

2026年5月8日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

超伝導でととのう電荷秩序の「しま模様」 — 銅酸化物超伝導体で「位相コヒーレンス」を強める 新たな関係を発見 —

【発表のポイント】

- これまで銅酸化物高温超伝導体において、電荷密度波（CDW）^(注1)と超伝導は互いに抑制し合う競合の関係にあると捉えられてきました。
- 銅酸化物高温超伝導体の一種である $\text{La}_{1.885}\text{Sr}_{0.115}\text{CuO}_4$ の超伝導状態において、CDWの振幅（強さ）が抑えられる一方、揃い方（位相コヒーレンス^(注2)）が強まるという現象を新たに発見しました。
- 本現象は長期保管で結晶構造に乱れが導入された試料や他の銅酸化物ファミリーの既報データとも共通して観察されたことから、銅酸化物に共通する本質的な性質であると考えられます。

【概要】

高温超伝導と CDW は長らく排他的な競合関係にあるとされてきましたが、波状に現れる両者の位相の関係は未解明でした。

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、銅酸化物高温超伝導体において、超伝導が CDW の振幅や体積を抑える一方で、CDW の位相コヒーレンスを強めることを示しました。研究チームは銅酸化物高温超伝導体の一種である $\text{La}_{1.885}\text{Sr}_{0.115}\text{CuO}_4$ を対象に、共鳴軟 X 線散乱^(注3)を用いて CDW 散乱ピークの温度依存性を測定しました。その結果、 T_c ^(注4)直上の 27 K から超伝導状態の 12.4 K に温度を下げると、積分強度^(注5)は約 15% 低下する一方でピーク幅は約 21% 縮小しました。これは、超伝導によって CDW の「しま模様」がより広い範囲で規則正しく整列したこと（実空間相関長の増大）を意味します。従来の競合モデルでは説明できないこの現象に対し、研究チームは解析によりピーク幅を結晶中の乱れを示す位相コヒーレンスの成分に分けて評価しました。その結果、超伝導下で CDW 強度が減少する一方、位相コヒーレンスが增大していることを突き止めました。今後、高温超伝導発現機構や、intertwined order^(注6)の理解が大きく進むことが期待されます。

本成果は、2026年5月7日に学術誌 Physical Review Letters にオンライン掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

銅酸化物において高温で発現する超伝導のメカニズム解明は、物性物理学における重要課題の一つです。超伝導相の近傍には、多様な秩序相が存在しており、とりわけ電子密度が空間的に周期構造をつくる電荷密度波（CDW）は、さまざまな銅酸化物で共通して観測されることから注目を集めてきました。

これまでの散乱実験では、超伝導が弱まると CDW 相関が強まることなどから、超伝導と CDW は基本的に競合する関係にあると理解されてきました。しかし、その多くは CDW の強度や体積に着目した解析であり、運動量空間におけるピーク幅や波数ベクトルの微妙な変化に含まれる情報、特に位相のそろう方に関してはあまり注目されていませんでした。

今回の取り組み

本研究チームは、Cu L_3 端での共鳴軟 X 線散乱実験を用い、 $\text{La}_{1.885}\text{Sr}_{0.115}\text{CuO}_4$ 単結晶で観測される強度の弱い CDW ピークを、広い温度領域にわたって高い統計精度で追跡しました。近年向上した検出効率、温度安定性、測定手法を組み合わせることで、これまで難しかった超伝導転移近傍での精密な運動量プロフィール解析を可能にしました。

実験結果では、 T_c 以下で CDW ピークの半値全幅が有意に減少し、実空間相関長が連続的に増大しました。研究チームは、液晶的なストライプ秩序^(注7)の理論に基づく「コヒーレンス感度の高い散乱形式」を用いて、観測されるピーク幅を、ドメインサイズの制限に由来する成分と、位相コヒーレンスに由来する成分に分解しました。これにより、強度だけでは見えない位相秩序の変化を定量的に抽出しました（図1）。その結果、位相コヒーレンスの強化量は約20%と見積もられ、その温度依存性は BCS 型ギャップ関数^(注8)に似た急速な立ち上がりを示すことが明らかになりました。一方で、CDW の積分強度は約 15% 低下しており、「振幅は抑えられるが位相は揃う」という二面的な応答が示されたこととなります（図2）。

また、CDW の波数ベクトルは T_c 以下でほぼ一定値に固定し、格子との結合やフォノン異常との関連も示唆されました。さらに、同一結晶を 5 年以上常温保管して乱れを導入した試料では、CDW 体積が約 60% 減少したにもかかわらず、超伝導に伴う位相コヒーレンス強化は依然として観測されました。加えて、Bi 系、Hg 系、Y 系、Nd 系銅酸化物に関する既報の高統計共鳴軟 X 線散乱、共鳴非弾性 X 線散乱、硬 X 線散乱データと比較した結果、 T_c 以下での CDW ピーク幅の変化は、結晶構造や測定手法が異なってもほぼ共通の傾向を示していることがわかりました。これは、超伝導による CDW 位相コヒーレンス強化が、銅酸化物群に広く共通する現象である可能性を示しています。

今後の展開

本研究は、超伝導と CDW の関係を「競合」だけで説明する従来像を拡張し、超伝導が CDW の位相自由度を通じて協調的にも作用しうることを示しました。この視点は、スピン秩序や対密度波^(注9)を含む複合的な電子秩序の理解に新たな枠組みを与えるものです。

今後、研究チームは、フォノンなどの集団励起との結合、高磁場下や光励起下での応答、スピン秩序との同時測定などを通じて、この位相コヒーレンス強化の微視的起源を解明していく予定です。こうした研究は、高温超伝導の本質に迫る重要な手がかりになると期待されます。

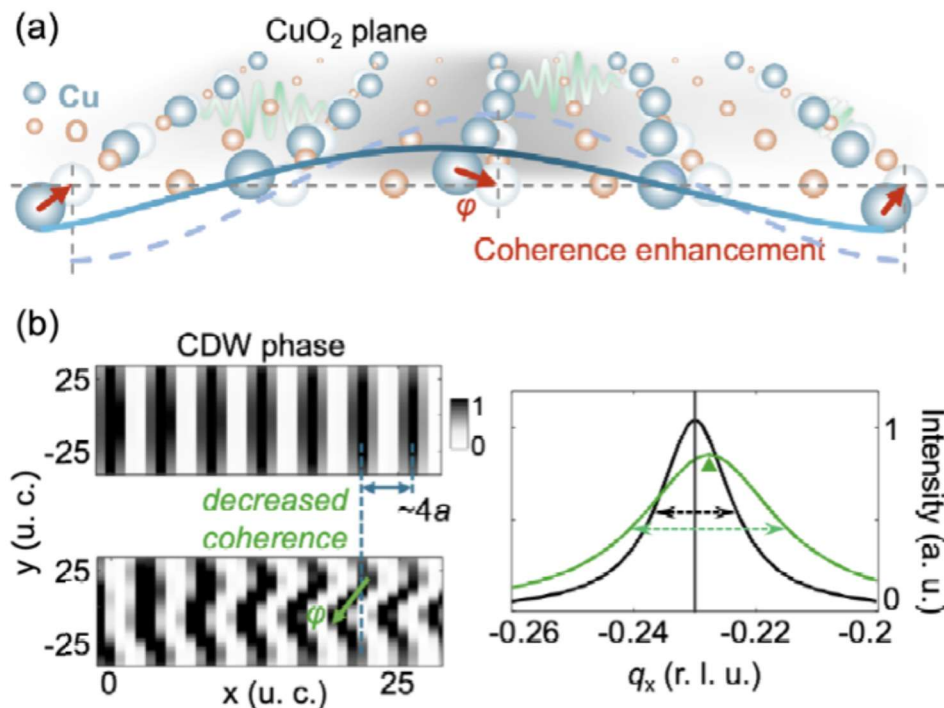


図 1. (a)超伝導体の CuO_2 平面における電荷密度波 (CDW) を示す模式図。薄い青色と濃い青色の陰影は、それぞれコヒーレンスの高い CDW 相と低い CDW 相を区別している。赤い矢印は、CDW 相のコヒーレンスの変化を示しており、フォノン (緑色の振動) などの集団励起によって位相 ϕ の変化として引き起こされる可能性がある。

(b) 理想的なコヒーレント位相で周期性が約 4 の場合 (左上) と、有限の位相変化 ϕ を伴うコヒーレント位相の低下の場合 (左下) のシミュレーションによる CDW ピークプロファイル (右)。

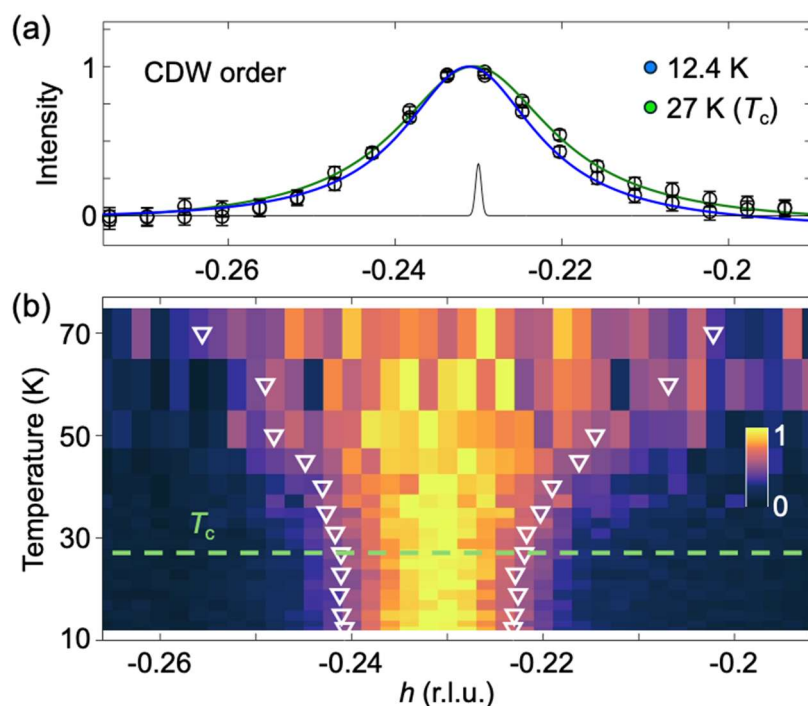


図 2. (a) $\text{La}_{1.885}\text{Sr}_{0.115}\text{CuO}_4$ の (a) $T_c = 27$ K (緑の丸印) および $T = 12.4$ K (青の丸印) で測定された運動量 h 方向の CDW ピークプロファイル。対応する単一ローレンツ関数によるフィッティングを実線で示している。2 つの温度で得られたプロファイルでは、ピーク幅の違いが黒線で示す装置分解能を上回っており、この変化が有意であることを示している。

(b) CDW 強度の 2 次元マップ (横軸は運動量 h の値、縦軸は温度 T の値)。各温度において、 h 方向のプロファイルは最大強度で規格化している。逆三角形は各温度でのピーク半値全幅を示す。温度低下に従い、超伝導転移 (T_c) に向かって CDW ピークの幅が狭まっていることがわかる。

【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) と、JSPS 科研費 JP 21H04987 の支援を受けて実施されました。

【用語説明】

注1. 電荷密度波 (CDW)

電子密度が実空間で周期的な濃淡を持って並んだ状態。銅酸化物ではスピン秩序や格子振動と結びついて現れることがある。

注2. 位相コヒーレンス

波の「山」と「谷」の位置関係がどの程度そろっているかを表す量。CDW の位相がよりそろくと散乱ピークは鋭くなる。

注3. 共鳴軟 X 線散乱

特定の元素の吸収端にエネルギーを合わせた X 線を物質に入射し、散乱した X 線を測定する実験手法。本 X 線散乱実験では、銅の L_3 端を使用しており、この手法により電荷の並び方に関する情報を取得できる。

注4. T_c

電気抵抗がゼロになる「超伝導」が始まる温度。

注5. 積分強度

散乱ピーク全体の面積であり、CDW 秩序の強さや散乱に寄与する秩序領域を表す量である。

注6. intertwined order (複合秩序)

スピン、電荷、超伝導などの性質が密接に結びつき、影響し合う状態。これらが単なる「競合」ではなく、共通の電子状態から派生し、位相レベルで協力し合える関係であることを示唆している。

注7. 液晶的ストライプ秩序

物質の中で、電子密度がしま模様のように一方向に並んだ状態で、規則正しく並ぶ結晶と、自由に動く液体の中間の状態をいう。

注8. BCS 型ギャップ関数

フォノン媒介型超伝導体における超伝導ギャップの温度依存性。温度低下とともに、値は $T = T_c$ のゼロから急激に増加し、 $T = 0$ K で最大値を持つ。

注9. 対密度波

超伝導をつくる電子対の強さや向きが、空間的に波のように周期的に変化する状態。

【論文情報】

タイトル : Superconductivity Reinforces Charge-Density-Wave Phase Coherence across Cuprates

著者 : H. Lee, C.-T. Kuo, M. Fujita, C.-C. Kao, J.-S. Lee*

*責任著者 : SLAC 国立加速器研究所 上級科学者 Jun-Sik Lee

掲載誌 : Physical Review Letters

DOI : 10.1103/g41t-8456

URL : <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/g41t-8456>

【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