



## 銅酸化物の超伝導はなぜ高温か？

ー 計算シミュレーションにより常識とは異なる、隠れていた複合粒子を発見 ー

### 1. 発表者：

酒井 志朗（東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 助教 \*研究当時）

（現 理化学研究所 創発物性科学研究センター 研究員）

今田 正俊（東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授）

### 2. 発表のポイント：

◆高温超伝導状態の数値シミュレーションにより、電子が示す異常な振る舞いを発見し、この異常なふるまいが、銅酸化物超伝導が高温になる直接の原因であることを突き止めました。

◆異常な振る舞いの起源が、従来の超伝導の常識とは異なるタイプの粒子（複合粒子）によるものであり、電子がもとの電子に近い「陽」の状態と、「陰」である複合粒子状態を行き来することが、超伝導を高温にする直接の原因であることが分かりました。

◆この超伝導を高温にする原因の新たな発見は、今後の高温超伝導体の設計の新境地を開拓する指針となります。

### 3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の酒井志朗助教（研究当時、現：理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター研究員）、同専攻の今田正俊教授、フランス・パリ南大学固体物理学研究所のマルチェロ・チベリ助教授の国際共同研究グループは、銅酸化物高温超伝導体の超伝導が高温で起きる原因となる新しいメカニズムを発見しました。

ある種の銅の酸化物は、他の物質に比べ常圧でも非常に高い温度で超伝導を示すことが知られていますが、その仕組みは未だに解明されていません。特に、これまで数多くの理論が提案されてきましたが、それらの多くの理論に共通なのは、電子の集団の中からボソン（注1）と呼ばれるタイプの複合粒子が生じ、それが超伝導の原因になるというシナリオを描いていることです。

本研究では、電子の相互作用効果を高精度に取り扱うことのできる最新の理論に基づいて計算シミュレーションを行い、上述のシナリオでは説明のつかない電子の振る舞いを発見しました。本研究グループは、その振る舞いを詳しく調べ、電子の集団からボソ

ンとは異なるフェルミオン（注1）と呼ばれるタイプの複合粒子が生じていれば、計算シミュレーション結果をよく説明することができる、ということを解明しました。この結果は従来の常識を覆し、高温超伝導の機構解明に新たな局面を切り開く成果と言えます。

本研究成果は、米国物理学会の速報誌「Physical Review Letters」のオンライン版（米国東部時間2月4日（木）掲載予定）に掲載されます。

#### 4. 発表内容：

##### ① 研究の背景

超伝導は物質中の電子の集団が低温で引き起こす現象で、電気抵抗がゼロになるなどの際立った特徴を持ちます。そのため、省エネルギー・高効率といった観点から社会へ貢献するテクノロジーとして、その基礎的性質や応用法が世界中で研究されています。ただ、超伝導は通常非常に低い温度（典型的には $-260^{\circ}\text{C}$ 以下）でのみ現れるため、「使いにくい」一面があります。

1986年にベドノルツとミュラーは、ある種の銅の酸化物が他の物質と比較して、それまで知られていなかったほど高い温度で超伝導を示すことを発見しました。その後、関連構造を持つ、さらに高温の超伝導物質が続々と発見され、現在、その最高温度は $-110^{\circ}\text{C}$ 程度に達しています。この銅の酸化物群がなぜこれほど高い温度で超伝導を示すのか、発見以来30年にわたって膨大な数の研究が行われてきましたが、そのメカニズムには多くの謎が残されたままです。

ただ、部分的に解明されてきたことは沢山あります。例えば、銅酸化物超伝導体でも他の超伝導体と同様に、2つの電子がペアを組んで運動していることです。通常、2つの電子の間には電氣的に反発する力が働き、バラバラになってしまいますから、ペアを組むには、これとは別の2つの電子を引き寄せる力（引力）が必要です。普通の超伝導体ではこの引力は、結晶中の原子核の振動を表すフォノンと呼ばれる粒子が仲介役を果たすことで生じます。一方、銅酸化物超伝導体では、フォノンの効果は小さいと考えられ、何らかの理由で電子に働く強い反発力が引力に転換するしくみがあることに原因があるだろうと推測されています。今のところ、このような電子由来の機構に銅酸化物の超伝導を説明できる決定的な理論はありませんが、多くの理論が、フォノンに類似した、偶数個の電子で作られる粒子（ボソンの一種）が引力を仲立ちしていると推測しています。

## ② 成果の内容

本研究グループは、銅酸化物の電子状態をよく表すと考えられている理論模型について、電子間相互作用の効果を精度よく取り込む最新の理論に基づいて、数値計算シミュレーションを行いました。特に、電子間相互作用の効果が電子のもつエネルギーによって、どのように違うか、という点に注目して研究を行いました。これまでも、超伝導よりも高温の金属状態において同様の観点からの研究がなされ、相互作用の効果が特別強くなるエネルギーがあることが分かっていました（相互作用効果が特別強くなるため、このエネルギーに電子は存在しにくくなり、この存在しにくいエネルギー領域が「擬ギャップ」と呼ばれていました）。そこで、今回理論手法を改良し、超伝導状態の電子について詳しく調べました。その結果、金属状態で特別強い相互作用効果を感じていた（特徴的なエネルギーをもった）電子が、超伝導状態になると突如ほとんど相互作用を感じなくなる、という不思議な振る舞いを見出しました。この振る舞いは、従来のようなボソンが引力を生む理論では説明できません。

そこで本研究グループは、偶数個の電子ではなく奇数個の電子で作られる粒子[フェルミオン（注1）の一種（以下、複合フェルミオンと呼ぶ。）]が存在しているのではないかという仮説を立て、その場合の電子の振る舞いを検証しました。その結果、上に述べた不思議な振る舞いを含め、数値シミュレーション結果を驚くほど良く再現することができました。この複合フェルミオンは電子のようなもともとの素粒子ではなく、電子間に働く強い反発相互作用によって、多数の電子から固体中で創り出されると考えられます。また、イメージ図にあるように電子が複合フェルミオン状態との間を行き来することで、超伝導を高温まで安定化していることが分かりました。（図1）

## ③ 今後の展望

これまでの高温超伝導研究では、電子の集団からボソンが生じ、それが直接高温超伝導の原因となるというシナリオが常識とされ、そのボソンを特定しコントロールすることでより高温の超伝導体を生み出すというロードマップが描かれていました。本研究はその常識を覆し、複合フェルミオンの存在が高温超伝導を引き起こしていることを数値シミュレーションによって示しました。今後は、複合フェルミオンを隠れた存在から引きずり出すために、観測できる実験を考案し、この複合粒子が存在するという理論的予言を実験でも実証するとともに、鉄系超伝導体（注2）など他の高温超伝導物質との関連を解明することが望まれます。さらに、より高温の超伝導体を生み出すには、この複合フェルミオンを特定しコントロールする必要があります。これは、高温超伝導体の設計に新たな指針を与えるものです。

本研究は、日本学術振興会及び文部科学省の科研費補助金 (No. 26800179, 22124010, 22340090)、HPCI 戦略プログラム (SPIRE)、計算物質科学イニシアティブ (CMSI) および理化学研究所計算科学研究機構のスーパーコンピュータ「京」HPCI システム利用研究課題 (課題番号: hp120043, hp120283, hp130007, hp140215) の助成を受け行われました。

## 5. 発表雑誌:

雑誌名: 「Physical Review Letters」

URL: <http://journals.aps.org/prl/>

(オンライン版: 米国東部時間 2 月 4 日 (木) 掲載予定)

論文タイトル: Hidden Fermionic Excitation Boosting High-Temperature Superconductivity in Cuprates

著者: Shiro Sakai\*, Marcello Civelli, and Masatoshi Imada\*

DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.057003>

アブストラクト URL:

<http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.057003>

## 6. 問い合わせ先:

<研究に関すること>

理化学研究所 創発物性科学研究センター

研究員 酒井 志朗 (さかい しろう):

東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻

教授 今田 正俊 (いまだ まさとし):

<報道担当>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

理化学研究所 広報室 報道担当

## 7. 用語解説:

(注1) ボソン、フェルミオン: 素粒子はその統計的性質に従ってボソンとフェルミオ

ンに分類される。ボソンの代表例としては光子、フェルミオンの代表例は電子が挙げられる。フェルミオンを偶数個集めて一つの粒子とみなすとそれはボソンの性質（エネルギー的に同じ位置をとることができ、重なりあう状態）を示し、奇数個集めるとそれはフェルミオンの性質（エネルギー的に同じ位置をとることができない状態）を示す。

（注2）鉄系超伝導体：鉄を含む化合物で、常圧化では銅酸化物に次いで高い温度で超伝導を示す物質群。2008年に東京工業大学の細野秀雄教授のグループによって最初に発見された。

## 8. 添付資料：

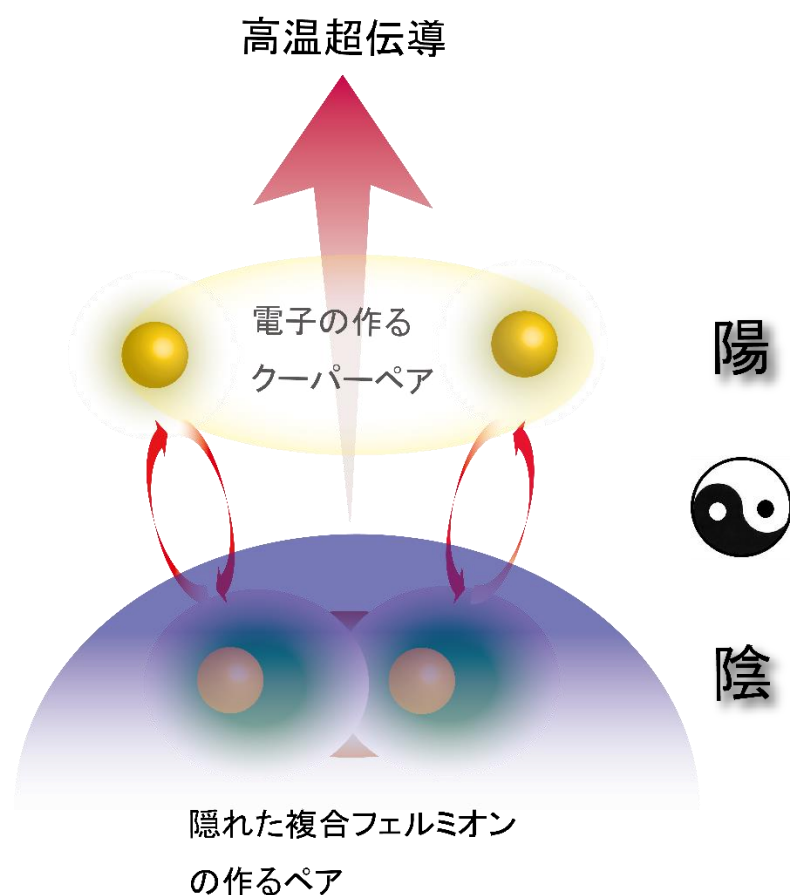


図1：高温超伝導メカニズムのイメージ図。銅酸化物中の電子は周囲の状況（近くに他の電子がいるかいないか）に応じて、同じ電子があたかも異なる粒子のように振る舞う。一つは結晶中を動き回る準粒子とよばれる状態で、電子が他の電子の作る薄着の衣をまとった状態である。もう一つが本研究で見出された隠れた複合フェルミオン状態であり、電子が厚着をして他の電子の創り出す落とし穴に捕われるために、もとの電子とは異なる性格を持つ。すなわち複合フェルミオンは宇宙のダークマターのよう、今ある実験手段ではよく見えない、捕われて隠れた存在である。いわば前者（準

粒子)が中国古代思想における「陽」であり、後者(複合フェルミオン)は「陰」のような存在である。電子はこの2つの状態の間を行ったり来たりする。超伝導になると、それぞれの状態にある電子(準粒子と複合フェルミオン)はペアを作る。超伝導が高温でも安定であるためには、準粒子がペアを強く組む必要がある。本研究は、準粒子の作るペア(クーパーペア)が、隠れた複合フェルミオン状態との間を行き来することで格段に強められることを見出した。