

銅酸化物におけるドーピングを要さない新しい超伝導の発現メカニズム

上智大学 理工学部 准教授

足立 匡

(お問い合わせ先) TEL: 03-3238-3402 E-MAIL: t-adachi@sophia.ac.jp



研究の背景

物質の電気抵抗がゼロになる超伝導はリニア新幹線や磁気共鳴診断などに利用されていますが、用いられている物質が超伝導を示す温度(超伝導転移温度 T_c)はとても低く、 -260°C まで冷却して使っています。常圧力でもっとも高い T_c (-138°C)を示すのは銅酸化物高温超伝導体です。室温で超伝導を示す夢の物質の創製を目指して、高温超伝導のメカニズムを解明しようと地道な研究が続いています。

銅酸化物高温超伝導は、図1(a)のように、母物質($x=0$)と言われる反強磁性絶縁体に電子またはホールキャリアをドーピングすると発現すると信じられてきました。しかし、2005年に東京農工大とNTTのグループが、電子ドーピング型銅酸化物の薄膜試料において、試料中に過剰に存在する酸素を還元して効率よく取り除くと、図1(b)のように母物質で超伝導が発現すると報告しました。その5、6年後には、母物質の多結晶試料で超伝導が発現すると報告され、研究が急速に進展し始めました。

銅酸化物の母物質における「ドーピングを要さない超伝導」のメカニズムを明らかにするには、単結晶試料で物性を詳しく調べることが重要です。私たちのグループでは、電子ドーピング型銅酸化物 $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ (PLCCO)の単結晶を用いて、電気抵抗率、比熱、ミュオンスピン緩和(μSR)などから、還元による電子状態の変化を詳しく調べています。

研究の成果

単結晶を同じ組成の粉末試料で覆って還元する「プロテクトアニール法」を開発して用いたところ、これまでは絶縁体であったPLCCOの $x = 0.05 - 0.10$ において超伝導を発現させることに成功しました。また、電気抵抗率と比熱の測定から、還元とともに絶縁体から金属に変化し、低温で超伝導が発現することがわかりました。続いて、PLCCOの単結晶と母物質の $\text{La}_{1.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CuO}_4$ の多結晶に対して μSR を用いてスピン相関を調べた結果、還元とともに反強磁性の長距離秩序が短距離秩序に変化し、同時に超伝導が発現することを突き止めました。

これらの結果は、図2に示す強い電子相関に基づく電子構造モデルを用いて説明することができます。これは、電子ドーピング型では結晶構造の特異性によって、銅の $3d_{x^2-y^2}$ バンドのエネルギーが低下し、酸素の $2p$ バンドと重なることでフェルミエネルギーに有限の状態密度が生成して、金属化して超伝導を示すというものです。

今後の展望

電子ドーピング型の母物質におけるドーピングを要さない超伝導の発見によって、高温超伝導の研究が新たな局面を迎えました。本研究が提案する電子構造モデルによると、銅酸化物では電子相関が強く、ホールドーピング型では母物質が絶縁体になるのに対し、電子ドーピング型では母物質で超伝導が発現します。これは、元素置換に頼らずに

キャリアを生成する新しい方法を示すもので、今後、様々な遷移金属酸化物に応用できるかもしれません。

今後は、電子ドーピング型の母物質の単結晶で超伝導を発現させ、様々な測定から超伝導の発現メカニズムを明らかにすることを目指して研究していきます。

関連する科研費

2011-2013年度 基盤研究(C)「ミュオンスピン緩和から見る鉄系・銅系超伝導体におけるスピン相関と超伝導の関連」

2016-2018年度 基盤研究(C)「T型銅酸化物におけるドーピングを要さない新しい超伝導の発現メカニズムの解明」

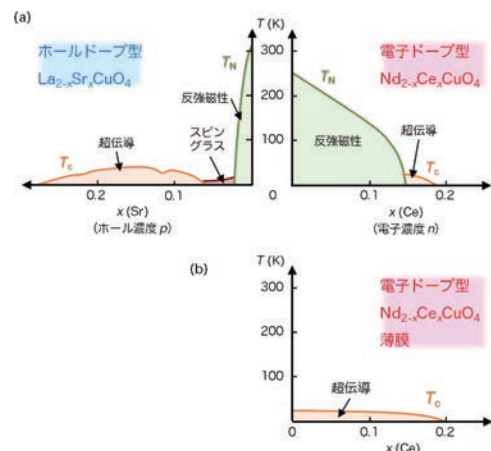


図1 ホールドーピング型と電子ドーピング型銅酸化物高温超伝導体の(a)これまでの物性相図と(b)電子ドーピング型で新しく提案された物性相図。新しい電子ドーピング型の相図では、反強磁性領域がなく、超伝導領域が母物質($x = 0$)から幅広いCe濃度領域で見られる。

ホールドーピング型 電子ドーピング型

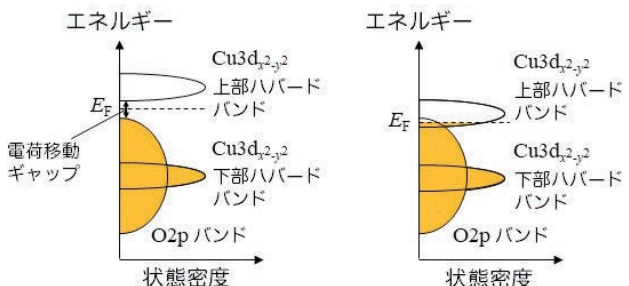


図2 ホールドーピング型と電子ドーピング型の母物質における電子構造モデル。ホールドーピング型では $\text{Cu}3d_{x^2-y^2}$ の上部ハバードバンドと酸素の $2p$ バンドの間に電荷移動ギャップが開いて絶縁体であるが、電子ドーピング型はホールドーピング型と比べてCuの配位数が低いため、 $\text{Cu}3d_{x^2-y^2}$ の上部ハバードバンドのエネルギーが低下することでギャップが閉じて金属になる。