

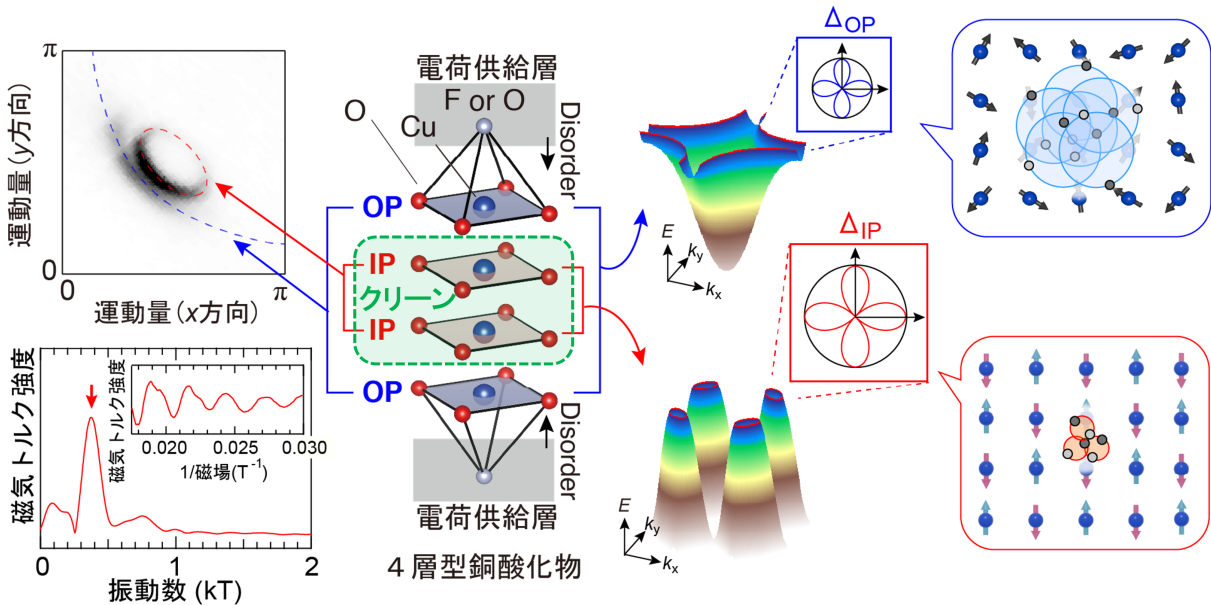
PRESS RELEASE

東京大学
東京理科大学
上智大学

少数なのに強く結びつく高温超伝導電子を発見

発表のポイント

- ◆ 銅酸化物高温超伝導体の内部に、構造的・電子的な乱れが極めて少ない理想的な超伝導層を見出し、そこで現れる特異な超伝導電子の性質を解明しました。
- ◆ 希薄なキャリアが、反強磁性秩序を背景として互いに強く結びつき、分子のように局在した電子対を形成しながら高温超伝導を発現することを見出しました。
- ◆ 乱れの影響を受けた超伝導層の実験と、理想的な超伝導層を仮定する理論との間に存在していた従来研究の矛盾を埋め、実験と理論を同一の舞台で比較できる道を拓きました。



4枚の超伝導面を有する銅酸化物高温超伝導体では、
反強磁性秩序を背後とする少数キャリアが互いに強く結びつき、高い超伝導温度を実現する。

発表概要

東京大学物性研究所の Jeong Junhyeok 大学院生（同大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程）、近藤猛准教授の研究グループは、東京理科大学先進工学研究科電子システム工学専攻の榎本大和大学院生（当時）、同大学先進工学部電子システム工学科の常盤和靖教授、東京大学物性研究所の小濱芳允准教授、上智大学理工学部機能創造理工学科の酒井志朗准教授、東京理科大学先進工学部物理工学科の遠山貴巳教授らの協力のもと、4層型銅酸化物高温超伝導体（注1、図1右）の内部に存在する「クリーンな超伝導層」において、伝導を担う電子の数が極め

て少ないにもかかわらず、電子同士が極めて強く結びつくという、常識とは異なる現象を観測しました。

研究グループは、単位胞内に超伝導層を4枚持つ4層型銅酸化物高温超伝導体に内在する、乱れから守られた極めて綺麗な超伝導層に着目しました。角度分解光電子分光（注2）測定と量子振動（注3）測定を行うことで、その超伝導層では、反強磁性秩序（注4）を伴いフェルミ面（注5）が極端に小さくなった「小さなフェルミポケット」と呼ばれる、キャリア数が極めて少ない状態が形成されていることを観測しました。驚くべきことに、その小さなフェルミポケットを担う電子同士が、あらゆる超伝導体の中でも最大級の強さで結びついていることが分かりました。これは、通常の超伝導理論（BCS理論（注6））の範囲を超え、電子対が分子のように局在するBEC的な超伝導状態（注7）へ近づいていることを示しています。

本成果は、高温超伝導の本質が、「キャリアが多い金属状態」ではなく、「キャリアが少なく、強く結びついた量子状態」に潜んでいる可能性を示すものであり、高温超伝導発現機構の理解を大きく前進させる成果です。

本成果は、*Nature Communications* 誌（現地時間6月3日）に掲載されました。

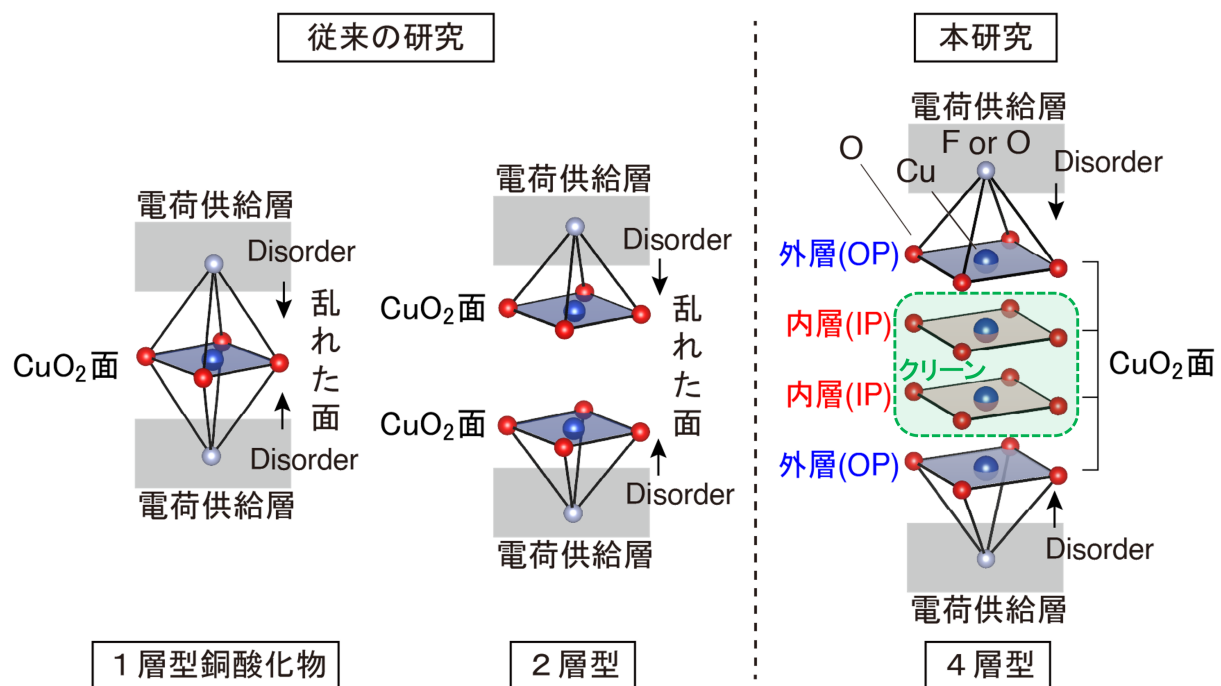


図1：従来研究されてきた銅酸化物高温超伝導体と、本研究で対象とした銅酸化物高温超伝導体の違い。従来主に研究されてきた1層型・2層型銅酸化物高温超伝導体（左図）では、超伝導を担う超伝導層（ CuO_2 面）が電荷供給層と直接接しているため、電荷供給層内の元素置換・酸素欠損に伴う乱れ（disorder）の影響を強く受ける。一方、本研究で対象とした4層型銅酸化物高温超伝導体（右図）では、外側の超伝導層は電荷供給層由来の乱れを受ける一方、内側の超伝導層は外側の超伝導層によって保護されることで、乱れの無い理想的な「クリーンな超伝導層」が実現している。

発表内容

〈研究の背景〉

超伝導とは、電気抵抗が完全に消失する量子現象です。この状態では、2つの電子がペアを組み、物質全体で一つの巨大な量子状態を形成しています(図2)。通常の超伝導体では、電子は非常に多く存在しており、電子対は広く重なり合った「ゆるいペア」として振る舞います。この状態はBCS理論によってよく説明されます。一方、電子の数が減少し、かつ電子同士の結合が強くなると、電子対は空間的に小さくまとまり、分子のような粒子として凝縮するBEC状態へと近づきます。一般的には、電子の数が減るとペアの結合力も弱まるため、BEC状態は極めて異常な状態であると考えられています。

では、高温超伝導体において、BEC状態に近い超伝導状態を形成できるのでしょうか。約40年前に銅酸化物高温超伝導体が発見されて以来、この問いは、高温超伝導の発現機構を解明する上で極めて重要な課題として注目されてきましたが、その実現可能性は、これまで未解明のままでした。

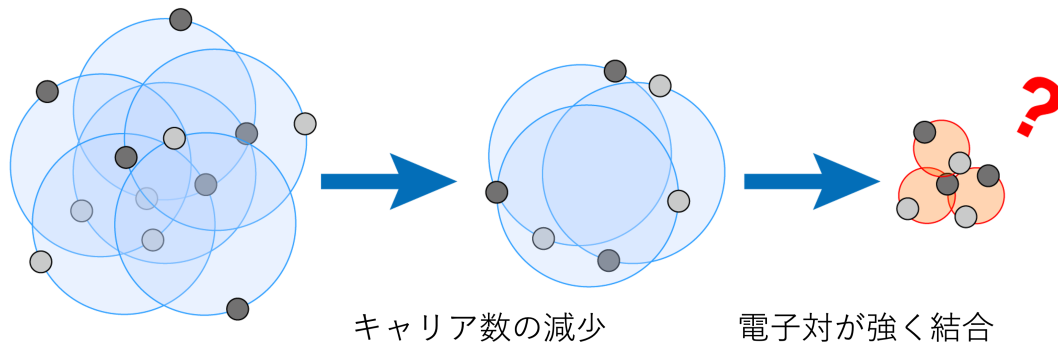


図2：キャリア数の減少に伴う超伝導状態の変化。

超伝導は、電子対が集团的に凝縮することで発現する。左図はキャリア数が多い通常のBCS状態を示しており、電子対(青円)は空間的に大きく広がり、互いに大きく重なり合っている。中央図では、キャリア数の減少に伴い、電子対の重なりが弱まり始める。通常はこの過程で超伝導も弱くなると考えられる。しかし、BEC的な強結合超伝導状態では、電子対が強く結合し、分子のように局在した状態(右図、赤円)が形成される。銅酸化物高温超伝導体において、このような状態が実現しうるかどうかは、長年大きな論争となってきた。

〈研究の内容〉

銅酸化物高温超伝導体において、これまで主に研究されてきた物質は、超伝導層を単位胞内に1枚または2枚形成する1層型・2層型の結晶でした(図1左)。高温超伝導は、電荷供給層から超伝導層にキャリアが注入されることで発現します。しかし、この状況では、電荷供給層と超伝導層が直接接しているため、電荷供給層内の元素置換や酸素欠損で生じるポテンシャルの乱れが、超伝導層に直接影響してしまうことが指摘されていました。この問題を解決する物質として、研究グループは、単位胞内に超伝導層を4枚形成する4層型銅酸化物高温超伝導体 $\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_8(\text{F},\text{O})_2$ に着目しました(図1右)。この物質では、電荷供給層と直接接触する外側の超伝導層と電荷供給層と直接接触しない内側の超伝導層の2種類の超伝導層があります。外側の超伝導層は、従来研究されてきた1層型・2層型の結晶と同じく、電荷供給層からの乱れの入った超伝導層になります。一方、電荷供給層との直接接触を避けた内側の超伝導層では、外側の超伝導層によって乱れが遮蔽されることで、極めてクリーンで理想的な超伝導層が実現

します。本研究では、この理想的な電子状態を利用することで、高温超伝導の本質的理解に挑みました。

角度分解光電子分光測定および量子振動測定を行うことで、本研究グループは、この内側の超伝導層において、反強磁性秩序を背景とした「小さなフェルミポケット」が形成されていることを明らかにしました（図3）。これは、超伝導を担うキャリアの数が、通常の大なフェルミ面の場合と比べて大幅に減少していることを意味します。外側の超伝導層では、従来の1層型・2層型の結晶と同じく、大きなフェルミ面が形成されることも確認しました。さらに驚くべきことに、このキャリア数の少ない小さなフェルミポケット上で、巨大な超伝導ギャップが開いていることを発見しました（図4）。その超伝導ギャップは、これまで報告されてきた超伝導体の中でも最大級の大きさを示しました。これら2つの条件が揃ったことで、BEC状態に近い強結合超伝導状態が実現していることが分かりました。

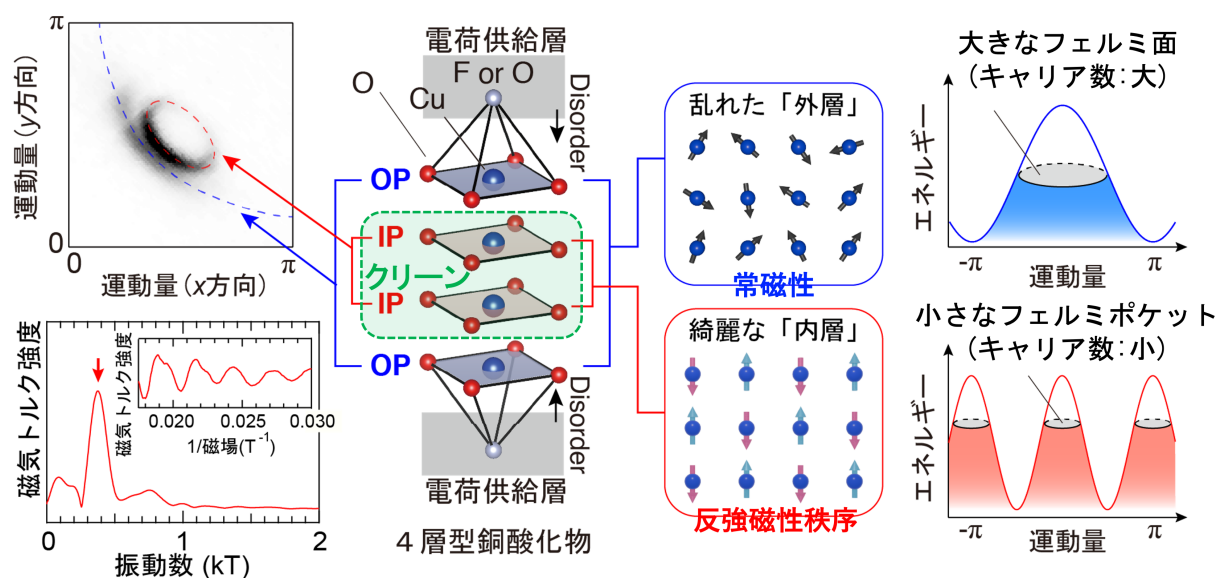


図3：4層型銅酸化物高温超伝導体における内側と外側の超伝導層におけるフェルミ面。

右図に、それぞれの層で形成されるフェルミ面の違いを示しており、乱れた外層ではキャリア数の多い大きなフェルミ面が現れる一方、クリーンな内層では、反強磁性を背景としたキャリア数の少ない小さなフェルミポケットが形成される。左上図は角度分解光電子分光（ARPES）によって観測された小さなフェルミポケット、左下図は量子振動測定によって観測された小さなフェルミ面に対応する振動成分を示している。

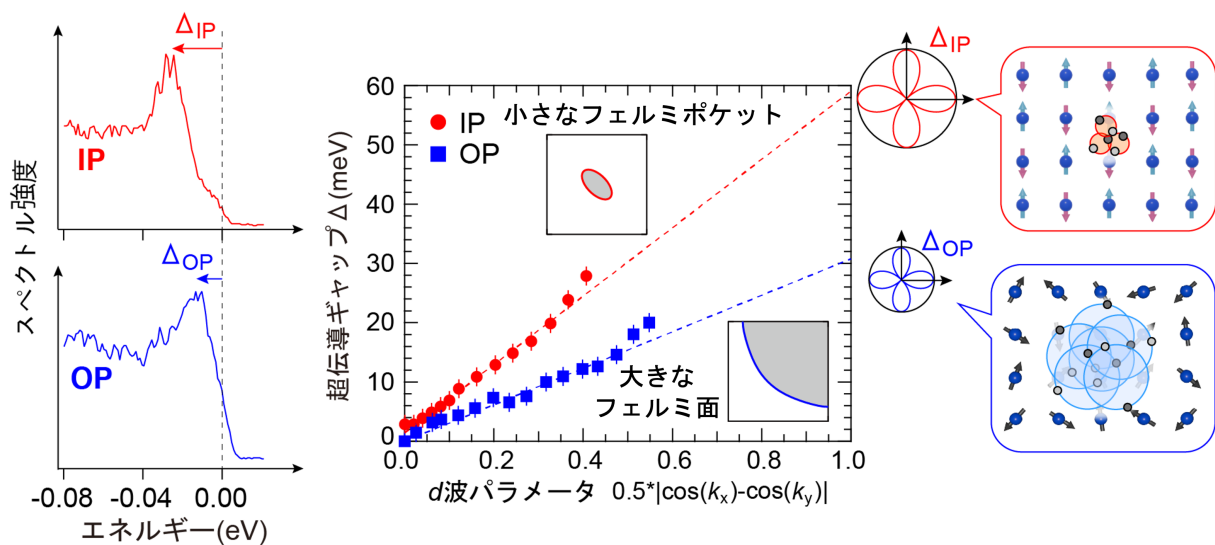


図4：4層型銅酸化物高温超伝導体における内側と外側の超伝導層における超伝導ギャップ。

左図は、角度分解光電子分光（ARPES）によって観測されたエネルギースペクトルを示しており、内側の超伝導層では外側の超伝導層よりも大きな超伝導ギャップ Δ_{IP} が形成されていることが分かる。中央図は超伝導ギャップの運動量依存性を示しており、内側の超伝導層 IP では、小さなフェルミ面を持ちながら巨大な超伝導ギャップが形成されている。一方、外側の超伝導層 OP では、大きなフェルミ面を持つ通常の銅酸化物高温超伝導体に近い振舞いが観測される。右図は、それぞれの電子状態を実空間で模式的に示している。クリーンな内側の超伝導層では、反強磁性秩序を背景として、局所的に強く束縛された電子対が形成されている。一方、乱れた外側の超伝導層では、常磁性を背景として、空間的に大きく広がって互いに重なった BCS 型電子対が形成されていることが示唆される。

4層型銅酸化物高温超伝導体では、乱れた外層と綺麗な内層を同時に内包しているため、その両者を比較することができます。乱れた外層では、反強磁性秩序を背景とせず、超伝導を担うキャリア数が多いことを反映して、大きなフェルミ面が観測されました（図3）。また、超伝導ギャップの大きさは、内側の超伝導層の小さなフェルミポケットで開く超伝導ギャップより小さいことも分かりました（図4）。つまり、理想的な超伝導層では、従来の乱れを含む超伝導層とは本質的に異なる超伝導状態が実現していることを明らかにしました。また、詳細な観察から、キャリア数が少ないにもかかわらず、内側の超伝導層がこの結晶の高い超伝導転移温度を決めていることも明らかにしました。

本成果は、「キャリア数が少なくなると超伝導は弱くなる」という従来の常識を覆し、銅酸化物高温超伝導体において BEC 状態に近い強結合超伝導状態が実現しうることを明確に示したものです。特に、小さなフェルミポケットと巨大な超伝導ギャップの両立を直接観測したことは、高温超伝導発現機構の理解を大きく前進させる極めて重要な発見です。さらに本研究は、「反強磁性」と「超伝導」が単純に対立するのではなく、むしろ密接に共存し、両者の関係が超伝導状態の形成に深く関与している可能性を示しており、高温超伝導の起源を理解するための新たな指針を与える成果として、今後の理論研究に大きな影響を与えることが期待されます。

〈今後の展望〉

本研究によって、従来の銅酸化物高温超伝導研究で大きな課題となっていた「乱れ」の影響を受けない、理想的な「クリーンな超伝導層」を直接研究できる道が拓かれました。これまでの高温超伝導研究では、電荷供給層由来の乱れを必然的に含む超伝導層を対象とせざるを得ず、理想的な超伝導状態そのものを実験的に観測することは極めて困難でした。一方、理論研究では、乱れない理想的な電子状態を前提として高温超伝導の発現機構が議論されてきました。そのため、実験と理論の間には長年大きな隔たりが存在していました。

本研究は、理想的な「クリーンな超伝導層」を実験的に直接観測することで、この長年のギャップを埋め、実験と理論を同一の舞台で比較できる新しい研究領域を切り拓く成果となりました。さらに本成果は、高温超伝導の本質が、従来考えられてきた単純な金属状態ではなく、強く関連した量子状態に潜んでいる可能性を示すものであり、高温超伝導発現機構の解明へ向けた今後の研究を大きく加速させることが期待されます。

発表者

東京大学物性研究所

附属極限コヒーレント光科学研究センター

Jeong Junhyeok 大学院生（東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 博士課程）

近藤 猛 准教授（兼：東京大学トランススケール量子科学国際連携研究機構 准教授）

附属国際超強磁場科学研究施設

小濱 芳允 准教授（兼：東京大学トランススケール量子科学国際連携研究機構 准教授）

東京理科大学

先進工学部 電子システム工学科

常盤 和靖 教授

先進工学部 物理工学科

遠山 貴巳 教授

上智大学 理工学部 機能創造理工学科

酒井 志朗 准教授

論文情報

〈雑誌〉 Nature Communications
〈題名〉 BCS-BEC crossover driven by small Fermi pockets of a high-Tc cuprate superconductor
〈著者〉 Junhyeok Jeong, Yamato Enomoto, Yoshimitsu Kohama, Tomotaka Nakayama, Kotaro Ando, Kifu Kurokawa, Soonsang Huh, Zhuo Yang, Toshihiro Nomura, Matthew D. Watson, Timur K. Kim, Cephise Cacho, Chun Lin, Makoto Hashimoto, Donghui Lu, Shiro Sakai, Takami Tohyama, Kazuyasu Tokiwa*, Takeshi Kondo* (*責任著者)
<DOI> 10.1038/s41467-026-73081-5
<URL> <https://doi.org/10.1038/s41467-026-73081-5>

研究助成

本研究は、日本学術振興会の科学研究費（課題番号 JP26H02014, JP21H04439, JP23K17351, JP25H01250, JP25H01246, JP24K06965, JP24K00560, JP25H01248）、文部科学省の光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP 課題番号 JPMXS0118068681）、旭硝子財団、村田学術振興財団、三菱財団、および東レ科学振興会の支援を受けて実施しました。

用語解説

（注1）銅酸化物高温超伝導体：

1986年にベドノルツとミュラーがLa-Ba-Cu-O系物質において高い超伝導転移を発見したのを発端に、短期間の内に次々と高い超伝導を示す銅酸化物の類似物質が発見されました。それらを銅酸化物高温超伝導体と呼びます。

（注2）角度分解光電子分光：

物質に光を照射すると、電子（光電子）が試料から真空中へ放出されます。その光電子の運動エネルギー、および脱出角度を調べることによって、物質中の電子のエネルギーと運動量を観測できる（つまり電子構造を決定できる）実験手法です。

（注3）量子振動：

強い磁場を物質に印加すると、不連続（離散的）なエネルギーの準位が形成されます。それを反映し、様々な物理量（電気的および磁氣的性質）が磁場の強さと共に振動する振る舞いを量子振動と呼びます。量子振動を観測する事で、フェルミ面に関する詳細な情報が得られます。

（注4）反強磁性秩序：

磁性を持つ電子は通常、小さな磁石のような性質（スピン）を持っています。強磁性体では、それらの向きが同じ方向に揃います。一方、反強磁性秩序では、隣り合う電子のスピンが互いに反対向きに整列します。

（注5）フェルミ面：

物質内の電子が持ち得るエネルギーと運動量の関係を表したものを電子構造と言い、その形状は物質ごとに異なります。電子は低いエネルギー準位から順に占有され、電子が占有する最も高いエネルギーに対応する電子構造の等エネルギー面をフェルミ面と言います。フェルミ面の形や大きさは、物質の電気的性質を決める重要な情報となります。特にその面積から、伝導に寄与するキャリア数を見積もることができます。

（注6）BCS理論：

超伝導を説明する最も基本的な理論であり、1957年にバーディーン（Bardeen）、クーパー（Cooper）、シュリーファー（Schrieffer）によって提唱されました。BCS理論では、電子同士が格子振動（フォノン）を介して弱く引き合い、「クーパー対」と呼ばれる電子対を形成することで超伝導が発現すると説明されます。通常の超伝導体では、この電子対は空間的に大きく広がり、多数の電子対同士が重なり合った状態を形成しています。銅酸化物高温超伝導体では、電子対形成に関与する媒質が何であるかは未解決ですが、BEC的超伝導状態との対比として、このような空間的に広がった電子対による超伝導状態をBCS型超伝導状態と呼びます。

(注7) BEC 的な超伝導状態：

電子対が空間的に強く束縛され、分子のように局在した状態で凝縮する超伝導状態を指します。通常の超伝導体を説明する BCS 理論では、電子対は空間的に大きく広がり互いに重なり合っています。一方、BEC 的な超伝導状態では、電子対は小さく強く結びついており、ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) に近い性質を示します。BCS 状態から BEC 的な超伝導状態へ連続的に変化する現象は「BCS-BEC クロスオーバー」と呼ばれ、高温超伝導体において実現しうるかが長年大きな課題となってきました。

問合せ先

〈研究に関する問合せ〉

東京大学 物性研究所

准教授 近藤 猛 (こんどう たけし)

TEL : 04-7136-3370

E-mail : kondo1215@issp.u-tokyo.ac.jp

東京理科大学 先進工学部 電子システム工学科

教授 常盤 和靖 (ときわ かずやす)

TEL : 03-5876-1441

E-mail : tokiwa@rs.tus.ac.jp

〈報道に関する問合せ〉

東京大学 物性研究所 広報室

TEL: 04-7136-3207

E-mail : press@issp.u-tokyo.ac.jp

東京理科大学 広報部 広報課

TEL: 03-5228-8107

E-mail : koho@admin.tus.ac.jp

上智学院広報グループ

E-mail : sophiapr-co@sophia.ac.jp