

2023年2月10日

報道機関 各位

東北大学金属材料研究所

高温超伝導の実現に関わる 電荷密度波を安定にする状態を発見

— 転移温度がさらに高い物質開発の指針に —

【発表のポイント】

- X線自由電子レーザーを利用したパルス強磁場下回折実験を銅酸化物高温超伝導体の単結晶に対して行いました。
- 超伝導体には2種類の電荷密度波があり、超伝導と共存する電荷密度波は、強磁場で誘起される渦糸液体状態で安定化することを発見しました。
- 高い超伝導転移温度をもつ銅酸化物における電荷密度波と超伝導の普遍的な関係を解明することに貢献すると期待されます。

【概要】

高い温度で電気抵抗ゼロの超伝導状態になる物質では、常伝導状態から転移した超伝導状態が電荷密度波^{*1} (Charge Density Wave; CDW)と密接な関係にあることが、これまでの研究で分かってきました。しかし2種類のCDWが発見されており、それらが超伝導転移温度とどのような関係にあるかは、明らかにされていませんでした。今後、さらに転移温度の高い超伝導物質を開発するため、CDWの詳しい性質を調べるのが課題でした。

層状銅酸化物の超伝導相では電荷密度波が共通して見られ、超伝導およびスピン密度波^{*2} (Spin Density Wave; SDW)と密接な関わりがあることが知られています。銅酸化物層の単層構造を持つ超伝導物質のランタン(La)、ストロンチウム(Sr)、銅(Cu)酸化物の $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO)では、2種類のCDWの存在が示されています。一つは、スピン密度波と空間的に共存した長距離秩序CDW(CDW_{stripe})で、もう一つは、SDWを伴わない短距離秩序CDW(CDW_{SRO})です。現在、超伝導発現機構におけるCDWの役割を解き明かすため、性質の異なるCDWの素性の解明に注目が集まっています。

東北大学金属材料研究所の野尻浩之教授と藤田全基教授らの研究グループは、超伝導体である $\text{La}_{1.885}\text{Sr}_{0.115}\text{CuO}_4$ のCDWの素性を解明するために、24テスラ(磁

束密度の単位)までのパルス磁場を印可した条件下で、X線自由電子レーザー^{※3}による回折実験を行いました。その結果、絶対温度 6.5 ケルビンの無磁場中では 2 種類の CDW が存在し、超伝導と共存する CDW_{SRO} からの X 線散乱強度が、強磁場で誘起される渦糸液体状態^{※4} になると突然増加することを見出しました。この結果は、CDW_{SRO} が渦糸液体状態で安定化することを示しており、CDW_{SRO} と動的な渦糸に強い結合があることを意味します。今後、高い超伝導転移温度を持つ物質の設計指針に活かされ、エネルギー問題や地球温暖化問題の解決に貢献すると期待されます。

本研究内容は、2023 年 2 月 9 日(現地時間)に Nature Communications にオンライン掲載されました。

【詳細な説明】

○研究背景

銅酸化物高温超伝導相には共通して CDW が観測されています。そのため、超伝導と CDW の関係解明に向けた研究が精力的に行われています。銅酸化物の単層構造を持つ超伝導体 LSCO では、他の超伝導体と異なり、キャリア濃度 (x) が 1/8 に近い試料において、CDW だけでなく SDW の秩序状態が存在し、その安定性が x の量で変化することが知られています。また最近の研究から、2 種類の CDW の存在が報告されており、SDW と空間的に共存した長距離秩序 CDW (CDW_{stripe}) と、SDW を伴わない短距離秩序 CDW (CDW_{SRO}) が、同じ試料内に相分離していることが提案されています(図 2(左))。性質の異なる CDW の情報を得るためには、磁場などの外場を加えて、その変化を観測することが有効です。

そこで本研究グループは、自作した La_{1.885}Sr_{0.115}CuO₄ の高品質単結晶試料に対して、X 線自由電子レーザーを活用したパルス強磁場下における回折実験を行い、CDW の磁場応答から超伝導と CDW の関係解明を目指しました。

○成果の内容

銅酸化物高温超伝導体における上部臨界磁場^{*5} は数十テスラと非常に高いことが知られています。そのため磁場下で超伝導と CDW の関係を調べるためには、超伝導状態が変化するほどの強磁場を印可した状態で CDW を観測する必要があります。また、CDW 状態の観測には、十分な入射 X 線の輝度が必要です。両者を満たすために、アメリカの自由電子レーザー施設であるスタンフォード線形加速器センター (SLAC) に、本研究グループで開発したポータブル・パルス磁石を持ち込み、強磁場下でシングルショット高輝度 X 線回折実験を行いました。

まず無磁場で CDW からの回折プロファイルを取得し(図 1)、その温度依存性から試料内に CDW_{stripe} と CDW_{SRO} が存在することを確認しました(図 2(左))。CDW_{SRO} は、超伝導状態で散乱強度が減少することから、超伝導と相関を持った状態であることが示唆されます。また、散乱強度の比較から CDW の成分の半分以上が CDW_{SRO} であることもわかりました。

今回の実験による最も注目すべき発見は、磁場を印可すると、ある磁場 (H_m) を境に CDW からの散乱強度が急激に増加することです(図 1(中、右)、図 2(右))。この H_m は超伝導体に侵入した磁束線が融解する磁場であることから、強磁場で誘起される渦糸液体状態と CDW の間に強い結合があることがわかります。超伝導との関係性から、この変化は CDW_{SRO} が担っていると考えられます。一方 H_m 以下の強度変化は、SDW の磁気散乱強度の磁場変化と整合することから、渦糸固体状態^{*4} での磁場変化は CDW_{stripe} の応答であると理解できます。これらの結果は、超伝導と競合する性質を持つ CDW_{stripe} とは対比的に、CDW_{SRO} は局所的な超伝導対と共存し、渦糸の形成にも関与する可能性を示しています。

○意義・課題・展望

CDW の素性については、未だ不明な点が多く残されており、銅酸化物高温超伝導に普遍的な性質と物質に固有な性質の見極めが重要です。今回の実験で、シングルショットプローブである高輝度レーザーとパルス超強磁場の組み合わせが、高温超伝導体の電子不均一性の解明に有効であることを示しました。今後、超伝導転移温度の高い銅酸化物に対して同手法で CDW の素性を調べれば、超伝導転移機構における CDW の普遍的役割が解明されると期待されます。

○発表論文

雑誌名 : Nature Communications

タイトル : Enhanced charge density wave with mobile superconducting vortices in $\text{La}_{1.885}\text{Sr}_{0.115}\text{CuO}_4$

全著者 : J.-J. Wen*, W. He, H. Jang, H. Nojiri, S. Matsuzawa, S. Song, M. Chollet, D. Zhu, Y.-J. Liu, M. Fujita, J. M. Jiang, C. R. Rotundu, C.-C. Kao, H.-C. Jiang, J.-S. Lee, and Y. S. Lee

*責任著者

DOI: 10.1038/s41467-023-36203-x

○専門用語解説

※1 電荷密度波 (CDW)

電荷密度の大きさが、実空間で周期的な濃淡を持った状態。

※2 スピン密度波 (SDW)

電子が持つスピン密度の大きさが、実空間で周期的な濃淡を持った状態。

※3 X線自由電子レーザー

波の位相が揃った X 線。原子から剥ぎ取られた自由電子を利用して、高輝度で短パルスの X 線が作られる。

※4 渦糸液体状態、渦糸固体状態

超伝導体に磁場を掛けることで、超伝導体を貫くように生じる磁束線が、その位置を変えながら動いている状態。磁束線の侵入により、超伝導状態に局所的な渦糸 (欠陥) ができる。また、渦糸の動きが止まった状態を渦糸固体状態という。

※5 上部臨界磁場

印可する磁場の増加により、超伝導体を貫く磁束線の数が増え、超伝導状態が壊れて常伝導状態になる磁場の大きさ。

○共同研究機関および助成

本成果は、東北大学金属材料研究所 国際共同利用・共同研究拠点（GIMRT）、および、日本学術振興会（JSPS）の科研費 JP23224009, JP16H02125, JP21H04987 の助成を受けて実施されました。

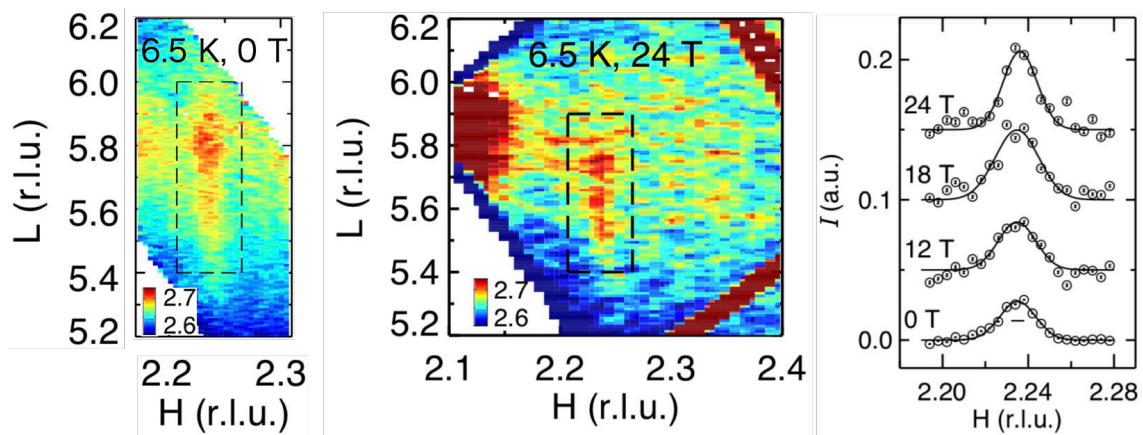


図 1. X 線回折実験により逆格子空間で観測された、電荷密度波に由来する信号強度。(左)は無磁場、(中)は24 テスラでの磁場中の測定結果で、(右)は破線内でL 方向に積分したスペクトルの強度磁場依存性を示しています。

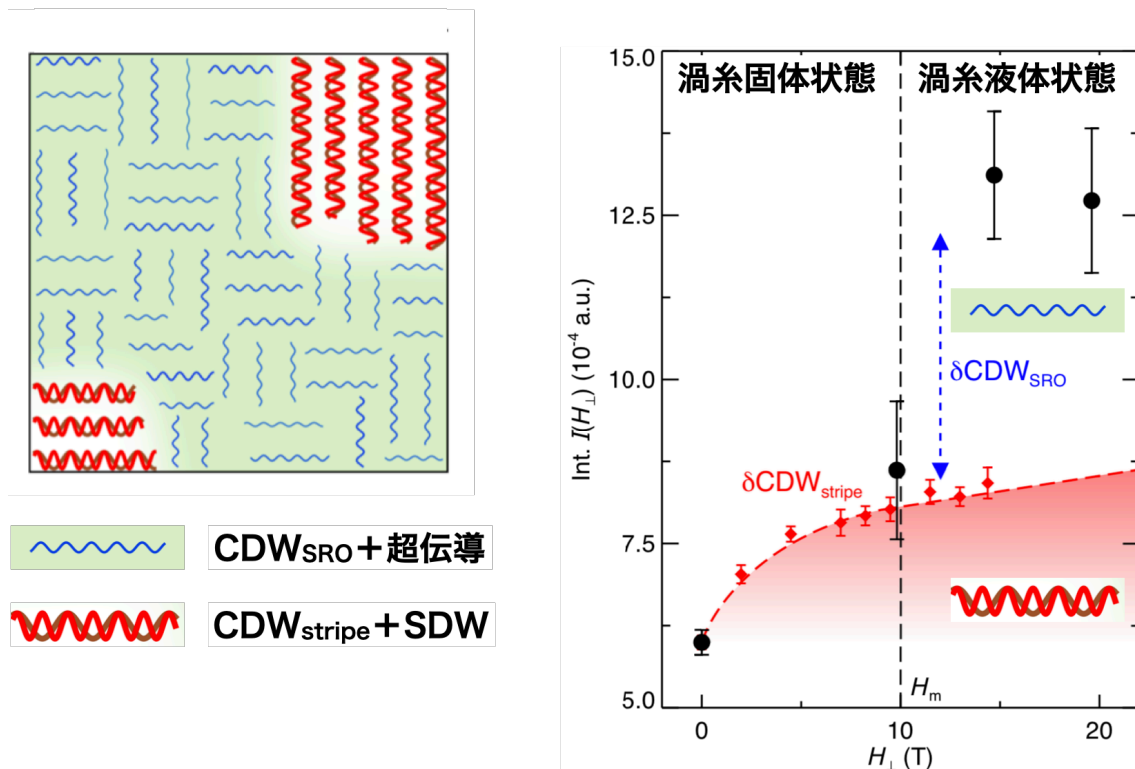


図 2. (左)超伝導、電荷密度波(CDW)、スピン密度波(SDW)の概略図。CDW には超伝導と SDW を伴わず超伝導と共存する短距離秩序 CDW(CDW_{SRO})と、SDW と共存し、超伝導と競合する長距離 CDW(CDW_{stripe})の 2 種類があります。(右)CDW(黒丸)と SDW(赤丸)による X 線散乱強度の磁場依存性を示しています。

本件に関するお問い合わせ先

◆研究内容に関して

東北大学金属材料研究所

磁気物理学研究部門

教授 野尻浩之

TEL:022-215-2015

E-mail:hiroyuki.nojiri.e8@tohoku.ac.jp

東北大学金属材料研究所

量子ビーム金属物理学研究部門

教授 藤田全基

TEL:022-215-2035

E-mail:masaki.fujita.b5@tohoku.ac.jp

◆報道に関して

東北大学金属材料研究所

情報企画室広報班

TEL:022-215-2144 FAX:022-215-2482

E-mail:press.imr@grp.tohoku.ac.jp