

Superconductividad y magnetismo

Francisco Morales Leal, Departamento de Materia
Condensada y Criogenia, IIM, UNAM

fmleal@unam.mx

Introducción

La superconductividad es un fenómeno de origen cuántico que se refleja en el comportamiento macroscópico de un material. Los materiales en el estado superconductor (SC) presentan dos características intrínsecas: resistencia eléctrica nula y diamagnetismo perfecto o efecto Meissner. Ambos efectos se observan a temperaturas menores a la

temperatura característica del material, llamada temperatura crítica, T_c . Dicha temperatura divide el comportamiento del material en un estado considerado normal ($T > T_c$) y el estado SC. El estado superconductor es resultado de la condensación de los electrones que se encuentran en la superficie de Fermi. El proceso de condensación está ligado con una interacción electrónica atractiva entre pares de electrones (pares de Cooper), que se lleva a cabo por medio de la interacción de los electrones con las vibraciones de los átomos (in-

teracción electrón–fonón). Adicionalmente, como resultado de esta interacción el sistema electrónico pasa a un estado de menor energía, lo cual se refleja en la formación de una brecha prohibida (2Δ) en la densidad de estados electrónicos.

Estas y otras características de los superconductores fueron explicadas por Bardeen, Cooper y Schrieffer en su teoría microscópica propuesta en 1957. Esta teoría, llamada BCS, describe principalmente el comportamiento de los elementos y aleaciones (sobre todo binarias) superconductoras. Sis-

75

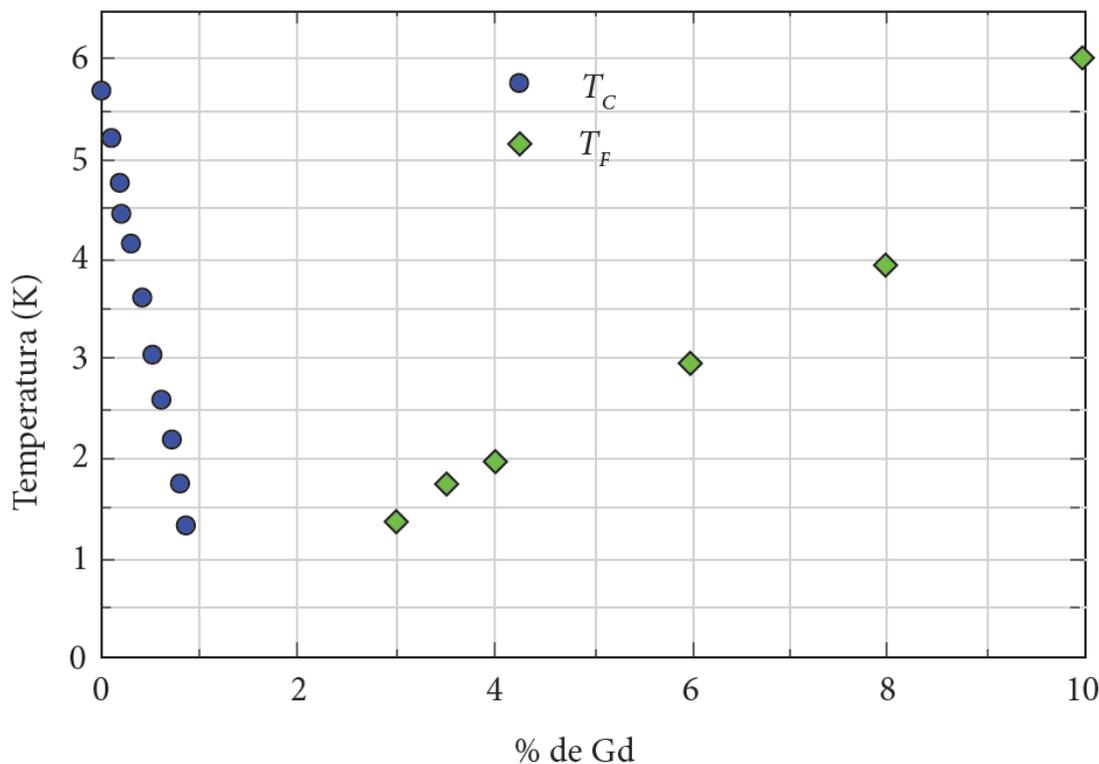


Figura 1. Dependencia de la temperatura crítica superconductora (T_c) y de la temperatura de ordenamiento ferromagnético (T_f) que ocurre en el lantano como función del porcentaje de gadolinio.

temas más complejos no pueden describirse completamente con esta teoría.

Además de la T_c existen otros parámetros críticos asociados con la superconductividad, que son la corriente crítica (J_c) y el campo crítico (H_c). Si un S_c es sometido a un campo de magnitud mayor a H_c , el superconductor pasa al estado normal. Lo mismo ocurre si se le aplica una corriente eléctrica mayor a J_c . Dado que el campo magnético puede modificar el estado superconductor, fue de interés estudiar el efecto que producen impurezas de elementos magnéticos (metales de transición y tierras raras) en los materiales superconductores. Por ejemplo, se estudió el efecto que producen impurezas de Gd en la temperatura crítica del La ($T_c = 5.7$ K). Los estudios mostraron que si hay entre 1 y 2% de impurezas la superconductividad se elimina. La figura 1 muestra la gráfica de la temperatura (T) en función del porcentaje de impurezas de Gd; como se puede observar, la T_c del lantano decrece con el aumento de Gd. Para 3% de Gd la muestra presenta un comportamiento ferromagnético, con una temperatura de ordenamiento (T_f) que se incre-

menta con el contenido de Gd. Este tipo de observaciones promovieron la idea de que la superconductividad y el orden magnético eran dos procesos que se excluían uno al otro, en otras palabras, que ambos fenómenos no se presentaban en el mismo espécimen. Cabe señalar que existen casos en los que las impurezas paramagnéticas también terminan con la superconductividad.

Hay materiales superconductores con orden magnético

La explicación de la pérdida de la superconductividad en presencia de impurezas magnéticas es resultado de la interacción del espín de los electrones con los momentos magnéticos asociados con las impurezas. Cuando se presenta una interacción entre el momento magnético del átomo y un electrón de un par de Cooper, se modifica la dirección del espín del electrón faltando a la condición de que los electrones que forman el par de Cooper deben tener espines opuestos, como consecuencia, el par de Cooper se rompe. La condición de que un par de Cooper debe tener momentum y espín opuestos se estableció en la teoría BCS.

El descubrimiento de nuevos materiales superconductores cambió radicalmente la idea de la exclusión entre superconductividad y orden magnético, ya que en la década de 1970 se descubrieron materiales superconductores con ambos fenómenos en el mismo espécimen. En este artículo se describen algunas de las características físicas que identifican a diferentes grupos de superconductores que presentan orden magnético.

Los compuestos que aquí se mencionan no representan una lista exhaustiva de los superconductores con orden magnético, hay algunos más que, por limitaciones de espacio, no se mencionan.

Fermiones pesados

A finales de la década de 1970, se descubrió una serie de compuestos con una característica muy peculiar que llamó mucho la atención: la masa efectiva electrónica (m^*) era mucho mayor que la masa del electrón libre (m_e), por esta razón fueron etiquetados como fermiones pesados (FP). El primer FP descubierto fue el $CeCu_2Si_2$, que presenta superconductividad y orden antiferromagnético (AFM) en el mismo espécimen.

men. Un comportamiento que, como ya se mencionó, se consideraba inexistente. En este compuesto la $T_C = 0.6$ K y la temperatura de ordenamiento magnético es $T_N = 0.7$ K, T_N es la temperatura de Néel. Para este compuesto se encontró que $m^* = 220 m_e$. Cabe aclarar que no todos los FP presentan superconductividad y orden magnético. Al considerar los elementos que forman los FP se observa que contienen elementos de las tierras raras y actínidos. Estos elementos se caracterizan por tener capas electrónicas $4f$ y $5f$ semillenas, siendo el Ce, Yb y U los elementos más típicos en los FP. En estos compuestos las bandas f se traslapan con la banda de conducción, con lo cual algunos electrones f pasan a formar parte de la banda de conducción. Hay que recordar que en general los electrones f están localizados y son responsables de las propiedades magnéticas.

El URu_2Si_2 es un ejemplo en donde se aprecia una clara coexistencia entre superconductividad y AFM. Este SC presenta una transición a un estado antiferromagnético a $T_N = 17.5$ K y pasa al estado superconductor a $T_C = 1.35$ K. En este caso se observa que a T_N se abre una brecha en la densidad de estados

electrónicos cuyo origen se debe a la formación de una onda de densidad de espín (ODE). A la temperatura de transición al estado SC, como es de esperarse, se abre la brecha superconductora. Estas brechas se abren en diferentes regiones de la superficie de Fermi y ambas existen a temperaturas menores a T_C . Respecto al tamaño de la brecha asociada con la ODE y el SC, se ha reportado que difieren por un orden de magnitud, como se observó con experimentos de contactos puntuales. Como se mencionó, la brecha que se observa en el estado AFM se asoció con

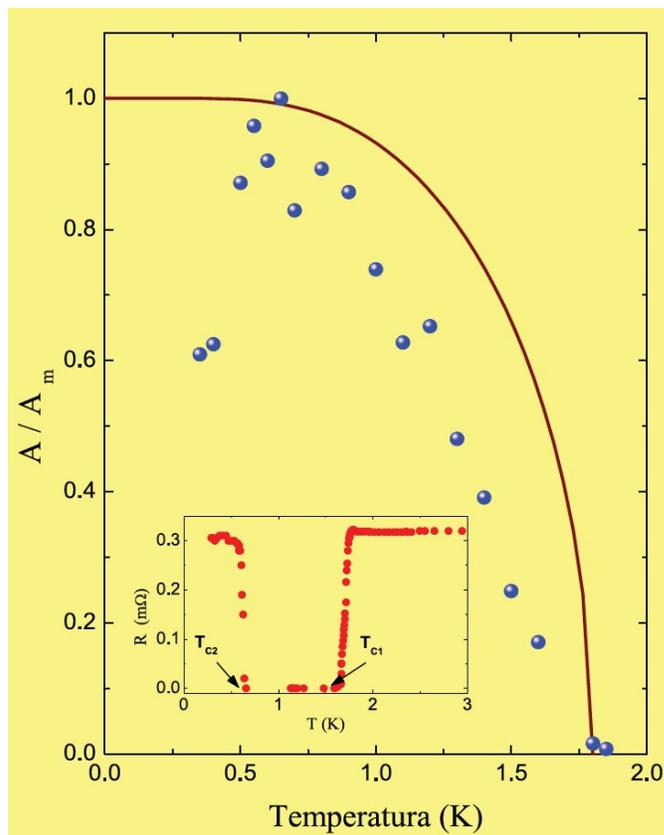
la formación de una onda de densidad de espín, sin embargo, actualmente se considera que el parámetro de orden asociado con la transición observada a 17.5 K es desconocido, por lo que en la literatura se le llama parámetro de orden oculto. La determinación de este parámetro de orden oculto es un problema sin resolver hasta la fecha.

Superconductores ferromagnéticos

77

Las familias RMo_6X_8 ($X = Se, S$) y RRh_4B_4 (R representa los elementos de las tierras raras) son compuestos

Figura 2. Variación del área bajo las curvas $dV/dI(V)$ en función de la temperatura. La curva continua es el comportamiento de la brecha superconductora en función de la temperatura según la teoría BCS. La gráfica interior muestra la dependencia de la resistencia eléctrica en función de la temperatura.



que presentan superconductividad y orden magnético. En la mayoría de estos compuestos la superconductividad coexiste con un orden magnético del tipo AFM. Sobresalen los casos del ErRh_4B_4 y del HoMo_6S_8 , dos superconductores con los cuales se puede ejemplificar la competencia entre orden ferromagnético (FM) y la superconductividad. Estos dos materiales presentan el efecto conocido como superconductividad re-entrante. Este efecto consiste en lo siguiente: al enfriar el material desde el estado normal y alcanzar la temperatura crítica (T_{C1}) el

material pasa al estado SC como es lo usual. Al disminuir más la temperatura el material recobra el estado normal a T_{C2} , temperatura que es comparable con la temperatura de ordenamiento FM (T_F). En medidas de R vs T este efecto se manifiesta en que la resistencia eléctrica es cero únicamente entre T_{C1} y T_{C2} . Este comportamiento se puede observar en la gráfica interior de la figura 2. Respecto al orden de las transiciones, se puede mencionar que la transición que ocurre a T_{C2} es de primer orden, a diferencia de la transición a T_{C1} , que es de segundo orden.

Los superconductores cerámicos presentan un comportamiento físico muy variado que depende del “dopado”

Mediante experimentos de contacto puntual en HoMo_6S_8 se analizó el área bajo las curvas de la resistencia diferencial (dV/dI) en función del voltaje (V), que se considera que está relacionada con la brecha superconductora. El área en función de T se incrementa conforme la temperatura disminuye, sin embargo, a T_{C2} el área disminuye. Este resultado sugiere que la superconductividad persiste en el estado FM,

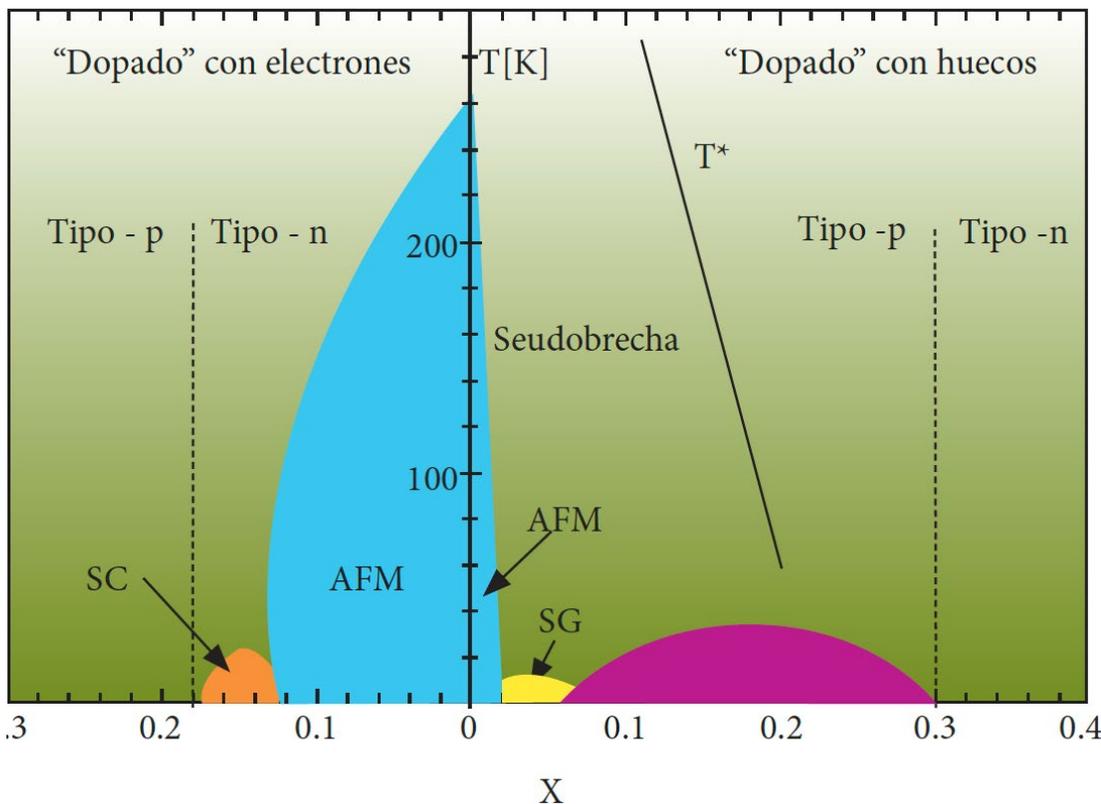


Figura 3. Diagrama de fase T-x de $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ (izquierda) y de $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (derecha), en el primero los portadores de carga son electrones, mientras que en el segundo son huecos. Es notable la simetría del diagrama en el sentido de que en ambos compuestos se tiene una región antiferromagnética y una región superconductora.

lo cual implica una coexistencia. El hecho de que a T ligeramente mayor que T_{C2} se presente una distribución no homogénea de dominios FM y superconductor podría servir como base para decir que a $T < T_{C2}$ esta distribución de dominios persiste con la característica de que los dominios magnéticos se incrementan conforme disminuye T .

Superconductores cerámicos

El descubrimiento de los superconductores cerámicos, también denominados cupratos o superconductores de alta temperatura crítica de transición, además de su temperatura crítica tan alta (T_c entre 30 K y 133 K), trajo nuevamente la presencia del magnetismo al panorama de la superconductividad. Estos materiales presentan un comportamiento físico muy variado dependiendo del “dopado”, que se logra mediante la sustitución de algún elemento o debido al contenido de oxígeno. La figura 3 muestra el diagrama de fase, temperatura vs dopado (x) de dos superconductores cerámicos; $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4-y}$, un superconductor cuyos portadores de carga son electrones y el $La_{2-x}Sr_xCuO_4$,

en donde los portadores de carga son huecos.

Por lo que se refiere a la superconductividad y el magnetismo, ambos superconductores presentan regiones similares; una región superconductora y una región AFM. Como se puede observar en la figura mencionada, la región en la que tienen un comportamiento AFM ocurre para un dopado bajo, en donde por lo general tienen un comportamiento tipo aislante eléctrico. La cercanía entre las regiones AFM y SC sugiere que la formación de pares de Cooper podría estar mediada por fluctuaciones de espín y no por fonones, como establece la teoría BCS. Esta consideración está respaldada por el hecho de que el efecto isotópico de los compuestos con la T_c óptima es prácticamente cero ($T_c \propto M^\alpha$ con $\alpha \approx 0$, M es la masa isotópica de alguno de los elementos que forman el SC), lo cual sugiere que la participación de los fonones es poco importante en el proceso de la superconductividad. Cabe señalar que $\alpha = 0.5$ según la teoría BCS. Continuando con la descripción del diagrama $T-x$, en el caso del $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, puede observarse que entre la región AFM y la SC se comporta como un vidrio de espín (SG).

A temperaturas mayores que la T_c existe una región en donde se ha observado la presencia de una pseudobrecha, delimitada por una temperatura característica T^* , a partir de la cual se inicia el estado normal. El origen de esta pseudobrecha no está bien determinado hasta hoy. En esencia se manejan dos hipótesis: una propone que el origen se debe al magnetismo y la otra dice que es resultado de la formación de pares de Cooper que no están correlacionados. Un aspecto importante en los superconductores cerámicos es su sorprendente diversidad en el comportamiento de los vórtices, aspecto que se estudia actualmente.

El caso del compuesto $RuSr_2GdCu_2O_8$ es de interés, ya que este SC presenta orden magnético y superconductividad. El $RuSr_2GdCu_2O_8$ tiene una transición de tipo FM a temperaturas entre 133-136 K y una T_c entre 15-40 K. En este caso se considera que el orden FM es de tipo itinerante. El orden magnético se ha asociado con los momentos magnéticos del Ru, ya que el momento magnético del Gd parece no participar a $T > 4$ K. En vista de este resultado, y con la idea de reforzar el magnetismo, se ha sustituido parcialmente el Ru por Fe. El resultado

de estas sustituciones es la disminución de la T_c y de la T_F con el aumento de Fe. Está claro que en este tipo de compuesto hay coexistencia de FM y SC. Una posible explicación de este hecho es considerar que el parámetro de orden magnético de los momentos del Ru está confinado a los planos RuO_2 , de tal forma que su influencia sobre los planos de CuO_2 es mínima, lo que disminuye la probabilidad de rompimiento de pares de Cooper, sin embargo el magnetismo prevalece sobre la superconductividad al medir la magnetización como función de la temperatura.

Borocarburos

Los borocarburos son aleaciones intermetálicas con fórmula $\text{RM}_2\text{B}_2\text{C}$, en donde R corresponde al itrio o a un elemento de las tierras raras y M puede ser Ni, Pt o Co. En estas aleaciones se tiene la presencia de electrones de capa $4f$ de las tierras raras y electrones d de los elementos intermetálicos. La presencia de este tipo de electrones origina que algunos de los borocarburos presenten tanto superconductividad como orden magnético. Sobresale el caso del $\text{ErNi}_2\text{B}_2\text{C}$, que presenta superconductivi-

dad y FM. Este compuesto pasa al estado SC a $T_c = 10.5$ K, al bajar la temperatura pasa por un estado AFM a 6.8 K para finalmente adquirir un orden FM débil a 2.3 K. En el caso del $\text{HoNi}_2\text{B}_2\text{C}$ se presenta superconductividad re-entrante cuando se somete a un campo magnético de 0.13 T, el mismo efecto se obtiene al sustituir parcialmente el Ni por Co. Este SC tiene una $T_c = 8$ K y una $T_N = 5.2$ K, en este intervalo de temperatura se considera una coexistencia entre AFM y SC.

Es importante destacar el papel de los electrones f que, como en el caso de los

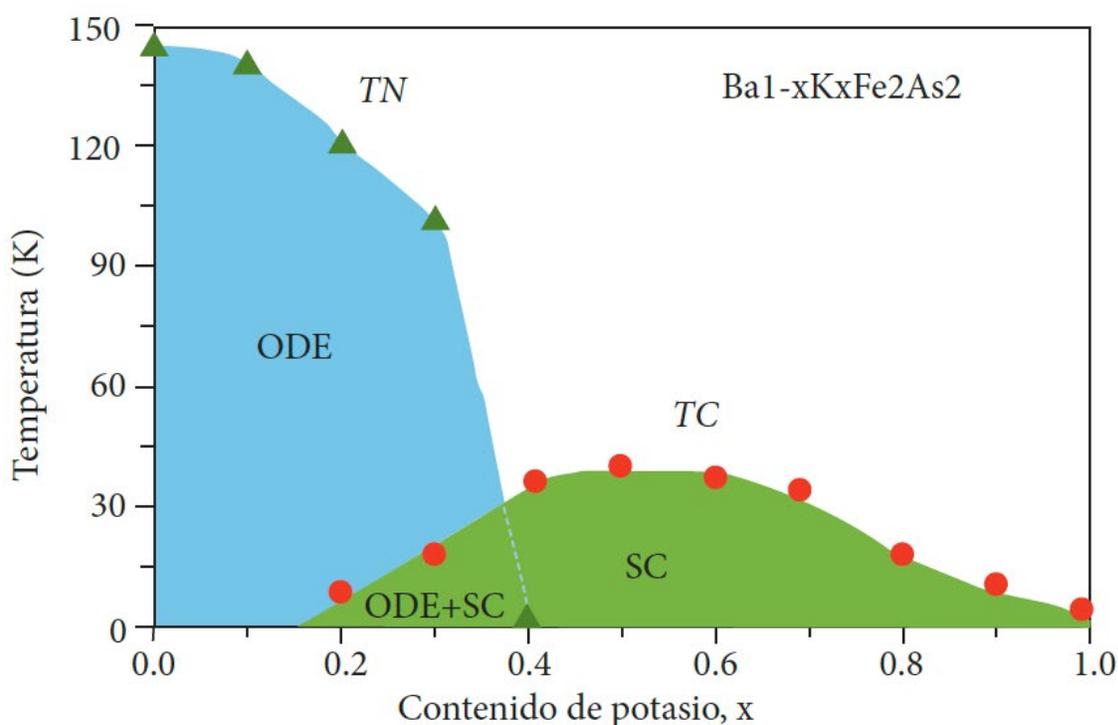


Figura 4. Diagrama de fases temperatura–contenido de potasio en el $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$. El contenido de potasio determina el comportamiento tanto magnético como superconductor. Nótese la región de coexistencia de la superconductividad y la ODE.

fermiones pesados, juegan un papel clave en el comportamiento magnético y SC. El compuesto $\text{YbNi}_2\text{B}_2\text{C}$ se considera un fermión pesado, ya que el coeficiente del término lineal en el calor específico es de $530 \text{ mJ mole}^{-1} \text{ K}^{-2}$, indicativo de una masa efectiva del orden de $100 m_e$. Sin embargo, en este compuesto no se observa ni orden magnético ni superconductividad, al menos hasta una temperatura de 50 mK. Dado que tanto el Ni como el Co son elementos magnéticos, resulta sorprendente que no contribuyan al magnetismo en esta familia de compuestos.

Superconductores basados en Fe

Recientemente se descubrió el compuesto $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ con una $T_c = 26 \text{ K}$. Aunque resulta sorprendente la presencia de un elemento ferromagnético como el Fe en un compuesto SC, existe el antecedente de que el Fe sometido a presiones entre 15 y 30 GPa presenta superconductividad con una T_c cercana a 2 K. Los superconductores basados en Fe se consideran como superconductores de alta temperatura, ya que se han reportado temperaturas hasta de 56 K. Hasta ahora se han encon-

trado cuatro familias de estos compuestos: LaFeAsO , BaFe_2As_2 , LiFeAs y FeSe , en donde el As puede ser reemplazado por un elemento de la columna VA o VIA; en cuanto al La, éste puede ser sustituido por Ba, Ca, Li o K. A semejanza de los cupratos, en donde se forman planos de Cu-O, en estos compuestos se forman capas corrugadas de Fe-As en las cuales, según pensamos, se lleva a cabo el proceso de superconducción. Una característica común de estos compuestos, además de la superconductividad, es que al enfriarse el compuesto se presentan fluctuaciones de espín que concluyen en la formación de una ODE. Como en el caso de los cupratos, la T_c depende de la concentración de portadores, que se modifica mediante la sustitución parcial de alguno de los elementos por otro con valencia diferente. La figura 4 muestra el diagrama de fase T_c del $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$. Como se observa, a concentraciones bajas de potasio el compuesto presenta una ODE, una región superconductor para $0.2 < x < 1$ y una región en donde ambos comportamientos coexisten ($0.2 < x < 0.4$). A la temperatura de la transición magnética también se presenta una transición

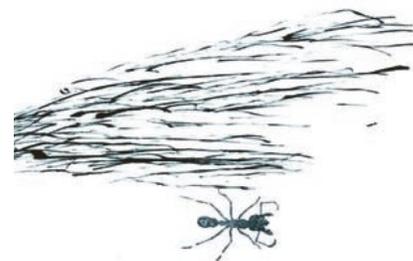
estructural; a altas temperaturas es tetragonal y a $T < T_N$ es ortorrómbica.

Conclusiones

Finalmente y a manera de conclusión puede decirse que los materiales superconductores que presentan orden magnético no son tan escasos y que el orden magnético puede desempeñar un papel preponderante en el origen de la superconductividad. También está claro que queda mucho por entender en este tipo de superconductores.

Bibliografía

- K.H. Muller, V. N. Narozhnyi, "Interaction of Superconductivity and Magnetism in Borocarbide Superconductors", *Rep. Prog. Phys.*, 64 (2001) 943-1008.
- P.C. Canfield, "Fishing the Fermi Sea", *Nature Physics*, 4 (2008) 167-169. no-cuprates", *Supercond. Sci. Technol.*, 21 (2008) 093001.
- C. Day, "Iron-Based Superconductors", *Physics Today*, 62 (2009) 36-40.
- J. Plagione, R.L. Greene, "High-Temperature Superconductivity in Iron-Based Materials", *Nature Physics*, 6 (2010) 645-658.



Carlos Vidal. Serie Aviso de ocasión (detalle). N° 11 MA