

## 反強磁性磁気秩序と共存する高温超伝導現象

1979年に重い電子系物質  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  における超伝導が報告されて以来、銅酸化物高温超伝導体（1986年）や鉄ヒ素系超伝導体（2008年）など、反強磁性相に隣接して新奇な超伝導が発見され、磁性と超伝導が絡み合う境界領域に超伝導のフロンティアがあることが近年強く認識されてきている。

その中でも銅酸化物高温超伝導体は、キャリアドーピングにより超伝導転移温度 ( $T_c$ ) が 160 K を越える現在最も高い  $T_c$  を持つ物質群であり、超伝導発現機構の解明は固体物理学の中心課題であり続けてきた。この高い  $T_c$  のメカニズムを考えるにあたり問題のひとつとなっているのは、反強磁性磁気秩序と超伝導の相互関係である。銅酸化物高温超伝導体は、超伝導の舞台である二次元の  $\text{CuO}_2$  面内のホール濃度により、異なる電子状態を示す。 $\text{CuO}_2$  面内のホール濃度がゼロの母物質は反強磁性磁気秩序を伴う絶縁体であり、適当なホールドーピングにより磁気秩序が抑制され超伝導が実現する。しかしながら、反強磁性相と超伝導相が隣接する境界近傍における両相の相互関係については、実験・理論の両面からこれまで四半世紀に及んで議論されてきたが、明らかとはなっていなかった。

最近、大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻と産業総合研究所（超伝導材料グループ）の研究グループは、反強磁性相と超伝導の境界領域の研究対象として 5 枚の積層  $\text{CuO}_2$  面を持つ  $\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$  に着目し、NMR（核磁気共鳴法）による詳細な研究をおこなった。その結果、この物質はネール温度  $T_N=175\text{K}$  以下で反強磁性秩序を示すにもかかわらず  $T_c=52\text{K}$  で超伝導状態に転移し、両相が共存することを初めて明らかにした。さらに、反強磁性秩序変数が超伝導転移にともない変調されることから、銅酸化物高温超伝導体において反強磁性と超伝導の秩序変数が相関していることを初めて明らかにした。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2011 年 4 月号に掲載された。

$\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$  は図(a)に示すような結晶構造をとり、連続して積層する 5 枚の  $\text{CuO}_2$  面をもつ。図(b)はフッ素サイト（図(a)参照、オレンジ色で示す）における内部磁場  $H_{int}$  の温度変化である。温度を下げるるとともに  $T=175\text{K}$  から内部磁場が発生し、低温にむけて  $(T_N - T)^{1/2}$  に比例して増大することから、ネール温度  $T_N=175\text{K}$  の長距離的な反強磁性磁気秩序が発達していることがわかる。一方、図(c)に示すナイトシフト  $K$  の温度依存性を見ると、室温から温度を下げるにつれてほぼ温度変化をしない一定値をとるが、 $T_c=52\text{K}$  で減少し始める。この  $K$  の減少は超伝導転移にともなう反磁性シフトであり、 $T_N=175\text{K}$  をもつ反強磁性秩序のバックグラウンドのなかで超伝導が発現し、両相が均一に共存していることを示している。また、この超伝導転移にともない、内部磁場  $H_{int}$  の温度依存性が  $(T_N - T)^{1/2}$  のライン（図(b)の実線）からずれ始めるが、これは反強磁性磁気モーメントの配列が超伝導転移の影響で変調されたことを示唆している。これはすなわち、銅酸化物高温超伝導体において、超伝導と反強磁性の秩序変数が互いに相関していることの証拠である。

このような現象は、銅酸化物高温超伝導体の典型物質としてこれまでよく研究されてきた  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  や  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+y}$  では観測されてこなかった。これは、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  や  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+y}$  では  $\text{CuO}_2$  面の積層数がそれぞれ 1 層と 2 層と少なく、反強磁性磁気相関の 3 次元性が弱い

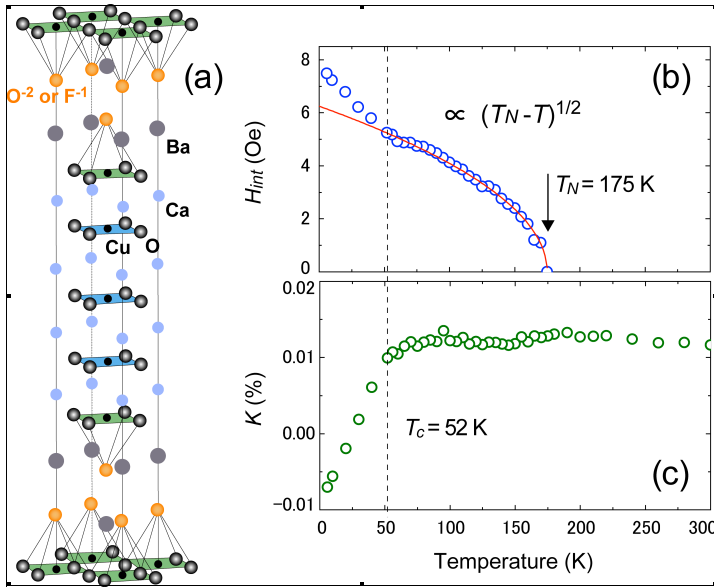


図: (a) $\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$  の結晶構造 (b)内部磁場  $H_{int}$  の温度依存性。 $T_N=175\text{K}$  の長距離反強磁性秩序を示す。(c)ナイトシフト  $K$  の温度依存性。 $T_c=52\text{K}$  以下での減少は、反磁性シフトに対応する。

ためであると考えられる。一方、理論的には反強磁性と超伝導の様な共存の可能性が古くから指摘されており、この実験結果と理論的な予測の相違が、高温超伝導発現機構の解明を困難にしている原因の一つであった。

本研究成果は、反強磁性磁気秩序と超伝導の共存現象を実証し、さらにそれらの秩序変数の相関を観測したことで、物性物理学の分野において多くの研究者の注目を集めている。 $\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$  のより詳細な性質を調べるため NMR 以外の実験手法による研究が国内外で始まっており、今後の研究の展開が期待される。

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) No.4, p.043706

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/80/043706> (4月11日公開済)

<情報提供：清水 直（大阪大学大学院基礎工学研究科）

椋田 秀和（大阪大学大学院基礎工学研究科）

北岡 良雄（大阪大学大学院基礎工学研究科）>