



## 高温超伝導の立役者、決定的証拠を観測

～ 電子とのやりとりの全容を解明へ ～

### 【要点】

- 高温超伝導を担う電子が、格子振動と最も強く結合している証拠をとらえました。
- 高温超伝導に関与する複数の格子振動の全容を解明し、長年の論争を解決しました。
- 無損失送電線などに用いられる高温超伝導体の探索指針を与えると期待されます。

### 【概要】

広島大学放射光科学研究センターの井野明洋特任准教授と、大阪府立大学大学院工学研究科の安齋太陽助教、東京大学大学院理学系研究科の内田慎一名誉教授らを中心とする研究グループは、広島大学放射光科学研究センターの高輝度シンクロトロン放射光（※1）と世界最高水準の高分解能・角度分解光電子分光（※2）装置を用いることで、高温超伝導発現の鍵を握る「立役者」の決定的証拠を、とらえることに成功しました。

超伝導現象を演じているのは電子の集団です。しかし、高温超伝導体に関しては、電子の背後で暗躍している「立役者」の正体をめぐって、激しい論争が続いていました。今回、銅酸化物高温超伝導体（※3）への正孔添加量を極度に増やすことで、電子と「立役者」のやりとりの痕跡をくまなく観測することに成功しました。その痕跡が、格子振動の分布と完全に一致したため、電子の背後にいる「立役者」が格子振動と特定され、高温超伝導の謎の核心部分が解明されました。この知見は、さらなる高温超伝導体の探索を導く有力な手がかりを与えるものと期待されます。

この成果は、英国 Nature Publishing Group のオンライン科学雑誌『*Scientific Reports*』の7巻に掲載される予定です。本研究は、放射光科学研究センターの共同研究委員会により採択された研究課題のもと実験が行われました。また、本研究は、日本科学協会の笹川科学研究助成による助成を受けて実施されました。

## 【論文情報】

題 目：A New Landscape of Multiple Dispersion Kinks in a High- $T_c$  Cuprate Superconductor

著 者：H. Anzai, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Ishikado, K. Fujita, S. Ishida, S. Uchida, and A. Ino

掲 載 誌：Scientific Reports（出版元：Nature Publishing Group）

DOI 番号：10.1038/s41598-017-04983-0

U R L：https://www.nature.com/articles/s41598-017-04983-0

掲載予定日：2017年7月6日、日本時間 18:00（英国時間 10:00）

## 【研究の背景】

超伝導体を用いると、電気抵抗によるエネルギー損失をゼロにすることができます。超伝導転移温度が  $-195.8\text{ }^\circ\text{C}$  の液体窒素温度を上回ると冷却材の費用が大幅に削減されます。このため、高い超伝導転移温度をもつ銅酸化物（※3）を、無損失の超伝導送電線や超強力な超伝導電磁石の材料として実用化する研究が進められています。電力エネルギー・エレクトロニクス・磁気浮上鉄道の分野における革新を担う根幹技術として、高温超伝導への期待が高まっていますが、最大の課題として残されているのが、高温超伝導を担う「立役者」の特定です。

鉛やアルミニウムでは、反発しあう電子の間を格子振動が仲介することで、超伝導が発現します。しかし、銅酸化物における高温超伝導を、格子振動で支えることができるのか、疑問が生じていました。そこで、電子が何らかの振動と強くやりとりしている痕跡が、電子の速度の変化として観測されたため、その正体の特定に向けて、多くの研究が行われてきました。候補として残されたのが、磁気的な共鳴振動と、酸素座屈型の格子振動（図参照）ですが、両者のエネルギーが近いために特定が難しく、激しい論争が15年以上も続いていました。

## 【成果の内容】

研究グループは、広島大学放射光科学研究センターにおいて、高輝度のシンクロトロン放射光（※1）と世界最高レベルの高分解能・角度分解光電子分光（※2）装置を組み合わせ、ビスマス系銅酸化物高温超伝導体（ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 、Bi2212）（※3）の中の電子の速度を観測し、電子の背後にいる「立役者」の決定的な証拠を捉えることに成功しました。

まず、やりとりの痕跡とされる電子の速度の変化を精密に観測し、細い構造を分離することに成功しました。そして、極度に正孔添加を行ったところ、それぞれの構造のエネルギーが移動して視界が広がり、やりとりの痕跡の全貌が姿を現しました。電子の速度における構造の強さとエネルギーの分布が、格子振動の分布と一致したことから、電子と最も強く結びついているのが格子振動であることが判明しました。

### 【意義と波及効果】

本研究により、電子の背後の「立役者」をめぐる長年の論争が解決され、電子と格子振動の間のやりとりの様子が、鮮明に描き出されました。本成果は、高温超伝導の研究を次の段階に導く突破口として、基礎および開発研究への波及効果が見込まれます。今回得られた知見は、電子と格子振動のやりとりの観点から、さらなる高温超伝導体の探索を導く指針を与え、高温超伝導体を用いた無損失送電線や超強力電磁石の材料開発を促進するものと期待されます。

### 【参考資料】

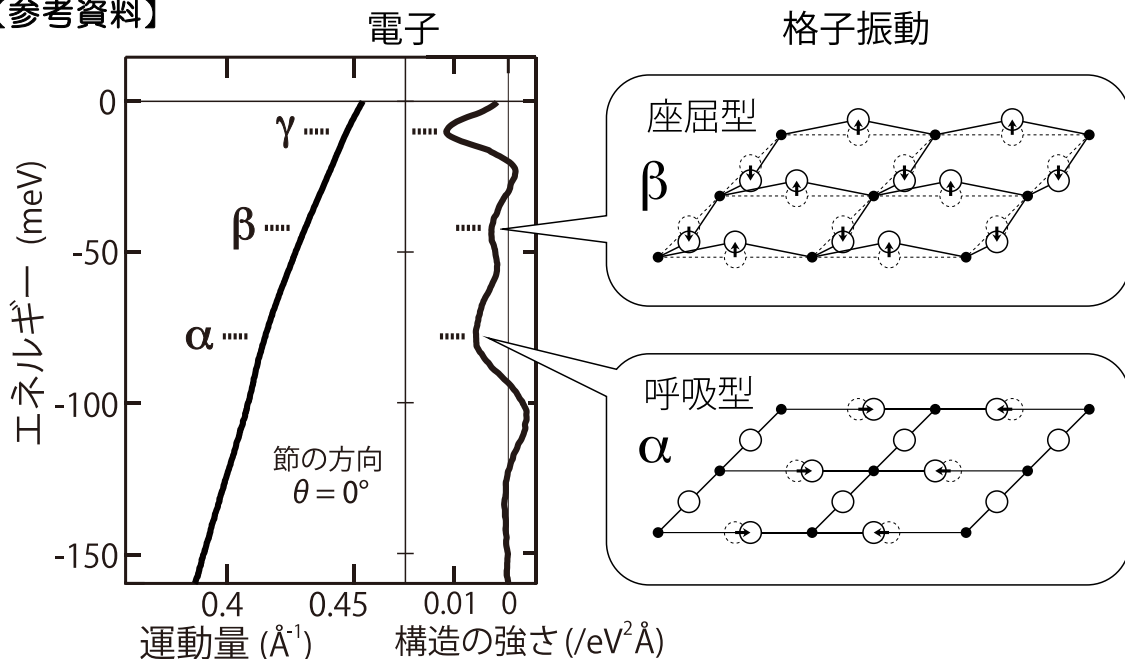


図 (左) 電子のエネルギーと運動量の観測。傾きが電子の速度を表す。  
 (中) 電子の速度の変化。微細構造が 78、42、10 meV に検出された。  
 (右) 電子と結合している格子振動の種類。黒丸が銅原子で、白丸が酸素原子。

## 【用語説明】

(※1)「シンクロトロン放射光」とは

光の速度（地球を一秒間に7週半する速さ）までに電子を加速し、磁石の力でその進行方向を曲げると、進行方向に沿って強力な光が放出される。これがシンクロトロン放射光である。自然界では星雲の中に放射光を見つける事ができるが、地上では専用の加速器が必要となる。シンクロトロン放射光は、人類が手に入れた最も強力な光で「夢の光」とも呼ばれている。

(※2)「角度分解光電子分光」とは

物質に光を照射すると、光電効果により、物質内部の電子が表面をのりこえて外部に放出される。この光電子のエネルギーと放出角を測定し、エネルギー保存則と運動量保存則を利用して、物質内部の電子のエネルギーと運動量を決定する実験手法を、角度分解光電子分光と呼ぶ。電子のエネルギーを、運動量で微分すると、電子の速度が得られる。角度分解光電子分光の高分解能化が進展し、電子が他の振動とエネルギーや運動量をやりとりする様子が、電子速度のわずかな段差として観測されるようになった。

(※3)「銅酸化物高温超伝導体」とは

1986年に、銅と酸素を主成分とする銅酸化物超伝導体が発見された。超伝導転移温度が液体窒素温度  $-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  を上回る物質として、ビスマス系、イットリウム系、水銀系などの銅酸化物が発見されており、「銅酸化物高温超伝導体」と呼ばれている。現在、無損失送電線や超強力電磁石の材料として、実用化の研究が進められている。銅酸化物系は、正孔添加量によって、超伝導転移温度が大幅に変化するが、今回は、極度に正孔添加を行った試料にまで研究対象を広げることで、決定的な証拠をとらえることに成功した。

## 【お問い合わせ先】

<研究に関すること>

広島大学 放射光科学研究センター 特任准教授 井野 明洋

〒739-0046 広島県東広島市鏡山2-313

Tel : 082-424-6293 Fax : 082-424-6294

E-mail : ino [at] hirosshima-u.ac.jp

※ [at] の部分を@と差し替えてください。

大阪府立大学 大学院工学研究科 助教 安齋 太陽  
〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1 番 1 号  
Tel/Fax : 072-254-9489  
E-mail : anzai [at] ms.osakafu-u.ac.jp  
※ [at] の部分を@と差し替えてください。

<報道担当(記者説明会に関すること)>

広島大学 財務・総務室 広報部 広報グループ  
〒739-8511 広島県東広島市鏡山 1-3-2  
Tel : 082-424-6762 Fax : 082-424-6040  
E-mail : koho [at] office.hiroshima-u.ac.jp  
※ [at] の部分を@と差し替えてください。

大阪府立大学 理事長室 広報課  
〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1 番 1 号  
Tel : 072-254-9103 (直通) Fax : 072-254-9129  
E-mail : koho\_prmagazine [at] ml.osakafu-u.ac.jp  
※ [at] の部分を@と差し替えてください。