

鉄系高温超伝導の発現機構を解く鍵となる電子状態を解明

1. 発表者：

水上 雄太（東京大学大学院 新領域創成科学研究科 物質系専攻 助教）
芝内 孝禎（東京大学大学院 新領域創成科学研究科 物質系専攻 教授）
橋本 顕一郎（東北大学金属材料研究所 助教）

2. 発表のポイント：

- ◆2008年に発見された鉄系高温超伝導体において、いくつかの超伝導発現機構が提案されているが、その鍵となる超伝導電子の電子状態が未解明であった。
- ◆電子線を照射したときに超伝導電子の数が特殊な変化を示すことを観測し、その変化からもとの電子状態を明らかにした。
- ◆この電子状態は、磁気揺らぎ（※1）を超伝導の主機構とする理論で提案されたものと一致する。

3. 発表概要：

東京大学大学院新領域創成科学研究科の水上雄太助教、芝内孝禎教授（京都大学大学院理学研究科客員教授兼任）、東北大学金属材料研究所の橋本顕一郎助教らは、鉄系高温超伝導体についてこれまで明らかになっていなかった超伝導電子の電子状態を解明しました。これは、純良単結晶に電子線を照射して、その照射量を増やすに伴い超伝導電子の数が非単調に変化することを初めて観測したことにより、明らかになったものです。

2008年に発見された鉄系超伝導体は、その発見以降、短期間で膨大な量の研究がなされたにもかかわらず、その超伝導発現機構と密接に関係する超伝導電子の電子状態が未解明でした。本研究によってそれは「 s_{\pm} （エス プラスマイナス）」型の対称性であることが明らかとなり、これは磁気揺らぎ（※1）を主な機構とする超伝導において提案されたものです。今後より高い温度での超伝導の実現を目指し、この機構を用いた超伝導体の設計指針につながることで期待されます。

本研究成果は2014年11月28日付けで、英国科学誌 *Nature Communications* にオンライン掲載される予定です。

本研究は、京都大学大学院理学研究科の松田祐司教授、仏エコールポリテクニーク、米フロリダ大学の研究者らと共同で行いました。また、本研究は文部科学省新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」（No. 25103713）、科学研究費基盤研究（No. 24244057, 25220710）の助成を受けて行われました。

4. 発表内容：

研究の背景と経緯

ある物質を低温まで冷却すると、電気抵抗が突如としてゼロになると同時に外部から加えられた磁場を完全に排除するという完全反磁性の特性を示すことがあります。この状態は「超伝導状態」として知られています。超伝導状態は1911年にオランダで初めて発見されましたが、

1957年に超伝導状態を記述する理論であるBCS理論(※2)が発表され、それまでのほとんど全ての超伝導現象を説明することができました。しかしながら近年、電子同士の相互作用が強い強相関電子系(※3)として知られる物質において、高温超伝導を含む新しい超伝導状態が次々と発見されており、これらはBCS理論では全く説明ができないことが明らかとなってきました。これら新奇な超伝導状態は、物理学としての重要さのみならず多くの技術革新を秘めた現象であるため、その発現機構解明は現代の固体物理学の最重要課題の一つとなっています。

2008年に発見された鉄系高温超伝導体は、その発見よりわずか1年足らずで50ケルビン(摂氏マイナス223度)よりも高い温度で超伝導現象を示すこと(超伝導転移温度)が報告され、これまでに発見された最高の超伝導転移温度を持つ銅酸化物高温超伝導体に次ぐ高温超伝導物質であることが明らかとなりました。この鉄系高温超伝導について、現在までに、従来のBCS理論とは異なる、さまざまな種類の揺らぎを媒介とする発現機構などが理論的に提案されています。これらの理論では、超伝導電子の電子状態の対称性(※4)が揺らぎの種類により決定されます。しかしながら、実験的には、電子状態の対称性の決定には至っておらず、主となる超伝導発現機構が未解明の状態が続いていました。

研究成果の内容と意義

この重要な課題を解決するために、水上助教、芝内教授らの研究グループは純良な単結晶に電子線を照射してその不純物効果(※5)を研究しました。超伝導状態における不純物効果の研究は、超伝導の電子状態を調べる上で非常に強力な手法の一つです。鉄系高温超伝導体においては、主に元素を置換するなどの化学的手法を用いて結晶内に不純物を導入して、その結晶の超伝導転移温度の変化を調べる研究が行われてきました。これに対し本研究グループは、電子線を試料に照射するという新しい方法を用いて、試料内部にまんべんなく欠陥(不純物)を作り出しました(図1)。この方法では、照射量を調整することにより系統的に不純物量を制御することができます。研究グループは超伝導電子の数を反映する量である磁場侵入長(※6)が、照射量に対して特殊な変化をすることを明らかにしました(図2)。図2では不純物量が増えるのに従い低温での磁場侵入長の温度に対する変化量が一度少なくなったあと、増大するという非単調な振る舞いを示しています。これは、超伝導電子の数がいったん増加し、次に減少に転じることを表しています。これまでに鉄系超伝導体においてはさまざまな超伝導電子の電子状態の対称性が理論的に提案されてきましたが、このような非単調な超伝導電子の数の変化は、磁気揺らぎを媒介した機構で提案された「 s_{\pm} (エス プラスマイナス)」型の対称性を持つ場合にのみ説明できます(図3)。

この結果は、電子線照射による系統的な不純物導入に伴い、超伝導電子の数がどのように変化するかを直接観測することで超伝導の電子状態の対称性の種類を決定できることを示したものです。本研究により決定された超伝導の電子状態は、従来のBCS理論とは異なる磁気揺らぎを主な機構とする超伝導において提案されたもので、今後より高い温度の超伝導の実現を目指し、この機構を用いた超伝導体の設計指針につながることを期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：2014年11月28日付 英国科学誌「Nature Communications」

論文タイトル：「Disorder-induced topological change of the superconducting gap structure in iron pnictides」

著者: Y. Mizukami, M. Konczykowski, Y. Kawamoto, S. Kurata, S. Kasahara, K. Hashimoto,
V. Mishra, A. Kreisel, Y. Wang, P. J. Hirschfeld, Y. Matsuda, T. Shibauchi *
DOI 番号: 10.1038/ncomms6657

6. 注意事項: 日本時間 11 月 28 日 (金) 午後 7 時 (イギリス時間: 28 日 (金) 午前 10 時)以前の公表は禁じられています。

7. 問い合わせ先:

東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻 助教 水上 雄太 (みずかみ ゆうた)
277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 東大柏キャンパス
TEL/FAX: 04-7136-3775 Email: mizukami@k.u-tokyo.ac.jp
HP: <http://qpm.k.u-tokyo.ac.jp>

東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻 教授 芝内 孝禎 (しばうち たかさだ)
277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 東大柏キャンパス
TEL/FAX: 04-7136-3774 Email: shibauchi@k.u-tokyo.ac.jp
HP: <http://qpm.k.u-tokyo.ac.jp>

京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 教授 松田 祐司 (まつだ ゆうじ)
TEL/FAX: 075-753-3790 Email: matsuda@scphys.kyoto-u.ac.jp
HP: <http://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp>

東北大学金属材料研究所 助教 橋本 顕一郎 (はしもと けんいちろう)
TEL: 022-215-2028 FAX: 022-215-2026 Email: hashimoto@imr.tohoku.ac.jp

8. 用語解説:

(※1) 磁気揺らぎ

磁石になる物質においては、電子或いは原子同士に磁気的な相互作用が存在し、それらが十分強ければ磁石になります。一方で、磁石になる程相互作用が強くなくても、その相互作用が存在すれば、電子或いは原子が持つ磁気は磁石になろうと時間的に変化することがあります。これが磁気揺らぎです。さて、超伝導は2つの電子がペア(クーパー対)を組むことで、金属状態とは異なる量子力学的な凝縮状態となることにより発現します。クーパー対形成には電子間の引力が必要ですが、この引力のメカニズムの一つの候補として、磁気揺らぎを媒介とする機構が提案されています。特に鉄系高温超伝導体のように、反強磁性を示す状態に近い物質では、磁気揺らぎが大きいことが知られており、鉄系高温超伝導体の発現機構として有力視されています。

(※2) BCS 理論

1957年に J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer により提案された超伝導状態を微視的に説明する理論です。提案者の頭文字をとって BCS 理論と呼ばれており、この BCS 理論では結晶の格子振動が媒介となり二つの電子間に引力が働きペアを形成します。このペアが凝縮することで超伝導が生じると説明されています。BCS 理論では超伝導ギャップは方向に依らず一

定値で、その対称性は「s (エス) 波」型となります。このため、BCS 理論では説明可能な従来型超伝導体は、しばしば s 波超伝導体とよばれます。

(※3) 強相関電子系

通常の金属や半導体では、電子同士の反発力はあまり重要ではなく、現代のエレクトロニクスの基礎となる物理学は、このような電子間の相互作用を無視した理論を基に構築されてきました。これに対し、遷移金属化合物やレアアース化合物やウラン化合物などでは、電子間の相互作用が無視できないほど強くなり、従来の理論の枠組みでは理解できない現象が現れる場合がしばしばあります。このような強い電子間相互作用を持つ系のことを強相関電子系とよび、これらの系における電子の振る舞いを理解することが物質物理学における最重要課題の一つです。

(※4) 超伝導電子の電子状態の対称性

従来の BCS 理論に従う超伝導体では、電子の進む向きにより超伝導電子の数は変化しませんが、BCS 理論とは異なる発現機構による超伝導では、一般にその向きにより超伝導電子の数が増減します。電子状態の対称性とは、この電子数の方向依存性を分類するもので、超伝導電子の電子状態の対称性は、その超伝導が何を起源にして生じているかということと密接に関係しています。

(※5) 不純物効果

結晶には、結晶を構成する元素とは異なる元素や元素の抜けた穴等の不純物が存在します。不純物は、不純物がない際の結晶中の電子状態を変化させますが、この電子状態の変化のことを不純物効果と言います。その変化の仕方は不純物の種類や量、不純物がない際の電子状態に依存しています。とりわけ超伝導研究では、不純物の種類や量を変化させたときにどのような不純物効果が現れるかを明らかにすることで、不純物がない際の超伝導の電子状態を解明できることが知られています。

(※6) 磁場侵入長

物質が超伝導状態になると、外から加えられた磁場を完全に排除する性質を持ちます。この状態は「マイスナー状態」として知られています。マイスナー状態では超伝導体の内部では確かに磁場は完全に排除されていますが、表面の数十～数千ナノメートルといった非常に狭い領域では磁場がわずかに侵入します。この侵入する長さのことを磁場侵入長と言います。磁場侵入長の二乗の逆数は超伝導電子の数に比例しており、超伝導電子の数が温度を変えるとどのように変化するかは超伝導電子の電子状態の対称性によって異なっています。従って、磁場侵入長の温度に対する変化が分かれば、超伝導電子の電子状態の対称性に関する情報を得られます。

9. 添付資料 :

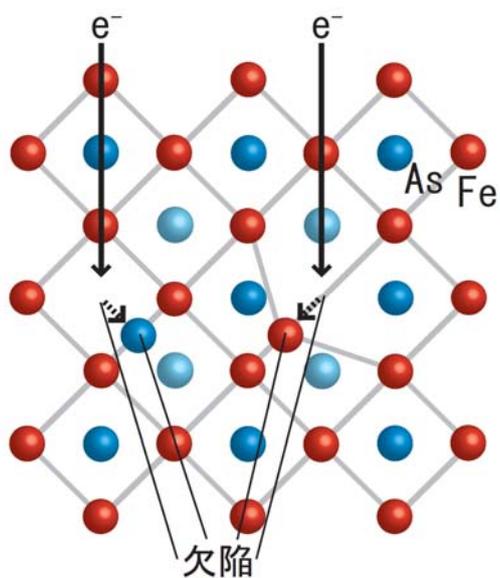


図1：結晶に電子線を照射することにより導入される欠陥（不純物）を示す模式図。電子が原子と衝突することにより、「原子の抜けた穴」と「元の位置からずれた原子」から成る欠陥が生じる。電子が原子に衝突した際の反跳エネルギーが小さい為、図で示した欠陥が試料全体に均一に分布する。

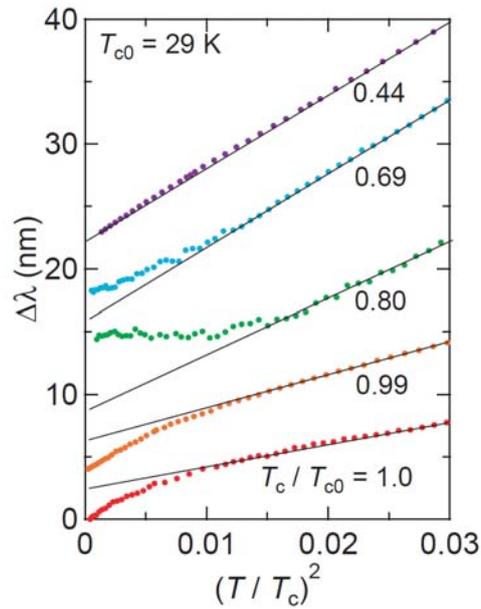


図 2 : 電子線の照射量を増やすことに伴う磁場侵入長の温度依存性の変化を同時に図示したもの。下から上へ電子線照射量（不純物量）が増大する方向に対応している。低温での磁場侵入長の温度依存性に着目すると $T/T_{c0} = 1.0$ では温度に対して大きく変化しているが、 $T/T_{c0} = 0.8$ では平坦になっている。しかし $T/T_{c0} = 0.69$ 以降では再び温度に対する変化量が大きくなるという非単調な振る舞いを示す。

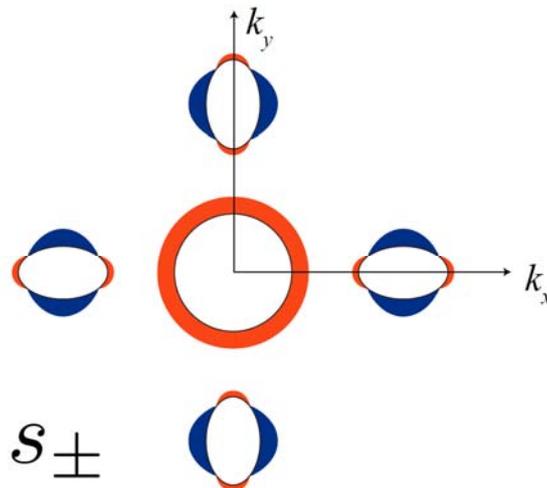


図 3 : 「 s_{\pm} (エス プラスマイナス)」型の超伝導ギャップの模式図。図は電子状態を議論する際に用いられる波数空間における超伝導ギャップの大きさを幅で示したもの。正の符号が赤で、負の符号が青で表されている。大部分が正符号を持つ部位と、大部分が負符号を持つ部位とがそれぞれ分かれた構造をとる。