

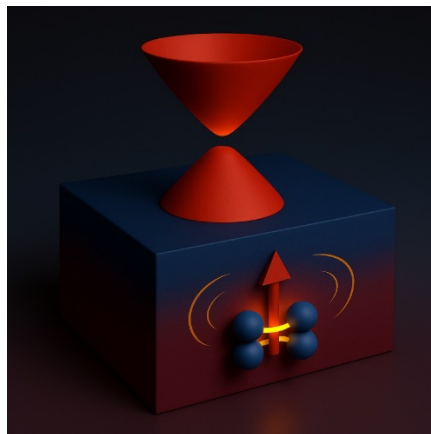
PRESS RELEASE

東京大学
東京都立大学
東北大学
弘前大学

「トポロジー」と「対称性の破れ」の交差点 ——鉄系超伝導体における新たな量子状態の発見——

発表のポイント

- ◆鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ の一部組成において、超伝導転移とともにバルクで自発的な磁場が発生し、時間反転対称性の破れを伴う超伝導状態が実現することを明らかにしました。
- ◆ $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ はトポロジカル表面状態を持つことが知られており、時間反転対称性の破れた超伝導がトポロジカルな電子構造と共存することが直接示されたのは本研究が初めてです。
- ◆本結果は、磁性トポロジカル絶縁体と相対する超伝導体を発見したものであり、今まで考えられていなかった新たなトポロジカル超伝導状態の可能性を示すものです。



時間反転対称性の破れた超伝導とトポロジカル表面状態のイメージ図

概要

東京大学大学院新領域創成科学研究科の六本木雅生大学院生（研究当時／現在：理化学研究所研究員）、石原滉大助教、橋本顕一郎准教授、芝内孝禎教授、同大学低温科学研究センターの藤井武則助教、東京都立大学大学院理学研究科の水口佳一准教授、山下愛智助教、東北大学大学院理学研究科の水上雄太准教授、弘前大学大学院理工学研究科の渡辺孝夫教授（研究当時）らのグループは、コロンビア大学、ブリティッシュコロンビア大学、マクマスター大学などの研究グループと共同で、鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ の一部組成において時間反転対称性が破れた新奇的な超伝導（注 1、図 1）状態が実現していることを明らかにしました。

本研究では、ミュオンスピン緩和法（ μSR 、注 2）という物質内部の磁気に関する微細構造を高感度に測定できる手法を用いて、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ の電子状態を調査しました。その結果、時間反転対称性の破れ（注 3）を示す明確な証拠が発見されました。

特に Te 量 (x) 0.64 という組成では、トポロジカル表面状態（注 4）とマヨラナ準粒子（注 5）の存在が示唆されており、本研究によりトポロジカルな電子構造と時間反転対称性の破れた超伝導が物質内部（バルク）で同時に存在することが明らかになりました。このような超伝導

状態では、トポロジカル絶縁体に磁性を導入した磁性トポロジカル絶縁体における「ディラックギャップ（注6）」と類似した現象が超伝導状態でも現れる可能性があり、量子情報科学に応用が期待される新たな現象の探索につながると期待されます。

本研究成果は2025年7月23日付けで、英国科学誌 Nature Communications にオンライン掲載されました。

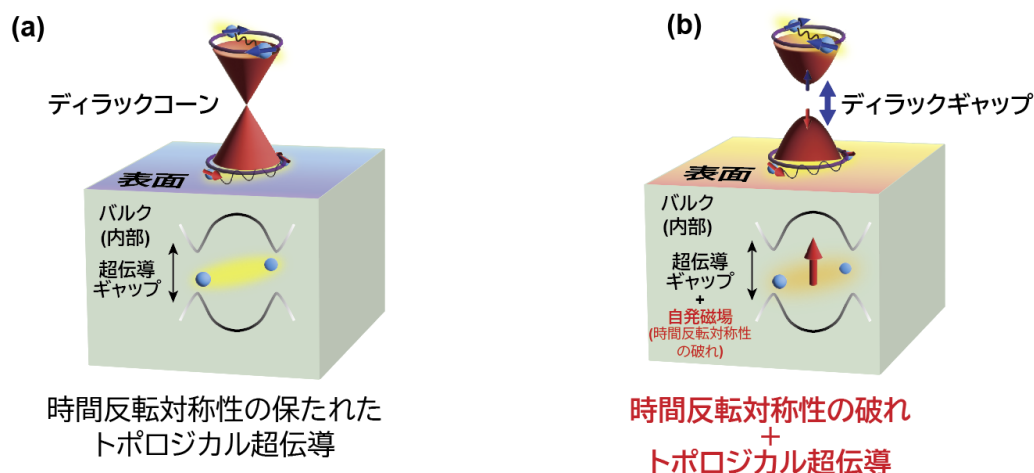


図1：トポロジカル超伝導と表面電子状態

(a) 従来提案されていた時間反転対称性が保たれたトポロジカル超伝導状態の概念図。表面の電子は運動量に対してエネルギーが直線的に変化し、円錐（コーン）状に広がるディラックコーン（注6）と呼ばれるエネルギー構造を示す。(b) 本研究で明らかになった物質内部で時間反転対称性が破れた超伝導とトポロジカル表面状態が共存する場合。この時、ディラックコーンの交点にはすき間（ギャップ）が開く。このエネルギー的なギャップはディラックギャップと呼ばれており、このギャップが開くことで試料表面や端で一方向のみに流れる量子化電流（カイラルエッジ電流）など新しい量子現象の出現が期待される。

発表内容

近年、物質の中で電子が示す性質を理解するうえで、「対称性」や「トポロジー」という概念が注目されています。たとえば、トポロジカル絶縁体では、物質内部（バルク）が電気を通さない一方で、その表面には特殊な電子状態（トポロジカル表面状態）が現れます。この表面状態は「時間反転対称性」という対称性によって守られており、これが破れると自発的な磁場や試料表面や端で一方向のみに流れる量子化電流（カイラルエッジ電流）といった新しい物理現象が現れます（図1）。

一方、超伝導体でもトポロジカルな電子状態を持つ「トポロジカル超伝導体」の存在が理論的に予測されており、そこではマヨラナ粒子と呼ばれる量子情報に利用可能な特異な準粒子の出現が期待されています。しかし、こうした性質を同時に備えた物質はごく限られており、実験的にそのような状態が確認された例は極めて少ないのが現状でした。

その中でも、鉄系超伝導体である $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ は、電子の運動が特殊なスピン構造を伴って現れるトポロジカル表面状態を持つことが知られており、量子コンピューティングの基盤技術として注目されているマヨラナ準粒子の存在も示唆されてきました。

本研究では、鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ において、超伝導状態に伴って物質内部に自発的な磁場が現れるという、時間反転対称性の破れを伴う超伝導状態を観測しました。これは、トポロ

ジカルな電子構造と時間反転対称性の破れた超伝導が共存するという、これまでにない新しい超伝導状態の実現を示すものです。

実験には、極めて微弱な内部磁場を高感度で検出可能なミュオンスピン緩和法 (μ SR) を用い、複数の組成の $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 単結晶について系統的な測定を行いました。その結果、特に Te 量 (x) 0.64 という組成で、超伝導転移と同時に緩和率の増加＝自発磁場の発生が確認されました (図 2(a))。この組成は、これまでの研究によりトポロジカル表面状態やマヨラナ準粒子の存在が示唆されていた領域であり、今回の結果は $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ において、トポロジカルな電子構造と時間反転対称性の破れた超伝導との共存 (図 1 (b) 及び図 2(b)) を世界で初めて実証したものです。

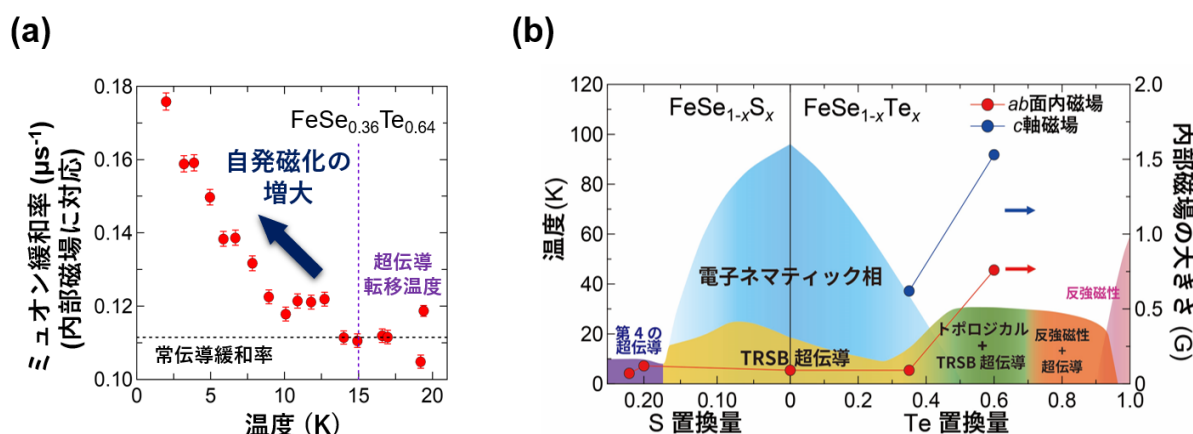


図 2：時間反転対称性の破れと電子相図

(a) ゼロ磁場下での μ SR における物質の内部磁場発達の温度に対する変化。FeSe_{1-x}Te_x (Te 置換量:64%) において超伝導転移に伴い内部磁場が増大していることから時間反転対称性の破れた (TRSB; Time-Reversal Symmetry Breaking) 超伝導状態が物質内部で実現していることが明らかになった。(b) FeSe_{1-x}Te_x における温度 (縦軸) と Te 置換量 (横軸) に対する秩序相。本研究の結果から、Te 量約 40%以下ではネマティック相と呼ばれる電子の回転対称性が小さい相と時間反転対称性の破れた超伝導相が共存し、Te 置換量約 40～65%の領域ではトポロジカル相と時間反転対称性の破れた超伝導相が共存しており、さらに Te 置換量約 70%以上の領域では反強磁性と超伝導が共存することが明らかになった。

本研究成果は鉄系超伝導体においてトポロジー・超伝導・対称性の破れが複雑に絡み合った新たな量子状態が実現している事実を示すものであり、このような新奇な状態では、従来の超伝導とは異なり、マヨラナ準粒子やカイラルエッジモードの出現など特異な量子現象が期待され、量子コンピュータなど次世代デバイス開発の基盤となる可能性を秘めています。将来的にはトポロジーと超伝導の相互作用を人工的に設計・制御することで量子計算やトポロジカルデバイスへの応用が期待されるとともに、物性物理の基礎的な理解においても重要な知見を与える成果です。

○関連情報：

「プレスリリース①鉄系超伝導体における「第4の超伝導状態」の特異な超伝導特性とその不安定性を解明」(2024/10/11)

<https://www.k.u-tokyo.ac.jp/information/category/press/11200.html>

「プレスリリース②鉄系超伝導体において新たな量子液晶状態」(2020/3/10)

<https://www.k.u-tokyo.ac.jp/information/category/press/8100.html>

発表者・研究者等情報

東京大学

大学院新領域創成科学研究科 物質系専攻

六本木 雅生 研究当時：博士課程

現：理化学研究所 量子コンピューティング研究センター 研究員

石原 滉大 助教

橋本 顕一郎 准教授

芝内 孝禎 教授

低温科学研究センター

藤井 武則 助教

弘前大学 大学院理工学研究科

渡辺 孝夫 研究当時：教授

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻

水上 雄太 准教授

東京都立大学 大学院理学研究科 物理学専攻

山下 愛智 助教

水口 佳一 准教授

論文情報

雑誌名：Nature Communications

題名：Topology Meets Time-Reversal Symmetry Breaking in $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ Superconductors

著者名：M. Roppongi*, Y. Cai, K. Ogawa, S. Liu, G. Q. Zhao, M. Oudah, T. Fujii, K. Imamura, S. Fang, K. Ishihara, K. Hashimoto, K. Matsuura, Y. Mizukami, M. Pula, C. Young, I. Markovic, D. A. Bonn, T. Watanabe, A. Yamashita, Y. Mizuguchi, G. M. Luke, K. M. Kojima, Y. J. Uemura*, and T. Shibauchi*

DOI: 10.1038/s41467-025-61651-y

URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61651-y>

研究助成

本研究は科学研究費 基盤研究(A)「時間反転対称性の破れた新奇超伝導状態の解明」(研究代表者：芝内孝禎教授) [22H00105]、学術変革領域研究(A)「相関設計で挑む量子創発」(領域代表者：有田亮太郎教授) [25H01248]および「高密度共役の科学」(領域代表者：関修平教授) [20H05869]等の助成を受けて行われました。

用語解説

(注1) 超伝導

金属を冷却すると電気抵抗がゼロになり、電流が流れ続ける現象。物質内部の外部磁場を排除するマイスナー効果も持つ。

(注2) ミュオンスピン緩和法 (μ SR)

スピンを持つ素粒子ミュオンを物質に打ち込み、ミュオンのスピン回転から物質内部の磁場の有無や分布を高感度で測定する手法。百ナノテスラ (ミリガウス) レベルの磁場も検出可能。

(注3) 時間反転対称性の破れ

物理法則が時間を逆向きにしても成り立つ性質を「時間反転対称性」と呼び、これが自発的に破れると物質内部に磁場が現れる。通常の超伝導体では時間反転対称性が保たれているが、ごく一部の例外として時間反転対称性の破れた超伝導体が存在する。

(注4) トポロジカル表面状態、トポロジカル超伝導

トポロジカル表面状態とは、物質のバルクが絶縁体や超伝導体であっても、表面にのみ伝導性を持つ特殊な電子状態である。トポロジーと呼ばれる幾何学的性質に起因しており、外部からの乱れに対して非常に安定であることが特徴である。トポロジカル表面状態では、電子のスピンと運動方向が結びついたスピン運動量ロッキングが現れ、スピントロニクスや量子情報への応用が期待されている。トポロジカル超伝導は、このようなトポロジカルな電子構造を持つ物質において超伝導が発現している状態を指す。特にその表面や渦糸中には、マヨラナ準粒子(注5)と呼ばれる特殊な準粒子が出現すると理論的に予測されており、量子計算におけるトポロジカル量子ビットの実現に資する可能性があるため注目を集めている。

(注5) マヨラナ準粒子

粒子と反粒子が一致するという特殊な準粒子で、トポロジカル超伝導体の渦糸中に出現するとされる。誤りに強い量子ビットの構成要素として注目されている。

(注6) ディラックコーン、ディラックギャップ

ディラックコーンとは、電子のエネルギーが運動量に対して直線的に変化し、円錐 (コーン) 状に広がるエネルギー構造のことを指す。この構造は、トポロジカル絶縁体や一部の超伝導体の表面状態に現れ、電子が質量を持たない粒子のように高速で運動することを可能にする。通常、このディラックコーンの交点にはすき間 (ギャップ) はないが、時間反転対称性が破れたとき、その部分にエネルギー的なギャップ (ディラックギャップ) が開く。ディラックギャップの形成は、試料端を流れる量子化された自発電流 (カイラルエッジモード) などの新奇な量子現象の出現と深く関係しており、トポロジカル物質の研究において注目されている。

問合せ先

〈研究に関する問合せ〉

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）

Tel / Fax : 04-7136-3774 E-mail : shibauchi@k.u-tokyo.ac.jp

HP : <http://qpm.k.u-tokyo.ac.jp>

〈報道に関する問合せ〉

東京大学大学院新領域創成科学研究科 広報室

Tel : 04-7136-5450 E-mail : press@k.u-tokyo.ac.jp

低温科学研究センター 事務室

Tel : 03-5841-2852 E-mail : email@crc.u-tokyo.ac.jp

東京都公立大学法人

東京都立大学管理部 企画広報課 広報係

Tel : 042-677-1806 E-mail : info@jmj.tmu.ac.jp

東北大学大学院理学研究科 広報・アウトリーチ支援室

Tel : 022-795-6708 E-mail : sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp

弘前大学大学院理工学研究科総務グループ総務担当

Tel : 0172-39-3510 E-mail : r_koho@hirosaki-u.ac.jp