

平成 30 年 1 月 15 日

報道機関 各位

東北大学金属材料研究所

超伝導に影響を受けない電荷秩序を世界で初めて発見 ～電子ドーピング型銅酸化物の超伝導機構の理解に指針～

【発表のポイント】

- 室温超伝導物質を発見するため、現段階で最も高温で超伝導になる銅酸化物の超伝導のしくみを詳細に調べる研究が精力的に行われている。
- 電子ドーピング型銅酸化物超伝導体の電荷秩序は、超伝導の発現とは無関係であることを量子ビーム測定により解明。
- 電子ドーピング型における電荷秩序の性質は、ホールドーピング型と比べて大きく異なることを発見。

【概要】

国立大学法人東北大学金属材料研究所とスタンフォード線形加速器国立研究所を中心とする国際研究チームは、電子ドーピング型銅酸化物¹⁾の非超伝導試料と超伝導試料の電荷秩序と電子構造の違いを世界で初めて明らかにしました。

銅酸化物高温超伝導体は、絶縁体である母物質（モット絶縁体）に電荷を注入すること（電荷ドーピング）で超伝導が発現します。電荷ドーピングには電子を取り除いて孔（ホール）をあける「ホールドーピング型」と、電子を加える「電子ドーピング型」の2種類があります。超伝導体において、特に電子ドーピング型の性質は未解明な部分が多く、超伝導との関わりやホールドーピング型と性質の違いについては理解が進んでいませんでした。

本研究では電子ドーピング型銅酸化物の非超伝導試料と超伝導試料の電子構造の違いを直接比較するため、本研究チームが得意とする共鳴軟X線散乱²⁾と角度分解光電子分光³⁾を組み合わせる実験を行いました。その結果、電荷密度波⁴⁾（電荷秩序の指標）の起源がそれまで考えられていたフェルミ面⁵⁾の不安定性によるものではないことを明らかにしました。また電荷秩序の存在は超伝導の発現と関連がないこともわかりました。本研究により、電子ドーピング型における電荷秩序の性質がホールドーピング型と比べて大きくことなることを明らかにしました。

本研究内容は2017年12月15日にPhysical Review Xにオンライン掲載されました。

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 量子ビーム金属物理学研究部門
藤田 全基
TEL:022-215-2035 FAX:022-215-2036
Email:fujita@imr.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
横山 美沙
TEL:022-215-2144 FAX:022-215-2482
Email:pro-adm@imr.tohoku.ac.jp

【詳細な説明】

○研究の背景

銅酸化物高温超伝導体は、常圧下で現在最も高い温度で超伝導になる物質です。そのため超伝導機構の研究が精力的に行われています。超伝導相の近傍には、反強磁性秩序や擬ギャップ相など多様な秩序相が存在しており、それらの秩序相と超伝導相との共存、及び、競合の問題を明らかにすることが、機構解明の重要な手がかりとなります。またこの問題の解決は、より高い転移温度をもつ超伝導体の設計指針にもつながります。近年、放射光 X 線分光技術の発展により、長周期構造を持った電荷密度波が秩序化する相（電荷秩序相）が銅酸化物超伝導体の超伝導相で共通して存在することが明らかになってきました。しかし、電子ドープ型とホールドープ型における電荷秩序の性質には多くの相違点があり、その起源や超伝導との関わりは統一的に理解されていませんでした。

○研究の手法

本研究では、電子ドープ型銅酸化物超伝導体 $\text{Nd}_{2-x}\text{CexCuO}_4$ (NCCO) を研究対象としました。この物質では、超伝導の発現に還元アニール処理が必要であるという特徴があります。還元アニール前の非超伝導試料 (as-grown 試料) と還元アニール後の超伝導試料 (annealed 試料) を用いることで、電荷秩序と電子構造の変化、及び、超伝導との関係を調べることができます。電荷密度波の有無やその周期性を共鳴軟 X 線散乱 (Resonant soft x-ray scattering; RSXS) で、電子構造を角度分解光電子分光 (Angle-resolved photoemission spectroscopy; ARPES) 測定で調べました。

○得られた成果

電子ドープ型超伝導体で報告されていた 4 倍周期の超格子反射が annealed 試料だけでなく as-grown 試料においても観測されました。このことは、電荷密度波が超伝導の有無とは無関係であることを意味しています。さらに、アニール前後で長周期構造を特徴付ける波数ベクトルは一定であるのに対し、電子構造は明確に変化することから、電荷密度波の起源がフェルミ面の不安定性で説明できないことが明らかとなりました。

図 (a) (b) に、NCCO の annealed 試料と as-grown 試料の RSXS スペクトルを示します。いずれの試料においても、 $q \sim 1/4$ を中心としたピーク構造があります。また、このピーク構造の形状や温度依存性は、アニール前後で有意な差がありませんでした。つまり、RSXS で観測された超格子反射は、超伝導の発現に影響されないことを示しています。この結果は、ホールドープ型における電荷秩序相が超伝導と競合するという性質と異なっています。一方、図 (c) (d) に還元アニール前後のフェルミ面を示します。また、図 (e) は、このフェルミ面を、 $(\pi, 0)$ を通る ky 方向の直線上で見たスペクトルの強度を表しています。

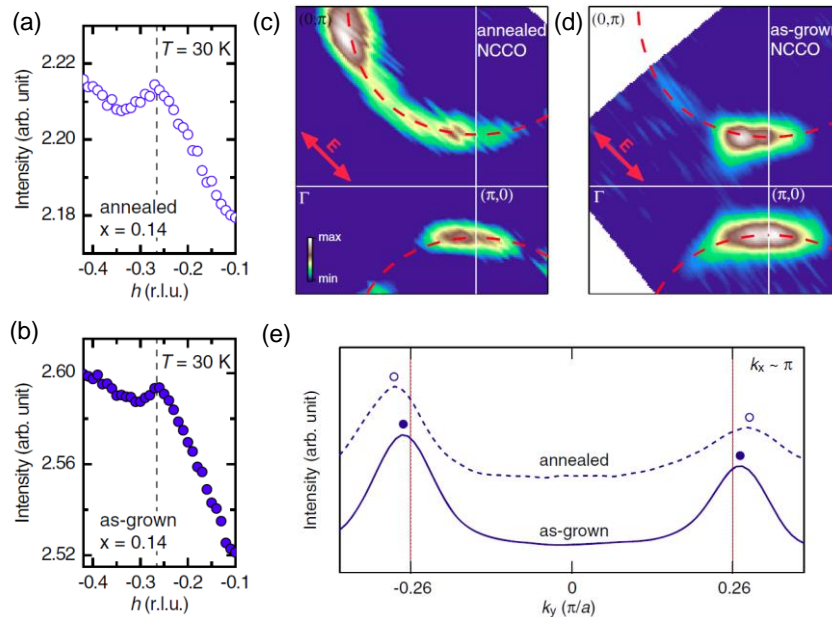


図: $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の $x = 0.15$ (NCCO) の (a) annealed 試料と (b) as-grown 試料の RSXS スペクトル。いずれのスペクトルも $q \sim 1/4$ にピークがあります。NCCO の (c) annealed 試料と (d) as-grown 試料の ARPES により観測したフェルミ面。(e) $(\pi, 0)$ 周りで k_y 方向にカットしたスペクトル ((c) (d) における白線)。赤線は、RSXS スペクトルのピーク位置の波数 $q \sim 1/4$ を示しており、●と○のネスティングベクトルと一致していません。

(図 (c) (d) における白線)。●と○は、ネスティングベクトル⁶⁾の波数位置を示しています。図 (e) のように、ネスティングベクトルは、RSXS で観測した超格子反射の波数と一致しませんでした。つまり、RSXS で観測した超格子反射はフェルミ面の不安定性で説明できないことを意味しています。これら結果は、ホールドーブ型の電荷秩序の性質とは大きく異なるもので、モット絶縁体にキャリアドーブして生じる電荷秩序の性質に電子・ホール非対称性があることを意味しています。

○今後の展開

本研究結果から、電子ドーブ型銅酸化物において RSXS で観測した超格子反射は、ホールドーブ型の電荷秩序に由来した超格子反射の性質と比べて大きく異なっていることがわかりました。今後、この電子ドーブ型における超格子反射の起源を探索することで、銅酸化物超伝導体における電荷秩序相の普遍性の理解に繋がると期待されます。

○書誌情報

雑誌名 : Physical Review X

タイトル : Superconductivity-insensitive order at $q \sim 1/4$ in electron doped

cuprates

著者 : H. Jang,¹ S. Asano,² M. Fujita,² M. Hashimoto,¹ D. H. Lu,¹ C. A. Burns,^{1,3} C.-C. Kao,⁴ and J.-S. Lee¹

所属 : ¹Stanford Synchrotron Radiation Lightsource, SLAC National Accelerator Laboratory, ²Institute for Materials Research, Tohoku University, ³Dept. of Physics, Western Michigan University, ⁴SLAC National Accelerator Laboratory

DOI : 10.1103/PhysRevX.7.041066

○用語説明

1) 電子ドーピング型銅酸化物

銅酸化物超伝導体の母物質は、電子間のクーロン斥力により絶縁体化したモット絶縁体です。この絶縁体に、符号が正、または負のキャリアを注入すると、物質の金属化が起こり、低温で超伝導が発現します。注入するキャリアの符号が正の物質をホールドーピング型、符号が負の物質を電子ドーピング型と呼びます。本研究では、電子ドーピング型の銅酸化物を研究対象としました。

2) 共鳴軟 X 線散乱 (RSXS)

共鳴軟 X 線散乱 (Resonant soft x-ray scattering; RSXS) とは、遷移金属原子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です。本 X 線散乱実験では、銅の L_3 端を使用しました。この手法により、結晶の周期性よりも長い周期のスピンや電荷の密度波を測定できます。

3) 角度分解光電子分光 (ARPES)

角度分解光電子分光 (Angle-resolved photoemission spectroscopy; ARPES) とは、物質の表面に紫外線や X 線を照射した際に、表面から放出された電子 (光電子) のエネルギーと運動量を測定する実験手法です。放出電子の情報から、物質中の電子状態をエネルギーと運動量に分解して知ることができます。

4) 電荷密度波

電子の密度が、実空間で周期的な濃淡を持った秩序状態。

5) フェルミ面

結晶中の電子が取り得るエネルギーと運動量の固有の関係を表した曲線をバンド構造と呼びます。このバンド構造においてエネルギーの低い順に、電子は状態を占有します。フェルミ面とは、占有した電子のうちで最大のエ

エネルギーを持つ電子状態が運動量空間で形成した曲面のことです。

6) ネスティングベクトル

ネスティングベクトルとは、フェルミ面の一部同士を平行移動により重ねることができる特定の波数ベクトルのことです。電子系が自発的にエネルギーを下げる際に、スピンや電荷が長周期構造を形成することがあります。その際、電子構造で特徴づけられたネスティングベクトルと長周期構造の波数が一致するという特徴があります。