

2026 年 9 月 8 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

超伝導の波に隠された「もう一つの周期」を発見！ － 共鳴軟 X 線散乱が解き明かす未踏の電子秩序 －

【発表のポイント】

- 超伝導を担う電子対の密度が空間的に波打つ「ペア密度波（PDW）^{（注 1）}」は、高温超伝導の複雑な性質を理解する鍵として注目されています。
- 共鳴軟 X 線散乱^{（注 3）}により、La 系銅酸化物で、主要な電荷密度波（CDW）^{（注 4）}の二倍の周期を持つ弱い「サブハーモニック応答^{（注 2）}」を観測しました。
- PDW 相関と整合するこの応答は、物質の電子状態を探る指標になります。

【概要】

La 系銅酸化物高温超伝導体において、超伝導を担う電子対が空間的に周期変調するペア密度波（PDW）は、超伝導発現の観点から注目されています。しかし、これまでペア密度波を示唆する間接的な証拠は報告されていたものの、PDW に期待されるサブハーモニック応答は見つかっていませんでした。

東北大学金属材料研究所の藤田全基教授、SLAC 国立加速器研究所の Jun-Sik Lee 上級科学者を中心とする国際研究チームは、Sr 置換 LBCO と Fe 置換 LSCO という化学的に異なる物質を対象に、選択的な共鳴軟 X 線散乱法を用いて銅の電子状態を調べ、微弱なサブハーモニック応答を検出することに成功しました。この応答は、通常の電荷密度波（CDW）のおよそ二倍に当たる周期の波であるという特徴を持ちます。さらに、この応答が現れる温度域を特定することから、PDW が一様な超伝導やストラップ秩序^{（注 5）}と共存・干渉する特徴を持つことを明らかにしました。

今回の発見は、PDW 秩序の単独証明ではありませんが、物質内部の PDW 相関を検証するための新しい実験的手がかりとして位置づけられます。

本研究内容は、2026 年 8 月 31 日に Physical Review B にオンライン掲載され、編集部推薦論文（Editors' Suggestion）に選ばれました。

【詳細な説明】

研究の背景

銅酸化物高温超伝導体では、超伝導だけでなく、電荷やスピンの周期的に並ぶ複数の電子秩序が現れます。特に La 系銅酸化物では、電荷密度波（CDW）とスピン密度波が「ストライプ」と呼ばれるしま模様を形成し、超伝導と複雑に関係することが知られています。その関係を理解するうえで、超伝導を担う電子対の凝縮の強さや位相が空間的に変化する「ペア密度波（PDW）」が注目されています。PDW は、一枚一枚の CuO_2 面内では超伝導相関が発達する一方、面どうしの超伝導結合が弱まる層間デカップリング^{（注6）}を説明する有力な候補として提案されてきました。

これまで、走査トンネル顕微鏡によって物質表面の局所的な PDW 変調が報告されてきました。しかし、物質内部の平均的な電子秩序を調べる散乱実験では、PDW に関連する特徴を捉えることが難しく、La 系銅酸化物におけるバルク感度の実験的な手がかりは限られていました。

今回の取り組み

PDW と通常の一様な超伝導が共存すると、両者の干渉によって、主要な CDW の約半分の波数をもつ電荷変調が生じると考えられます。この電荷変調は、実空間では主要な CDW のおよそ 2 倍の周期に対応します。

そこで研究チームは、元素置換の方法が異なる Sr 置換 LBCO と Fe 置換 LSCO の高品質単結晶を対象に、銅の電子状態を選択的に観測できる共鳴軟 X 線散乱を行いました。強い CDW 信号の裾に重なる微弱な成分を捉えるため、異なる温度で測定した散乱プロファイルの差を解析し、温度に依存しない背景信号を抑えました。その結果、Sr 置換 LBCO では主要な CDW 波数の約半分に当たる位置に、温度低下とともに現れる弱い「サブハーモニック応答」を観測しました。

また電気抵抗測定など行うことで、面内では超伝導相関が発達しながら、層間では三次元的な超伝導が成立していない温度領域を特定しました。その結果と合わせることで、サブハーモニック応答は、面内抵抗が超伝導的に低下する一方で、層間抵抗が有限に保たれる層間デカップリングの温度領域で現れることが明らかになりました。

さらに Fe 置換 LSCO でも、同じ温度条件のもとで同様の応答が確認されました。元素置換の仕方やストライプ秩序の強さが異なる 2 種類の物質で共通の応答が得られたことは、この現象が特定の試料だけに由来するのではなく、超伝導・電荷・スピンの絡み合う物理状態に関係している可能性を示します。信号は非常に弱く、本研究だけで PDW 秩序を決定的に証明したものではありませんが、観測結果は PDW 相関から期待される特徴と整合することから、物質内部の PDW 相関を検証するための新たな実験的指標として位置づけられます。

今後の展開

今後は、より広い運動量空間を測定できる高エネルギーX線散乱や、信号の対称性・位相・エネルギー依存性を識別できる相補的な手法を組み合わせ、サブハーモニック応答の微視的起源を明らかにする必要があります。磁場、圧力、元素置換を変えた系統的測定や、スピン・電荷・超伝導の同時観測も重要です。これらの研究により、電子対が一様に凝縮するという従来像を超え、高温超伝導体で複数の秩序がどのように協調・競合しているのかの理解が進むと期待されます。

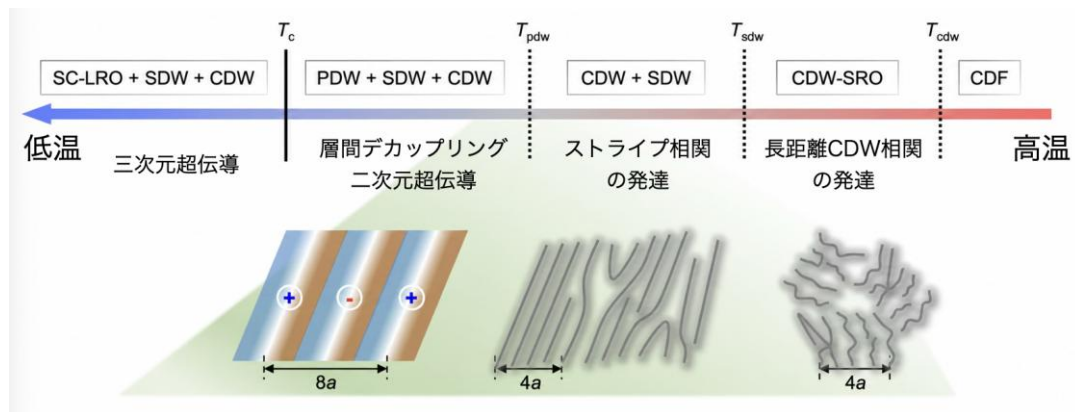


図 1. La 系銅酸化物における絡み合った電子秩序の模式図。冷却に伴い CDW・スピン密度波・PDW 相関・三次元超伝導が異なる温度領域で発達する。PDW 変調は、主要な CDW の約 2 倍の実空間周期（ $4a$ に対して $8a$ ）を取り得る。

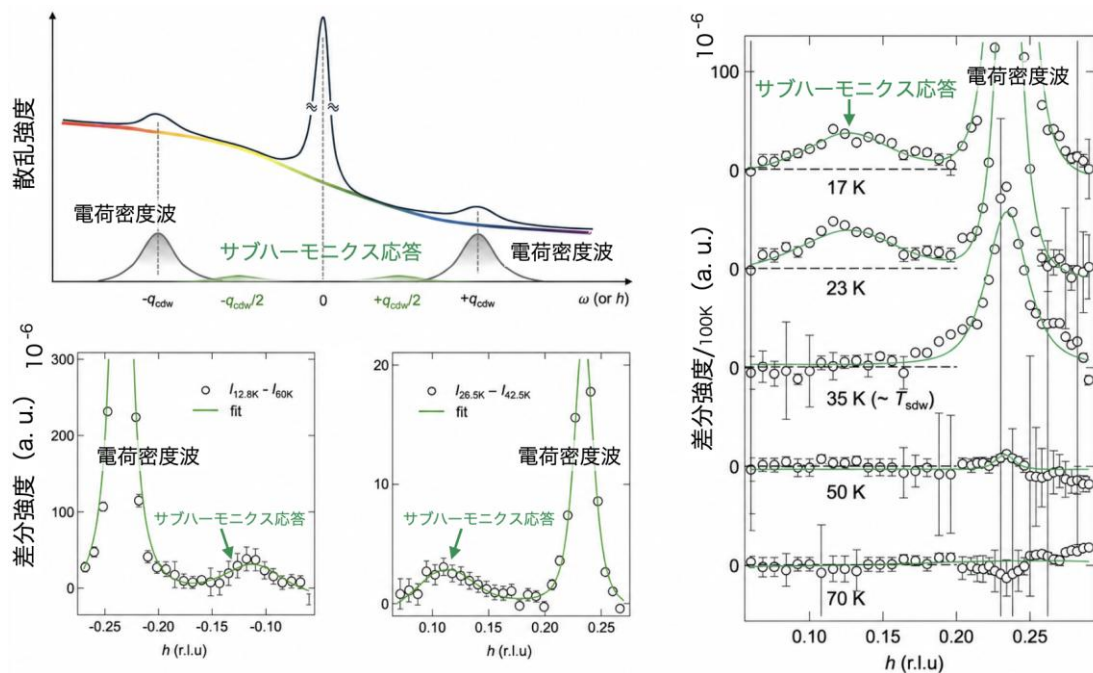


図 2. Sr 置換 LBCO の共鳴軟 X 線散乱スペクトル。強い CDW ピークに加え、主要 CDW 波数の約半分の位置 ($\pm q_{\text{CDW}}/2$) に温度依存する弱い応答が現れる。左下図は低温と高温の差分で、サブハーモニック成分を強調している。右図は各温度と 100K のスペクトルとの差分を示している。温度依存性があることがわかる。

【謝辞】

本研究は、米国エネルギー省科学局・基礎エネルギー科学局（Contract No. DE-AC02-76SF00515）、JSPS 科研費 基盤研究（S）（課題番号 JP21H04987）などの支援を受けて実施されました。共鳴軟 X 線散乱実験は SSRL ビームライン 13-3、中性子散乱実験は東京大学物性研究所 JRR-3 共同利用（課題番号 21527、22402）で行われました。

【用語説明】

注1. ペア密度波（PDW）

超伝導を担う電子対の凝縮の強さや位相が、空間的に周期変化する状態。通常の一様な超伝導とは異なり、電子対そのものが波状の構造をもつ。

注2. サブハーモニック応答

主要な周期構造の整数分の 1 の波数に現れる応答。本研究では主要な CDW 波数の約半分で観測され、実空間では約 2 倍の周期に対応する。

注3. 共鳴軟 X 線散乱（RSXS）

特定元素の吸収端に X 線エネルギーを合わせ、電子状態に由来する散乱を

高感度で調べる手法。本研究では銅 L_3 端を用い、電荷秩序の運動量依存性を測定した。

注4. 電荷密度波 (CDW)

電子密度が結晶中で周期的に濃淡をつくる状態。La 系銅酸化物では、およそ 4 格子間隔の周期をもつストライプ状の電荷秩序が現れる。

注5. ストライプ秩序

電荷とスピンの分布が一方向に周期変調し、しま模様をつくる電子秩序。La 系銅酸化物で顕著に観測される。

注6. 層間デカップリング

一枚一枚の CuO_2 面内では超伝導相関が発達しているにもかかわらず、面どうしのジョセフソン結合が弱まり、物質全体として三次元的な超伝導位相がそろっていない状態。

【論文情報】

タイトル : Observation of subharmonic charge density wave correlations in La-based cuprates

著者 : J. -S. Lee*, S. A. Kivelson, H. Lee, T. Wang, Y. Ikeda, T. Taniguchi, C. -T. Kuo, M. Fujita, and C. -C. Kao

*責任著者 : スタンフォード線形加速器国立研究所 上級科学者 Jun-Sik Lee

掲載誌 : Physical Review B

DOI : <https://doi.org/10.1103/djbs-mcz5>

URL:

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学金属材料研究所

教授 藤田全基

TEL: 022-215-2035

Email: fujita@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学金属材料研究所

情報企画室広報班

TEL: 022-215-2144

Email: press.imr@grp.tohoku.ac.jp