

単層型銅酸化物高温超伝導体における電荷密度波・擬ギャップ・超伝導の起源解明

所属： 岡山大学大学院 自然科学研究科 数理物理科学専攻

助成対象者：川崎 慎司

概要

省エネ技術の一つ「室温超伝導」の最有力候補、銅酸化物高温超伝導の発現機構は不明である。なぜなら、超伝導の背景、「異常金属相（擬ギャップ状態）」の起源が未解明だからである。これまで、銅酸化物高温超伝導は、母物質が反強磁性絶縁体のため、「電子スピン」に注目した研究が中心であった。しかし、最近、擬ギャップ状態において磁場誘起の電荷密度波秩序が発見され、電子のもう一つの基本素性である「電荷」が注目されている。現在、世界的研究課題となっている。本研究は、単層型銅酸化物 $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$ に着目し、核磁気共鳴法を用いた実験から、銅酸化物における電荷密度波、擬ギャップ、そして超伝導の発現機構解明を目指して研究を行った。

abstract

Superconductivity appears in the cuprates when a spin order is destroyed, while the role of charge is less known. Recently, charge density wave (CDW) was found in the pseudogap state when a high magnetic field is applied to the CuO_2 plane, suggesting an importance of “charge” to understand the mechanism of the superconductivity in cuprate. Here we performed the $^{63,65}\text{Cu}$ -nuclear magnetic resonance study on the single-layered $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$ superconductor to investigate the relationship between spin order, CDW and the pseudogap, and their connections to high-temperature superconductivity.

研究内容

「背景」

「超伝導」は、無損失送電や余剰電力の蓄電を実現する省エネ技術の一つであり、低コストでインフラ利用が出来る室温超伝導は、将来の革新的技術の一つとして期待されている。しかし、肝心の「室温」超伝導物質はまだない。

既知の超伝導物質の中では、銅酸化物高温超伝導体（最高転移温度 $T_c^{\max} = 134 \text{ K}$ ）が、室温超伝導の最有力候補である。しかし、発見から 30 年を経ても超伝導の起源は不明である。そもそも超伝導の背景、異常金属相（擬ギャップ、図 1 参照）の起源も明らかでない。銅酸化物の物理の難解さは、現代物理学の主要問題の一つに挙げられている[1]。

銅酸化物では、図 1 の実線で示すように、キャリアドーピングで反強磁性を抑制すると超伝導が発現するため、超伝導発現機構を探る上で、磁性（電子スピン）について調べるこ

とが中心課題であった。本研究代表者は、単層型銅酸化物

$\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$ において核磁気共鳴（NMR）実験を行い、図 1 のように反強磁性と超伝導の間に、磁場誘起の長距離不整合電荷密度波（CDW）秩序相を発見し報告した[2]。特筆すべきは、図 2 のように、磁場誘起 CDW 転移温度 T_{CDW} と擬ギャップ温度 T^* に、正の相関が見られることで、我々は T^* は CDW 揺らぎ（電荷揺らぎ）の生じる特性温度ではないかと提案した[2]。X 線散乱実験では、 T^* 以下でナノスケールの短距離 CDW が観測されており[3]、NMR と X 線の時間スケールの差を考慮すれば、この短距離 CDW が NMR にとって“揺らぎ”であっても不思議ではない。一方で、この短距離 CDW は超伝導電子対（クーパー対）の空間密度変調が作る密度波であるとの主張もあり[4]、その起源を巡って活発に議論が交わされている。

以上のように、銅酸化物における新奇な電荷密度波は、擬ギャップの起源や超伝導発現機構に関わることが示唆され、今後さらに「電荷」に注目した研究が重要で、世界的研究課題となっている。

「目的」

本研究は、単層型銅酸化物 $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$ （Bi2201）単結晶を用いて $^{63,65}\text{Cu}$ -NMR 実験

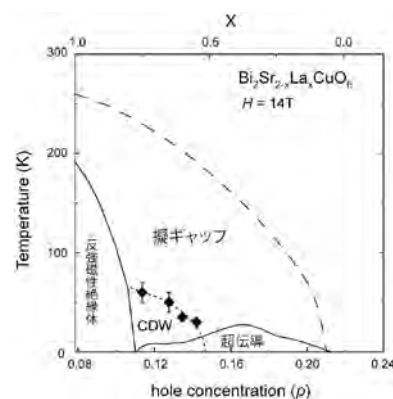


図 1. Bi2201 の擬ギャップ、反強磁性絶縁体、超伝導、磁場誘起 CDW (◆) のホール濃度

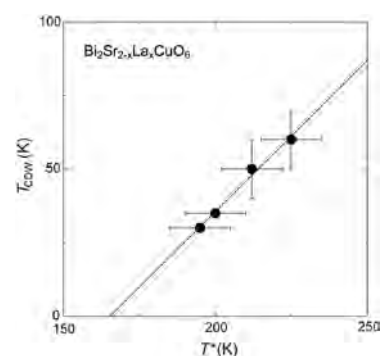


図 2. T_{CDW} と T^* の関係

を行い、銅酸化物における電荷密度波、擬ギャップ、そして超伝導の発現機構解明を目指した研究を行うのが目的である。

「結果」

目的達成の端緒とするため Bi2201 における磁場誘起 CDW を「揺らぎ」の観点から調べた。本研究ではまず CDW の無い最適ドーピング試料 ($p = 0.16$) において、 ^{63}Cu 、 ^{65}Cu 核それぞれの核スピン-格子緩和時間 (T_1) の温度依存性を測定した。ここで、 ^{63}Cu と ^{65}Cu 核は自然存在比 7:3 であり、核磁気回転比 $^{63,65}\gamma$ および電気四重極モーメント $^{63,65}Q$ がそれぞれ異なる。この同位体効果を利用すると、核磁気緩和率 ($1/T_1$) の比 $^{65}(1/T_1)/^{63}(1/T_1)$ が $(^{65}\gamma/^{63}\gamma)^2 = \gamma_R^2$ に等しければ“磁気”、 $(^{65}Q/^{63}Q)^2 = Q_R^2$ に等しければ“電荷”が揺らぎの起源であると決定できる。

一般に銅酸化物を始めとする強相関電子系においては、“磁気”揺らぎが支配的であると信じられてきた。

図 3. 最適ドーピング ($x=0.4$, $p=0.162$) の緩和率の比の温度依存性。破線は γ_R^2 と Q_R^2 を示す。

図 3 に本研究で得られた結果を示す。Bi2201 の最適ドーピング試料 ($p=0.162$) の擬ギャップ状態で T_1 測定を行ったところ、驚くべきことに $^{65}(1/T_1)/^{63}(1/T_1)$ が Q_R^2 に近いことを見出した。本研究で得られた成果は、2019 年に開催された超伝導の国際会議「SNS2019」において招待講演に選ばれた。

「今後」

本研究で得られた結果は、これまで銅酸化物で考えられてきたものと異なるものであり、本研究期間で、あらためて銅酸化物高温超伝導の起源解明にとって「電荷」の役割に着目した研究が重要であることを示す成果を得ることが出来た。今後、超伝導の発現機構解明を目指し、系統的 NMR 実験を継続していくことが重要である。

引用文献

- [1] 日本物理学会誌第 72 巻第 9 号「物理学 70 の不思議」
- [2] S. Kawasaki *et al.*, Nat. Commun. **8**, 1267 (2017).

[3] R. Comin *et al.*, Science **343**, 390 (2014).

[4] K. Fujita *et al.*, PNAS **111**, E3026 (2014).

本助成に関わる成果物

[論文発表]

[口頭発表]

S. Kawasaki, D. Kamijima, M. Kitahashi, Z. Li, C. T. Lin, P. L. Kuhns, A. P. Reyes, and Guo-qing Zheng (Invited talk),

Charge-density-wave order in single-layered $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+\delta}$ superconductor, Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2019) June 16-21, 2019, Ito International Research Center Conference, The University of Tokyo, ISSP International Workshop

[ポスター発表]

S. Kawasaki, T. Oka, A. Sorime, Y. Kogame, K. Uemoto, K. Matano, J. Guo, S. Cai, L. L. Sun, J. L. Sarrao, J. D. Thompson, and Guo-qing Zheng,

Unconventional Gapless Superconductivity at the Quantum Critical Point in $\text{CeRh}_{0.5}\text{Ir}_{0.5}\text{In}_5$, International conference on strongly correlated electron systems 2019 (SCES2019) Sep 23-28, 2019, Okayama Convention center, Okayama

[その他]