



岡山大学記者クラブ
文部科学記者会
科学記者会 御中

平成29年11月2日
岡 山 大 学

高温超伝導転移直前に隠された電荷秩序を発見

～高温超伝導発現機構解明へ重要な鍵～

岡山大学大学院自然科学研究科（理）の鄭国慶教授、川崎慎司准教授らの研究グループは、銅酸化物高温超伝導体において、未知の「電荷密度波秩序^[1]」が存在することを新たに発見しました。また、この秩序が、高温超伝導転移前の異常金属状態と関係があることを突き止めました。

電子は「スピン^[2]」と「電荷^[3]」という二大素性をもっています。高温超伝導は電子のスピンが関与する反強磁性秩序状態が抑制されてから発現するため、これまでの研究はスピンの役割の解明に集中していました^[5]。本研究グループは、今回新たに電荷の役割を発見したのです。すなわち、超伝導発現し始めるところでは、スピン秩序に取って代わって電荷秩序が現れることを突き止めました。電荷秩序の臨界温度はスピン秩序温度の連続的な延伸であり、キャリア濃度の増加とともに減少します。

本研究成果は 11 月 2 日英国時間午前 10 時（日本時間午後 6 時）、英科学誌「*Nature Communications*」に掲載されます。

高温超伝導は 1986 年に発見されましたが、現在も超伝導発現メカニズムは未解明です。本研究成果は、高温超伝導発現後 30 年余り続く謎を解く鍵を与えるもので、超伝導発現の機構を考える上で重要な手がかりを与え、今後の高温超伝導現象理解に進展をもたらすことが期待されます。

< 背 景 >

高温超伝導体は 1986 年に発見され、直後に液体窒素の沸点（マイナス 196℃）を超えるような「高温」で電気抵抗ゼロの状態が実現したことから、室温超伝導が高効率送電や蓄電など、将来有望な省エネ技術の一つとなることが期待されてきました。しかしながら、1993 年以降は、世界中の研究者による努力にもかかわらず、超伝導が起こる温度（転移温度）は上がっておらず、室温超伝導も実現していません。その理由ははっきりしており、そもそもどうして高温超伝導が起こるのか、発現メカニズムが分からないため、物質開発・探索の指針が定まらないからです。現在も、物質開発と同時に、発現メカニズムを追求するような基礎研究が、実験、理論両面から世界中で精力的に行われています。



PRESS RELEASE

<業績>

岡山大学大学院自然科学研究科数理物理学専攻（理学部物理学科）の鄭国慶教授（低温物性物理学）、川崎慎司准教授（同）を中心とする国際共同研究グループ^[4]は、ビスマス系銅酸化物高温超伝導体^[5] $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$ に強磁場を加え、核磁気共鳴（NMR）法^[6]を用いて高温超伝導が発現する背景を系統的かつ詳細に調べました。その結果、超伝導発現直前に新たに「電荷密度波秩序」を発見しました。これは、これまで信じられてきた高温超伝導体の電子相図に新たな情報を書き加えるもので、今後の高温超伝導現象の理解と、より高い転移温度をもつ超伝導体の開発に進展をもたらすと期待されます。

<内容>

電子は「スピン」と「電荷」という二大素性をもっています。高温超伝導は電子のスピンが関与する反強磁性秩序状態が抑制されてから発現するため、これまでの研究はスピンの役割の解明に集中していました^[5]。研究グループは、今回新たに電荷の役割を発見したのです。すなわち、超伝導発現し始めるところでは、スピン秩序に取って代わって電荷秩序が現れることを突き止めました。電荷秩序の臨界温度はスピン秩序温度の連続的な延伸であり、キャリア濃度の増加とともに減少する。この発見は、超伝導発現の機構を考える上で重要な手がかりを与えるものと期待されます。なお、本研究は、中国科学院物理研究所や米国立強磁場研究所の所員らと協力して遂行したものです。

<今後の発展>

本研究成果を高温超伝導体のモデルとして、理論的アプローチからの高温超伝導現象への理解が進むことが期待されます。さらに、実験的アプローチと協業が進むことで、高温超伝導発現メカニズム解明に向けて新たな発展がもたらされると期待されます。

<論文情報等>

論文名：Charge-density-wave order takes over antiferromagnetism in $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$ superconductors

掲載誌：Nature Communications

著者：S. Kawasaki, Z. Li, M. Kitahashi, C. T. Lin, P. L. Kuhns, A. P. Reyes, and Guo-qing Zheng



<補足・用語説明>

[1] 電荷密度波秩序

電荷の集団（電荷密度）が空間に特定の周期をもって濃淡を作った状態（図2 c 参照）。液体表面の波動のように、集団で波の状態で電気伝導を担う事が出来る。秩序＝周期的に並んだ状態。普通の金属では、クーロン斥力のために電荷がお互い避け合うので、電荷密度波秩序が現れることは稀である。

[2] スピン

負の電荷と共に電子が持つ固有の物理量、磁石の源。矢印で表現する。スピン同士の間には磁石と同様の力が働くので、図2aのように周期的に整列した状態（反平行なら反強磁性、平行なら強磁性と呼ぶ）を作ることがある。磁石の性質を持つので外部からの磁場に応答する。原子核が持つスピンの外部磁場に対する応答を測定するのが NMR 法や MRI の撮像の原理である。

[3] 電荷

電気量の素。電子は固有の性質として負電荷を持っている。負電荷の流れが電流である。

[4] 国際共同研究グループ

実験に用いたビスマス系高温超伝導体 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$) は、マックスプランク研究所（ドイツ・シュツットガルト市）の結晶育成グループから提供されました。また、実験室レベルを超えるような強磁場（14 万ガウス以上）の実験は、中国科学院物理研究所や米国立強磁場研究所の現地研究員と協力して行いました。

[5] ビスマス系銅酸化物高温超伝導体 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$)

結晶構造中に銅と酸素で構成される二次元面を持つ物質の総称を銅酸化物高温超伝導体と呼びます。図1はビスマス系銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$ の結晶構造です。図2のように、もともと電気を通さないモット絶縁体（反強磁性体）に元素置換を行い、電子や空孔（電気を運ぶもの）を加えると、絶縁体が金属化し、さらに高温超伝導状態が発現します。図3に示すように、このモット絶縁体から超伝導に変化する過程で、電荷密度波（図2(c)。電荷密度が決まった周期で空間的に変調している状態）が生じることを新たに発見しました。

[6] 核磁気共鳴（NMR）法

原子核スピンを通して物質の電子状態を調べる実験手法。医療用 MRI の撮像原理と同じ。

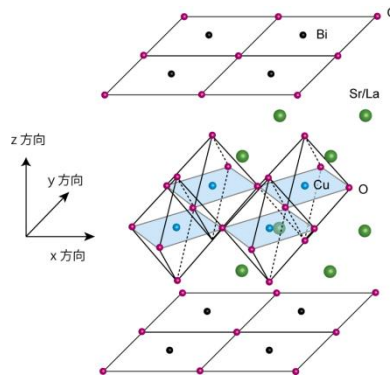


図 1 : $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$ の結晶構造。銅酸化物において、高温超伝導は、銅（青丸）と酸素（赤丸）で構成される CuO_2 面（水色）で生じることが知られています。

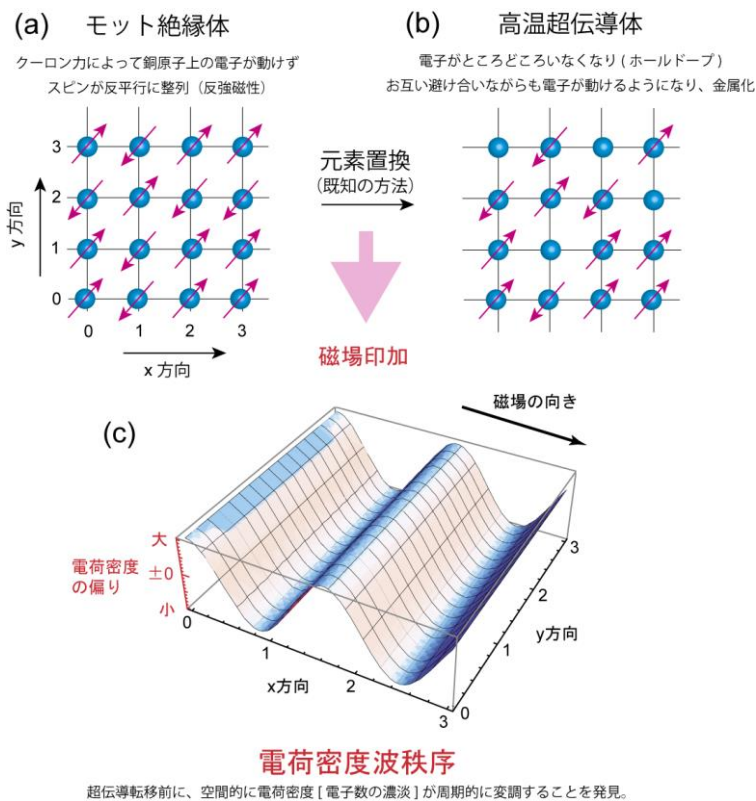


図 2 : (a) CuO_2 面で実現する、モット絶縁体。銅原子[青丸]上に電子スピン[赤矢印]が局在した様子を模式的に表しています。(b) モット絶縁体へ元素置換により空孔を導入（ドーピング）すると、電気伝導が生じ、高温超伝導が発現することが知られています。(c) 元素置換により超伝導が生じる過程において強磁場を加えると、超伝導転移前に電荷密度波秩序が生じることを発見しました。今回明らかになった CuO_2 面で生じる電荷密度波の空間変調の様子を模式図で示しています。

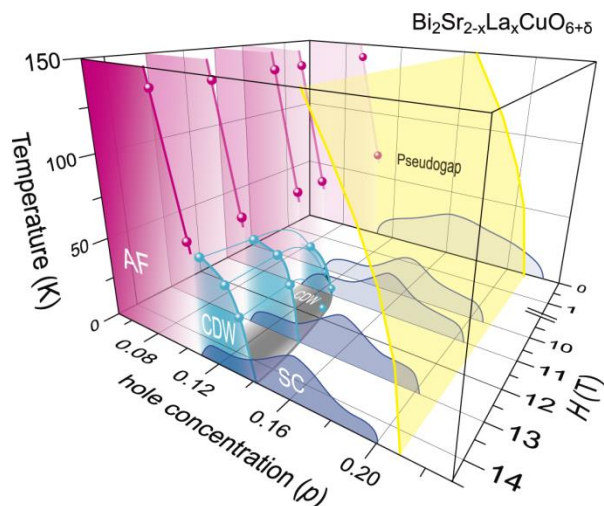


図3：本研究で得られた相図（当該論文より）。モット絶縁体に対し、元素置換と磁場印加を行うと、超伝導転移前に異常金属相「擬ギャップ(pseudogap)」が表れ、低温で「反強磁性(AF)」、「電荷密度波(CDW)」、「超伝導(SC)」が順番に表れます。今回、擬ギャップ温度と電荷秩序の転移温度が比例関係にあることも明らかになり、擬ギャップの起源解明にも繋がりをうる成果となりました。

<お問い合わせ>

岡山大学大学院自然科学研究科

数理物理学専攻（理学部物理学科）

准教授 川崎慎司

（電話番号）086-251-7803

（FAX番号）086-251-7830 [事務室]

（電子メール）zheng@psun.phys.okayama-u.ac.jp [鄭教授]