

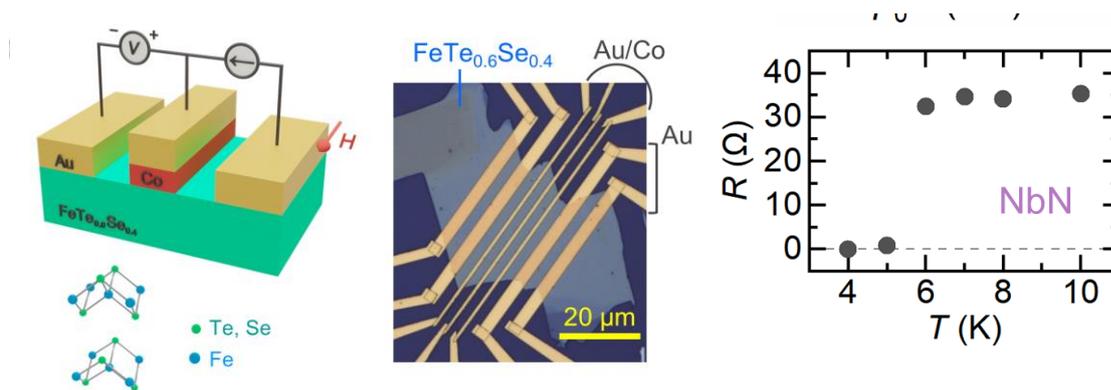
スピン偏極したトポロジカル超伝導状態を発見 ～誤り耐性のある量子計算実現への新たな研究手法を開拓～

概要

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻の大西康介 修士課程学生（研究当時）、大島諒 助教、白石誠司 教授らのグループは京都大学大学院理学研究科の松田裕司 教授、柳瀬陽一 教授と共同で、21 世紀の新しい物質「トポロジカル量子物質」（その電子状態がトポロジカルに「捻れた」物質であり、20 世紀までに発見されてきた半導体・金属・磁性体などとは根本的に異なる性質を持つ物質）の一種である「トポロジカル超伝導体」^{※1}の候補物質を用いて、トポロジカル超伝導状態の証拠となり、かつ誤り耐性のある量子計算実現のキーとなる情報担体と期待されているマヨラナ準粒子^{※2}の存在の間接的証拠でもあるスピン偏極状態^{※3}を観測することに成功しました。

超伝導は 1911 年にオランダ人の H.K. Onnes が発見して以来、基礎学術面でも応用面でも大きな関心を集め続けている現象です。近年の「トポロジカル量子物質」の勃興により、超伝導にもトポロジカルな状態が期待されること、そのトポロジカル超伝導の多くがスピン偏極状態を持ちうること、更にトポロジカル超伝導体中に「マヨラナ準粒子」と呼ばれる、誤り耐性のある量子計算を実現できる情報担体となりうる粒子が存在できることがわかってきました。今回の研究では、このトポロジカル超伝導体として期待されている $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ （鉄テルルセレン）を用いて、この物質表面にトポロジカル超伝導体状態が確かに存在しスピン偏極状態が観測可能であることを実験的に示し、それを通じてマヨラナ準粒子が存在していることを間接的に明らかにしました。この成果はトポロジカル超伝導という 21 世紀の新しい固体物性の研究に新しい視点と実験手法を持ち込むだけでなく、誤り耐性のある量子計算の実現に向けて新しく、かつ強力な研究ツールを開拓したという意義があり、固体物理・量子技術の両面で極めて重要な一里塚への到達を意味します。

本成果は 2025 年 5 月 9 日（現地時間）に米国学術誌である *Physical Review B* 誌に速報性とインパクトの高い論文が選ばれる Letter としてオンライン掲載されました。



(左)実験で用いた $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ 素子の概念図と結晶構造。(中)素子の光学顕微鏡写真。(右)超伝導状態におけるスピン偏極信号の測定結果。トポロジカル超伝導体である $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ からは矩形のヒステリシス信号が観測される（黒線）が非トポロジカル超伝導体である FeSe からは信号が観測されない（赤線）。

1. 背景

オランダの H.K. Onnes は 1911 年にヘリウムを液化する研究の過程で抵抗がゼロになる超伝導という現象を発見しました。爾来 100 年以上、超伝導という現象は物質科学における多くの研究者を魅了し続けています。一方、2016 年にノーベル物理学賞がトポロジカル量子物質研究の嚆矢となる研究^{*4} に与えられたことからわかるように、21 世紀の物質科学におけるトポロジーの役割には巨大なものがあります。この観点から、近年「トポロジカル絶縁体」「トポロジカル超伝導体」などが、世界的に熾烈な研究競争の対象になっています。

今回我々が研究対象とした $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ は「トポロジカル超伝導体」と呼ばれるトポロジカル物質の一種とみなされており、その超伝導状態で流れる電流に存在するクーパー対という電子 2 個のペアがトポロジカル性との関連からスピン偏極することが理論的に予想されているだけでなく、誤り耐性のある量子計算実現のための情報担体として有力な「マヨラナ準粒子」が存在することも予想されています。そのため $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ が本当にトポロジカル超伝導体であるか、世界中で活発に研究されていますが、トポロジカル性の証拠であるスピン偏極の計測はこれまで未達成であり、その実現が希求されてきました。

2. 研究手法・成果

そこで私達の研究グループでは、これまでに培ってきたスピン偏極計測技術を超伝導状態でも用いることに挑戦しました。実験にはトポロジカル超伝導体である $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ と、非トポロジカル超伝導体である FeSe を用い、スピン素子を作製しました。スピン計測には強磁性体である Co を用い、 Co の持っているスピンの向きを外部から印加する磁場によって制御することで $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ 中に存在するはずのスピン偏極を on/off として計測します。 $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ が超伝導状態にない場合には何も信号が観測されない一方、超伝導状態では Co の持つスピンの向きに対応してスピン信号が変化する（ヒステリシスが生まれる）ことを観測しました。比較対象として $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ から Te を抜いた、非トポロジカル超伝導体 FeSe を用いた場合は超伝導状態になってもスピン信号（ヒステリシス）は観測されませんでした。このことから、期待通り $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ はクーパー対がスピン偏極したトポロジカル超伝導体であり、マヨラナ準粒子をその内部に持っていることが証明されました。

3. 波及効果・今後の予定

今回の成果により、マヨラナ準粒子を生成できるトポロジカル超伝導体を比較的容易に実験面から検証・確認することができ、理論との両輪で効率的にマヨラナ準粒子を持つことのできるトポロジカル超伝導体の探索を実現することが可能となりました。このような超伝導体は未だあまり多数予言・発見されておらず、本成果によって、当該研究分野が急速に発展することが期待されます。今後求められる研究としては、トポロジカル超伝導状態で現れるマヨラナ準粒子の直接観測です。マヨラナ準粒子は電荷を持たない一方スピンは持っているという不思議な粒子ですが、実験手法を工夫することでマヨラナ準粒子を観測・制御し、固体素子を使った誤り耐性のある量子計算実現への道筋を開拓していきます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究を遂行するにあたり、科学研究費補助金・挑戦的研究（開拓）「スピン計測技術を基軸とするトポロジカル超伝導とマヨラナ励起状態の探索」、JST さきがけ「情報担体」などの支援を受けました。ここに謝意を表します。

<用語解説>

※1 トポロジカル超伝導体：トポロジカル絶縁体に類似したトポロジカル量子物質です。トポロジカル絶縁体と呼ばれる物質は、物質内部が金属で表面のみが半導体となりますが、トポロジカル超伝導体では、物質内部は非トポロジカル超伝導体同様、超伝導ギャップが開いた半導体的状態がある一方、表面ではギャップが閉じた特異な超伝導状態が実現しています。トポロジカル超伝導状態の実現にはいくつかの異なるアプローチがありますが、材料的に極めて強い限定があり、また全てのトポロジカル超伝導体がマヨラナ準粒子を内部に持っているわけではないため、粘り強く注意深い研究が必要です。

※2 マヨラナ準粒子：元々は素粒子物理学においてイタリア人であるエットーレ・マヨラナによって1937年に理論的に提案されたマヨラナ粒子という粒子の性質をもった準粒子（電子のような基本粒子ではなく、複数の粒子同士が組みになってエネルギー励起された状態）です。素粒子物理学では近年ニュートリノがマヨラナ粒子であると期待されていますが実験的検証は完了していません。マヨラナ粒子は、粒子と反粒子が同一の粒子であるという特徴を持つため、その特徴として電荷はゼロでスピンは非ゼロという特徴がある（超伝導状態では、マイナス電荷を持つ電子とプラス電荷を持つホール[正孔]が組みになることでマヨラナ準粒子となります）ため、乱れやノイズに強いという特徴があるうえ、このマヨラナ準粒子は更に非可換統計性という奇妙な特徴を有しており、マヨラナ準粒子同士の位置交換だけで量子 NOT ゲートを実現できることから誤り耐性のある量子計算への発展が期待されています。

※3 スピン偏極状態：今回の研究では超伝導状態、すなわち電子2つが組みとなったクーパー対がスピンを運びます。非トポロジカル超伝導体では、組みになった電子1つ1つが違いに逆向きのスピンを持つので、全体ではスピンは0になり偏極しません。一方、今回用いた $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ は p 波超伝導体であると考えられています（非トポロジカル超伝導体は s 波か d 波超伝導体です）。この p 波超伝導体ではクーパー対を組む電子が違いに同じ向きのスピンを持つことが許されることが知られていますが、別の角度からは p 波超伝導体はトポロジカル超伝導体であることも知られています。つまり、超伝導状態でスピン偏極を計測できれば、その超伝導体は p 波超伝導体であり、同時にトポロジカル超伝導体でもあり、更にマヨラナ準粒子を内部に持っていることが証明できるわけです。

※4 トポロジカル量子物質研究の嚆矢となる研究：D.J. Thouless（ワシントン大学）、F. D. M. Haldane（プリンストン大学）、J. M. Kosterlitz（ブラウン大学）の3教授に「トポロジカル相転移および物質のトポロジカル相の理論的発見」の業績による2016年のノーベル物理学賞が贈られました。

<研究者のコメント>

「20年以上スピントロニクス分野で様々な成果を発信してきましたが、超伝導とスピントロニクスの融合は自分にとって大きなチャレンジでした。更にトポロジカル物質は大学院時代に学んだ素粒子論などの基礎物理が物質上で顕在化する物質であり個人的な思い入れも深い材料でした。大変苦勞もしましたが、物性物理だけでなく量子技術にまでスペクトルが広がる今回の成果を無事に発信できたことは私にとって大きな喜びです。」（白石誠司）

「私は既に大学を卒業していますが、大学時代に取り組んだ FeTeSe の研究が1つの成果としてまとめ、大変嬉しく思います。この場を借りて、私の卒業後も論文出版のために尽力いただいた研究室の先生方に感謝申し上げます。」（大西康介）

<論文タイトルと著者>

“Potentiometric detection of spin polarization expected at the surface of FeTe_{0.6}Se_{0.4} in the effective p-wave superconducting state”

(有効 p 波超伝導状態にある FeTeSe 表面で期待されるスピン偏極の電気化学的計測)

K. Ohnishi¹, R. Ohshima¹, T. Nishijima¹, S. Kawabata¹, S. Kasahara^{2,3}, Y. Kasahara^{4,#}, Y. Ando^{1,4,\$},

Y. Yanase³, Y. Matsuda³ and M. Shiraishi¹

1. 京都大学大学院工学研究科, 2. 岡山大学大学院理学研究科, 3. 京都大学大学院理学研究科, 4. JST さきがけ

現所属：九州大学大学院理学研究科, \$ 現所属：大阪公立大学大学院工学研究科

掲載誌：Physical Review B (Letter)

DOI：未定