, químicos, ingenieros eléctricos y de materiales, ceramistas, etc., lo que ha llevado a un enorme progreso pero aun falta mucho por hacer en el área especialmente en la teoría que sustenta el fenómeno. Es aún muy prematuro prever una industria basada en esta tecnología revolucionaria a pesar de lo cual los primeros productos emergen al mercado. El cuadro mostrado en la figura 11 resume los hitos más importan-

Superconductors				
<p>1911</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>K. Onnes Discovers Superconductivity</i> 	<p>1962</p> <ul style="list-style-type: none"> • Josephson Effect Demonstrated 	<p>1967</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>First Multifilament NbTi Wires</i> 	<p>1980</p> <ul style="list-style-type: none"> • First LTS MRI Demo 	<p>1986</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Bednorz & Müller Discover HTS</i>
<p>1990</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>LTS Magnetic Separation</i> 	<p>1991</p> <ul style="list-style-type: none"> • LTS Micro-SMES Field Trials 	<p>1995</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Comercial LTS Micro-SMES</i> • <i>Comercial SQUID'S</i> • <i>Comercial HTS Current Leads</i> 	<p>1996</p> <ul style="list-style-type: none"> • HTS Cellular Filters Tested • HTS Motor & Cables Tested • \$1.7 Billion in LTS Systems Sales 	<p>1997</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Comercial HTS Filters for Cellular Base Stations</i>
<p>1998</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>1st 18.4 km Leg of LTS MAGLEV Train in Japan</i> 	<p>1999</p> <ul style="list-style-type: none"> • Commercial HTS Thin Film Receivers for MRI 	<p>2000</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>HTS Power Cables Commercialized</i> 		<p>2020</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>\$244 Billion in Worldwide Sales Projected by ISIS-5</i>

Figura 11. Hitos más significativos en el desarrollo de las aplicaciones de los superconductores. LTS indica superconductores de baja T_c y HTS indica SATC (Superconductor industry 1996).

tes en el desarrollo de la superconductividad. Comparado con el desarrollo vertiginoso de la industria electrónica el desarrollo de cables de SATC capaces de transportar corrientes cada vez mas altas sigue una tendencia similar a la mostrada en el desarrollo de unidades de memoria dinámica de acceso aleatorio DRAM o en el desarrollo de lo microprocesadores (Yurek 1996) como puede verse en las gráficas comparativas de la figura 12.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todos los miembros de grupo de investigación de Películas Delgadas de la Universidad del Valle por su valiosa colaboración y a COLCIENCIAS por el apoyo brindado a través de los diferentes proyectos de investigación que ha posibilitado que Colombia mantenga un grupo investigativo de nivel internacional en esta área.

Bibliografía

Anderson, P. W., 1995, Phys. Word, December 37.
 Bardeen, J., Cooper, L.N., and Schrieffer, J.R., 1957 Phys. Rev. 108, 1175.
 Battlog, B., 1991, Phys. Today, 44 June 44.
 Bechbaard, K., and Jerone. D., 1991 Phys. Scripta T, 39, 37.
 Bednorz, J. G., and Müller, K. A., 1986, Z Phys. B, 64. 189
 _____, Takashige, M., and Müller, K. A 1987b Europhys. Lett. 3, 379.

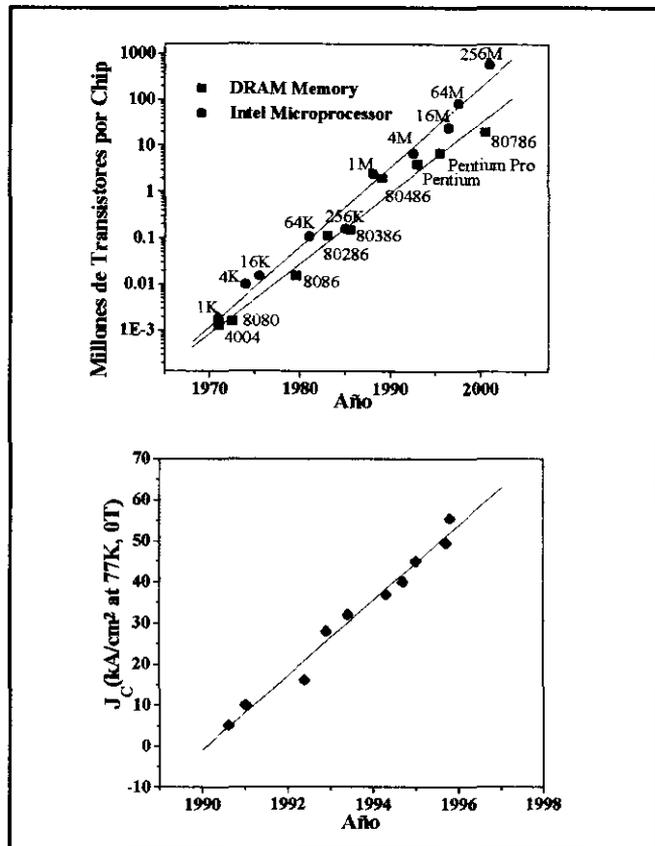


Figura 12 (a) Progresos en el desarrollo de Memorias dinámicas de acceso aleatorio (ley de Moore) (b) Progresos en la corriente crítica en alambres SATC (ley de Maizemoff) (superconductor industry 1996)

- Beyers, R., and Ahn, B. T.**, 1991, *A Rev Matter. Sci.*, 21, 335.
- Bordet, P., Capponi, J.J., Chaillout, C., Chenavas, J., Hewat, A. W., Hewat, E. A.**
- Casimir H. B. G.**, 1940, *Physica* 7, 887
- Cava, R. J., van Dover, R. B., Battlog, B., and Rietmann, E. A.**, 1987 *Phys. Rev. Lett.*, 58, 408.
- Chu, C. W., Hor, P. H., Meng, R. L., and Xue, Y. Y.**, 1993, *Nature* 365 323.
- **< Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, Huang, Z. J., and Wang, Y. Q.**, 1987b, *Phys. Rev. Lett.* 58, 405.
- Cooper L. N.**, 1956, *Phys. Rev.* 104, 1189
- Gavaler J. R.**, 1973, *Appl. Phys. Lett.* 23, 480
- Ginsburg V. L. and Landau L. D.**, 1950, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 20, 1064
- Gough, C. E., Colclough, M. S., Forgan, E. M., Jorda, R. G., Keene, M., Muirhead, C. M., Rae, A. I. M., Thomas, N., Abell, J. S., and Sutton, S.**, 1987, *Nature*, 326, 855.
- Grant, P. M.**, 1990, *Adv. Mater.*, 2, 232.
- Hagen, S.J., Jing, T.W., Wang, Z.Z, Horvath, J. Ong, N.P.**, 1988, *Phys. Rev.*, B37, 7928.
- Hebard, A. F.**, 1993, *A. Rev. Matter. Sci.* 23, 159.
- Hodeau, J. L., and Marezio, M.**, 1989, *Studies of high Temperature Superconductors*, Vol. 2 Edited by A. Narliker (Nova Science) P. 171
- Johnston, D.C., Prakash, H. Zachariasen, W. H., and Viswanathan, R.**, 1973, *Matter. Res. Bull.*, 8, 77.
- Little, W. A.**, 1964 *Phys. Rev.* 134A 1416
- London H. and London F.**, 1935, *Proc. Roy. Soc. (London)* A149, 71
- Lubkin, G.**, 1995, *Phys. Today*, 48 March 20.
- , 1996, *Phys. Today*, 49 March 48.
- Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutomi, M., and Asano, T.**, 1988, *Jap. J. Appl. Phys.* 27, L209.
- Meissner W. and Ochsenfeld R.**, 1933, *Naturwiss.* 21, 787
- Michel, C., Er-Rakho, L., Raveau, B.**, 1985, *Matter Res. Bull.*, 20, 667.
- Mott, N. F.**, 1990, *Contemp. Phys.*, 30, 373
- Müller, J.**, 1980, *Rep. Prog. Phys.*, 43, 641.
- Onnes H. K.**, 1911, *Comm. Ohys. Lab. Univ. Leiden*, No. 119-122
- Schilling, A., Cantoni, M., Guo, J. D., and Ott, H. R.** < 1993, *Nature* 363, 56
- Sheng, Z. Z., and Hermann, A. M.**, 1988, *Nature* 332 55, 138
- Simon. R.**, 1991 *Physics Today*, 44 June, 64.
- Sleight, A. W., Gillson, J. L., and Bierstedt, F. E.**, 1975, *Solid St. Commun.*, 17, 27
- Tanaka, H.**, 1990, *Railway Gazette Int.*, 537
- Wang, Y. Q., and Chu, C. W.**, 1987, *Phys. Rev. Lett.* 58, 908
- Wollman, D.A., Van Harlingen, D.J., Giapintzakis, J., Ginsberg, D.M.**, 1995 *Phys Rev Lett* 74, 797
- Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J., Wang, Y. Q., and Chu, C. W.**, 1987, *Phys Rev. Lett.*, 58, 908
- Yurek, G. J.**, 1996 *Superconductor Industry*, 12.