

LA FÍSICA TEÓRICA SE TOMA A UNITRÓPICO

Por: José Alfredo Camargo Martínez / Físico M.Sc. Ph.D. / Coordinador de Fomento a la Investigación / Director grupo de investigación CIBAIN

*Rafael Baquero Parra / Físico M.Sc. Ph.D. / Investigador SNI III
Departamento de Física - CINVESTAV*

Las investigaciones desarrolladas en física teórica y experimental solo buscan, en la mayoría de los casos, la comprensión de las leyes fundamentales de la naturaleza. A primera vista estas actividades no proyectan beneficios económicos o sociales inmediatos, y llegan a ser interpretadas como procesos académicos sin mucho impacto, que únicamente generan la publicación de artículos en revistas científicas, que nunca son del conocimiento de la comunidad en general. Esta percepción está muy alejada de la realidad; todos los avances tecnológicos desarrollados se deben a la aplicación de resultados de las investigaciones en las ciencias básicas en general. Los físicos Bardeen, Brattain y Shockley crearon en 1947 el primer transistor, usando materiales semiconductores conocidos y comprendidos en ese entonces (investigaciones previas). Gracias a este simple dispositivo todos los avances tecnológicos de nuestra era, desde las supercomputadoras hasta los smartphones, fueron posibles. Por otro lado, el sistema GPS funciona con tanta precisión gracias a la teoría de la relatividad, la cual publicó Albert Einstein en 1905, sin buscar una aplicación práctica, solamente tratando de explicar los efectos gravitacionales como la deformación del espacio-tiempo. Dos simples ejemplos de todos los posibles.

En Unitrópico, el grupo de Investigación en Ciencias Básicas, Aplicación e Innovación - CIBAIN, en su línea de investigación en *Física del Estado sólido y cálculos ab-initio* con el apoyo del Grupo de Investigación de Estado Sólido del Departamento de Física del CINVESTAV-México, dirigido por el Dr. Rafael Baquero Parra, vienen desarrollando en conjunto actividades de investigación en el estudio de propiedades estructurales, electrónicas y magnéticas en superficies, interfaces y heteroestructuras. De esta cooperación académica se han logrado publicaciones científicas en revistas indexadas.

Las investigaciones del grupo del Dr. Baquero están enfocadas principalmente en el estudio de la superconductividad, la cual se define en términos generales, como la pérdida total de la resistividad eléctrica de un material, por debajo su temperatura crítica, T_c (Baquero y Navarro, 2007). La existencia de la resistencia eléctrica genera pérdidas de energía y causa, por ejemplo, que en los dispositivos eléctricos y electrónicos se generen aumentos no deseados en la temperatura, lo que conlleva a fallas o daños en los mismos, por lo cual es necesario usar disipadores de calor, que generalmente ocupan espacios importantes en los equipos. La superconductividad a temperatura ambiente, sobre la cual actualmente se desarrollan un gran número de investigaciones, es potencialmente la semilla de la próxima revolución tecnológica; aplicaciones sorprendentes como supercomputadoras (computador cuántico), trenes de levitación magnética como los que actualmente existen en China y Japón que se desplazan a 500 Km/h, sistemas para la detección de campos magnéticos débiles con aplicaciones en medicina y astronomía, producción de campos magnéticos enormes para usos científicos y médicos, entre otros.

Un problema que llama la atención en el campo de la superconductividad es el comportamiento reentrante superconductor, el cual se entiende como la pérdida del estado superconductor de una muestra a temperaturas por debajo de su temperatura crítica, es decir pérdida de la superconductividad cuando esta debería existir (Gschneidner, Bünzli & Pecharsky, 2000; Siderenko et al., 2009; Garifullin et al., 2002). En la mayoría de los sistemas en los que se presenta este fenómeno se da una explicación vía comportamiento magnético, es decir, las propiedades magnéticas del material son las que destruyen el estado superconductor, bajo unas condiciones físicas específicas. Se cree entonces que la superconductividad y magnetismo no se llevan

muy bien (Müller et al., 1997; Crespo et al., 2009; Miclea et al., 2009). Resulta entonces muy interesante la existencia del comportamiento reentrante en sistemas que no revelan un carácter magnético, tal como se ha reportado en muestras cristalinas Bi2212/Bi2223 (Zhao et al., 1995) y el compuesto CdS/Bi2223 (Díaz-Valdés et al., 2010). Entendamos un compuesto como un material compuesto por dos o más materiales para obtener propiedades no existentes en sus componentes.

Veamos, el compuesto CdS/Bi2223 se conforma por la cerámica de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi2223) embebida en micropartículas semiconductoras de Sulfuro de Cadmio (CdS). Experimentalmente se ha observado que la cerámica de Bi2223 sola, es superconductor a $T_c \simeq 99$ K (onset) y mantiene su estado superconductor por debajo de esta temperatura, mientras que el compuesto pasa al estado superconductor a una $T_c \simeq 65$ K (onset) y revela el comportamiento reentrante a $T \simeq 47$ K, retomando el comportamiento superconductor a $T \simeq 34$ K (ver Fig. 1) (Díaz-Valdés et al., 2010). Estas temperaturas son muy bajas, 99 K es equivalente a $-174,15$ °C, pero en superconductividad a temperaturas mayores a 77 K se les denomina altas temperaturas. Este compuesto no contiene átomos con propiedades magnéticas manifiestas. En cálculos preliminares no hemos encontrado evidencia de la presencia de un momento magnético significativo en sitio alguno de la estructura. La propuesta de un mecanismo, que no se base en una explicación vía magnetismo, para describir el comportamiento reentrante en este compuesto no existe en la literatura.

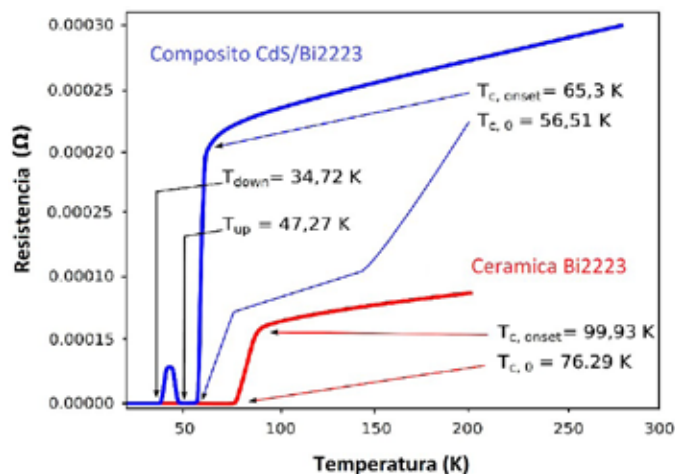


Figura 1. Esquema del comportamiento reentrante superconductor del compuesto CdS/Bi2223.

Nosotros proponemos un modelo, que pretende dar un acercamiento a la comprensión del comportamiento reentrante observado en el compuesto CdS/Bi2223. La cerámica Bi2223 sola es una muestra policristalina, en la cual la superconductividad aparece a través de tunelamiento Josephson¹ de un micro-policristal con otro, generando un camino de cero resistividad que convierte al policristal en un superconductor. Por esta razón la cerámica Bi2223 tiene una temperatura crítica superconductor muy similar a la de una muestra cristalina de Bi2223 ($T_c \simeq 110$ K). Dentro del compuesto se conforman interfaces cristalinas entre los micro-cristales de CdS y Bi2223. Una hipótesis de este tipo en una situación similar fue propuesta por Zhao et al. (1995). El compuesto muestra una temperatura crítica mucho menor, esto puede ser un efecto del semiconductor que actúa como una barrera a los pares de Cooper² (los cuales juegan un papel fundamental en la superconductividad), en este punto la muestra puede entenderse como un arreglo superconductor/semiconductor/superconductor, es decir interfaces de CdS/Bi2223 (ver Fig.2).

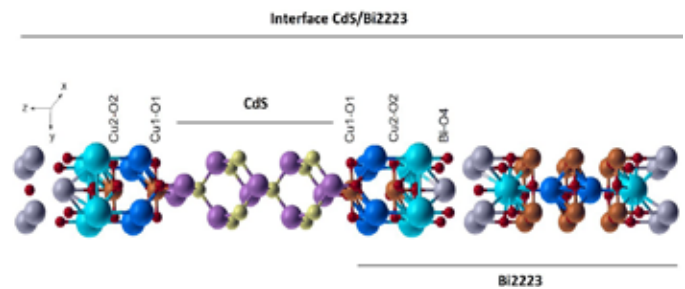


Figura 2. Modelo de interfaz Cds/Bi2223.

La brecha de energía prohibida del semiconductor (CdS) aumenta su valor a medida que la temperatura disminuye (Adachi, 2004). Entonces a una cierta temperatura, el semiconductor inhibe el tunelamiento de los pares de Cooper, en consecuencia el estado superconductor desaparece (comportamiento reentrante). En cálculos preliminares ($T = 0$ K) en la interfaz CdS/Bi2223 hemos encontrado que el primer plano atómico del semiconductor, en la interfaz, presenta un débil carácter metálico, carácter que puede aumentar (mayor densidad de estados) con el incremento de la temperatura. Así el efecto de proximidad y el efecto de barrera del CdS compiten en un rango de temperaturas.

¹ El tunelamiento Josephson es un efecto cuántico en el cual los electrones penetran y traspasan una barrera de energía (potencial), fluyendo de un superconductor a otro (Prieto & Lopera, 2001).

² Un par de Cooper está constituido por dos electrones que se «atraen» por efectos de la polarización de la red de iones en un cristal (Baquero, 2014).

El efecto de proximidad en la interface CdS/Bi2223 puede poblar la banda de conducción del semiconductor, anulando el efecto de barrera del CdS y el estado superconductor reaparece.

Así, el modelo propone que la brecha de energía prohibida del semiconductor (a cierta temperatura) inhibe el efecto del tunelamiento Josephson, mientras que el efecto de proximidad llena la banda de conducción del semiconductor y restaura el camino de resistividad-cero. Para que esto ocurra, el efecto de proximidad debería ser más eficaz a temperaturas más bajas.

Esta investigación se propone en un enfoque teórico, es decir cálculos de primeros principios, usando como herramientas la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT), la cual es uno de métodos más eficientes para el cálculo de la estructura electrónica de bandas en sólidos, y el método *Surface (Interface) Green Function Matching* (SFGM) con funciones de Green a temperatura finita.

Si estás interesado en saber algo más sobre este interesante tema de la superconductividad, te invitamos a leer el libro del Dr. Baquero; *El fascinante mundo del estado sólido: La superconductividad*, publicado por el Fondo Editorial Unitrópico (Baquero, 2015).

BIBLIOGRAFÍA

- Adachi, S. (Ed.). (2004). *Handbook on Physical Properties of Semiconductors*, Vol. II. New York, United State of America: Kluwer Academic Publishers.
- Baquero, R. (2015). *El Fascinante Mundo Del Estado Sólido: La Superconductividad*. Yopal, Colombia: Fondo Editorial Unitrópico.
- Baquero, R. y Navarro, O. (2007). *Ideas Fundamentales de la Superconductividad*. México, Morelia: UNAM.
- Crespo, V., Rodrigo, J. G., Suderow, H., Vieira, S., Hinks, D. G., and Schuller, I. K. (2009). Evolution of the Local Superconducting Density of States in ErRh4B4 close to the ferromagnetic Transition, *Phys. Rev. Lett.*, 102, 237002.
- Díaz-Valdés, E., Contreras-Puente, G. S., Campos-Rivera, N., Falcony-Guajardo, C. and Baquero, R. (2010). Processing and study of the composite CdS/Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O, *arXiv: 1101.0277 [cond-mat.supr-con]*.
- Garifullin I. A., Tikhonov D. A., Garif'yanov N. N., Lazar L., Goryunov Y. V., Khlebnikov S. Y., Tagirov L. R., Westerholt K., and Zabel H. (2002). Re-entrant superconductivity in the superconductor/ferromagnet V/Fe layered system, *Phys. Rev. B*, 66, 020505.
- Gschneidner, K. A., Bünzli, U. J. C. G. y Pecharsky, V.K. (Eds.). (2000). *Handbook on the physics and chemistry of rare earths* Vol. 38. Amsterdam, North Holland: Elsevier.
- Miclea, C. F., Nicklas, M., Jeevan, H. S., Kasinathan, D., Hossain, Z., Rosner, H., Gegenwart, P., Geibel, C., and Steglich, F. (2009). Evidence for a reentrant superconducting state in EuFe2As2 under pressure, *Phys. Rev. B*, 79, 212509.
- Müller, K.H., Kreyssig, A., Handstein, A., Fuchs, G., Ritter, C. and Loewenhaupt, M. (1997). Magnetic structure and superconductivity in (HoxY1-x)Ni2B2C, *J. Appl. Phys.*, 81, 4240.
- Prieto, P. y Lopera, W. (2001). Junturas Josephson basadas en superconductores de alta temperatura. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 25(96), 381-394.
- Sidorenko, A. S., Zdravkov, V., Kehrle, J., Morari, R., Obermeier, G., Gsell, S., Schreck, M., Müller, C., Ryazanov, V., Horn S. (2009). Double re-entrance of superconductivity in superconductor/ferromagnet bilayer. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 150, 052242.
- Zhao, Y., Gu G. D., Russell, G. J., Nakamura, N., Tajima, S., Wen, J. G., Uehara, K., and Koshizuka, N. (1995). Normal-state reentrant behavior in superconducting Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ / Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ intergrowth single crystals, *Phys. Rev. B*, 51, 3134.