

「エネルギーがゼロ」の束縛状態を観測

—マヨラナ粒子による次世代量子計算への第一歩—

理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター創発物性計測研究チームの町田理研究員、花栗哲郎チームリーダー、東京工業大学科学技術創成研究院フロンティア材料研究所の笹川崇男准教授、東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の為ヶ井強准教授らの共同研究グループ^{*}は、トポロジカル超伝導体^[1]FeTe_{0.6}Se_{0.4}（Fe：鉄、Te：テルル、Se：セレン）の量子渦^[2]において、マヨラナ粒子^[3]の特徴であるゼロエネルギー束縛状態（ZBS）^[4]の観測に成功しました。

本研究成果は、次世代の量子コンピュータの実現に向けたマヨラナ粒子の検出と制御法の基盤になると期待できます。

マヨラナ粒子は電荷を持たず、エネルギーが厳密にゼロの奇妙な粒子で、トポロジカル超伝導体の端部や超伝導電流の渦である量子渦に局在すると考えられています。マヨラナ粒子はノイズに強い次世代量子計算の基本要素として期待されており、マヨラナ粒子の実験的検証が試みられてきました。しかし、これまでの測定ではエネルギー分解能が不十分で、決定的な証拠が得られていませんでした。

今回、共同研究グループは、これまでにない高いエネルギー分解能（20 μeV）を実現するために、100 mK以下の超低温で動作する走査型トンネル顕微鏡（STM）^[5]を新たに開発し、FeTe_{0.6}Se_{0.4}の量子渦近傍の状態を詳細に調べました。その結果、エネルギーがゼロの束縛状態の観測に成功しました。この状態は、通常の電子では説明することができず、量子渦に局在したマヨラナ粒子由来であることを強く示唆しています。

本研究は、英国の科学雑誌『Nature Materials』に掲載されるのに先立ち、オンライン版（6月17日付け：日本時間6月18日）に掲載されます。

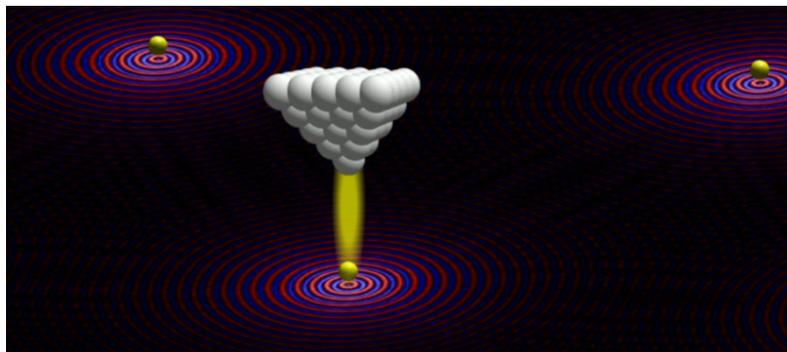


図 量子渦（超伝導電流の渦）に束縛されたマヨラナ粒子（黄色）検出のイメージ

※共同研究グループ

理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発物性計測研究チーム

研究員 町田 理 (まちだ ただし)
上級研究員 幸坂 祐生 (こうさか ゆうき)
チームリーダー 花栗 哲郎 (はなぐり てつお)

青山学院大学 理工学部 物理・数理学科

助教 孫 悦 (Yue Sun)

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻

助教 卞 舜生 (Sunseng Pyon)

准教授 為ヶ井 強 (ためがい つよし)

東京工業大学 科学技術創成研究院 フロンティア材料研究所

大学院生 竹田 駿 (たけだ しゅん)

准教授 笹川 崇男 (ささがわ たかお)

※研究支援

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業チーム型研究 (CREST) 「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出 (研究統括: 黒部篤)」における研究課題「トポロジカル量子計算の基盤技術構築 (研究代表者: 笹川崇男)」、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金基盤 B 「トポロジカル超伝導体の量子渦芯におけるマヨラナ粒子の検出と実空間制御 (研究代表者: 町田理)」、同基盤 B 「鉄系超伝導体における超伝導と nematic 相の関係解明 (研究代表者: 花栗哲郎)」、同基盤 A 「高エネルギー粒子線照射による鉄系超伝導体のギャップ構造の解明と臨界電流密度の増強 (研究代表者: 為ヶ井強)」による支援を受けて行われました。

1. 背景

固体中にはホールや電子といったフェルミ粒子^[6]が存在し、これらが物質の諸性質に重要な役割を果たしています。通常、これらの粒子には区別可能な反粒子^[7]が存在します。例えば、負の電荷を持つ電子は、正の電荷を持つ陽電子の反粒子です。これらは、電荷の符号の違いで区別できます。一方で、理論的には、粒子と反粒子の区別がつかない、つまり電荷が正でも負でもない (= 中性の) 粒子が存在可能であり、このような粒子は「マヨラナ粒子」と呼ばれています。

このマヨラナ粒子は、従来の基本粒子として知られているフェルミ粒子やボーズ粒子^[6]が従うルール (粒子の交換則^[6]) とは異なるルールに従う奇妙な粒子としても知られています。このような新粒子が生み出す新たな物理概念の探求という観点から、主に素粒子の分野でマヨラナ粒子の探索が行われてきました。そして近年、物質中でもある条件下でマヨラナ粒子が現れ得ることが指摘され、物質科学においても脚光を浴びるようになりました。その理由は、マヨラナ粒子自身が不純物や外乱の影響を受けづらいという性質を利用することで、ノイズに強い量子コンピュータが実現できると期待されているからです。

マヨラナ粒子が存在する場所として注目されている物質の一つが、トポロジカル超伝導体と呼ばれる特殊な超伝導体です。理論的には、マヨラナ粒子はトポロジカル超伝導体のエッジ (端部) や超伝導電流の渦である量子渦 (渦の中心で

は超伝導が消失している)に局在し、ゼロエネルギー束縛状態(ZBS)として現れることが予想されています。この局在したマヨラナ粒子の兆候であるZBSを捉えようとする実験が世界各国で行われてきました。

しかし、実験のエネルギー分解能が、通常の電子による束縛状態とマヨラナ粒子によるZBSを区別するのに不十分であったため、決定的な証拠は得られていませんでした。このためマヨラナ粒子の検出には、これらを区別できる高いエネルギー分解能での測定が必要となります。

2. 研究手法と成果

共同研究グループは、トポロジカル超伝導体の候補物質である $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ (Fe:鉄、Se:セレン、Te:テルル)に着目しました。この物質は、以前より鉄系超伝導体^[8]の一つとして知られていましたが、最近その表面で二次元のトポロジカル超伝導の発現が指摘され、超伝導転移温度^[9]が比較的高い物質としても知られるようになりました(超伝導転移温度:14.5K、約-258.7°C)。さらに、この物質における量子渦では、マヨラナ粒子によるZBSと通常の電子による束縛状態のエネルギー差が100マイクロ電子ボルト^[10](μeV 、 $1\mu\text{eV}$ は100万分の1電子ボルト)程度と比較的大きくなることが予想されており、マヨラナ粒子検出に適した物質であるともいえます。

そこで、この物質の量子渦に局在する束縛状態を詳細に調べるために、さまざまなエネルギーを持つ電子の空間分布を可視化できる走査型トンネル顕微鏡・分光法(STM/STS)^[5]を用いました(図1a)。また、マヨラナ粒子の検出には極めて高いエネルギー分解能が要求されます。STM/STSのエネルギー分解能は測定温度に比例するため、最近理研で開発した希釈冷凍機STM^[5]を用いて、80mKという超低温まで冷却することで、世界最高レベルのエネルギー分解能($20\mu\text{eV}$)での測定を可能としました。

図1bは、187ナノメートル(nm、1nmは10億分の1メートル)四方の領域で、1テスラの磁場下で得られた量子渦像です。量子渦に対応する明るいスポットが見られます。その中の一つの量子渦でエネルギーごとの電子の数(スペクトル)を測定してみると、図1cに示すように多数の束縛状態が存在し、そのうちの一つのエネルギーが完全にゼロであることが観測されました(図1cの赤矢印)。ZBSは、電荷が中性の粒子の存在を意味しており、マヨラナ粒子の兆候であると解釈できます。しかし、他の量子渦を見てみると有限エネルギーの束縛状態は見られるものの、ZBSの形跡は全く見られませんでした(図1d)。この結果は、ZBSを持つ量子渦と持たない量子渦の2種類の量子渦が共存状態にあることを示しています。

さらに、加える磁場を強くすると、ZBSを持つ量子渦の割合が減少する(1テスラで約80%あったのが6テスラで約10%まで減少する)ことも新たに発見しました。これは、磁場によってマヨラナ粒子を制御できる可能性を示しています。

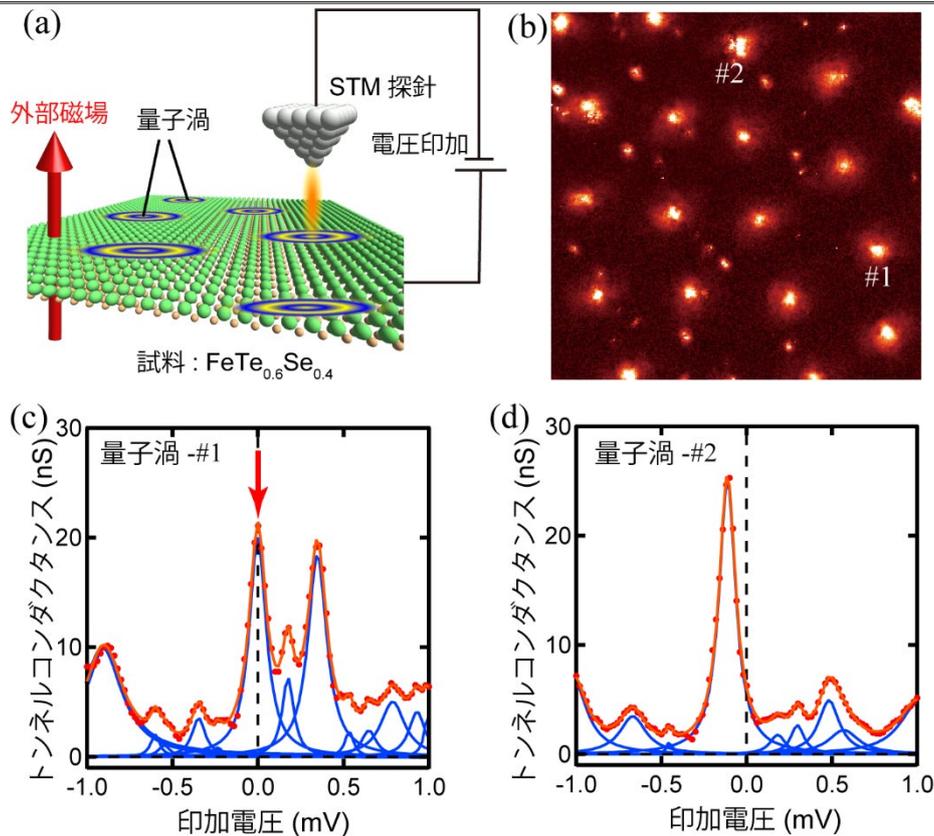


図1 STM/STS を用いたトンネルスペクトル測定とその結果

- (a) STM で量子渦におけるトンネルスペクトル測定の様子。
 (b) STM で観測された 1 テスラの磁場下における量子渦像。18 個の明るいスポットが量子渦である。
 (c) (b) の量子渦-#1 におけるトンネルスペクトル。赤点は実験結果、赤線は実験結果をマルチローレンツフィッティング^[11]した結果。青線は各ピークのフィッティング結果。赤矢印で示したピークは、印加電圧がゼロ、すなわちエネルギーがゼロの束縛状態である。
 (d) (b) の量子渦-#2 におけるトンネルスペクトル。赤点、赤線、青線は(b)と同じ。エネルギーがゼロのピークは見られない。

3. 今後の期待

今回、 $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ の量子渦でマヨラナ粒子の存在を示唆する ZBS の観測に初めて成功しました。しかし ZBS はマヨラナ粒子が持つ特徴の一つに過ぎず、この実験結果のみからはマヨラナ粒子の存在を断定できません。今後、通常の電子にはなくマヨラナ粒子のみが持つ ZBS のスピン偏極性^[12]やコンダクタンスの量子化^[13]などの特徴を捉えることで、トポロジカル超伝導体のマヨラナ粒子検出法の確立が期待できます。

また、磁性体の STM 探針を用いることで、量子渦の位置を一つ一つ独立に制御できることが通常の超伝導体で実証されています。今後、この方法をトポロジカル超伝導体に応用することで、マヨラナ粒子の実空間制御が実現される可能性があります。

さらに、磁場によってマヨラナ粒子を制御でき得る可能性が示されたことは、

マヨラナ粒子を利用したトポロジカル量子コンピュータ^[14]の実現に向けて重要な知見になると期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

Zero-energy vortex bound state in the superconducting topological surface state of Fe (Se,Te)

<著者名>

T. Machida, Y. Sun, S. Pyon, S. Takeda, Y. Kohsaka, T. Hanaguri, T. Sasagawa, and T. Tamegai

<雑誌>

Nature Materials

<DOI>

10.1038/s41563-019-0397-1

5. 補足説明

[1] トポロジカル超伝導体

通常の超伝導体は、物質が臨界温度を超えて冷却されたときに起こる、電気抵抗がゼロになる現象。超伝導状態では、電気がエネルギーを失わずに物質中を流れる。トポロジカル超伝導体の内部には、超伝導状態に特有の超伝導ギャップが開いており、そのエッジ（端）にマヨラナ粒子が現れると考えられている。

[2] 量子渦

超伝導体の重要な性質には、電気抵抗ゼロと並び、完全反磁性がある。このため、超伝導体の内部には磁場が侵入しない。しかし、ほとんど全ての化合物超伝導体は、第二種超伝導体と呼ばれるカテゴリーに属し、一定以上の磁場をかけると、その内部に磁場の侵入を許す。ただし、侵入した磁場は一様に分布するのではなく、磁束量子と呼ばれる一定の磁場を作り出すような、細長い超伝導電流の渦が多数存在する、空間的に不均一な状態が実現する。この一本一本の超伝導電流の渦を量子渦と呼ぶ。量子渦の中心では、超伝導は完全に抑制されている。

[3] マヨラナ粒子

1937年にE. Majoranaが理論的に提案した粒子で、粒子がその反粒子と区別がつかないという特徴を持っている。トポロジカル超伝導体に現れるマヨラナ粒子は通常の電子とは異なり、この性質を利用した量子コンピュータへの応用が期待されている。

[4] ゼロエネルギー束縛状態（ZBS）

超伝導状態では、超伝導ギャップ以下のエネルギーの全ての電子は、二つの電子からなるクーパー対を形成し、通常の単一電子は存在できない。第二種超伝導体に磁場を加えて導入される量子渦内では、超伝導が局所的に壊れているため、通常の単一電子が量子渦内に束縛される。この電子はあるエネルギーに局在し、束縛状態を形成する。

通常の超伝導体では、この束縛状態は有限のエネルギーに現れる。他方、トポロジカル超伝導体の場合、量子渦内には通常の単一電子のみならず、電荷が中性のマヨラナ粒子も束縛されている。このためゼロエネルギーにマヨラナ粒子由来の束縛状態が形成され、これをゼロエネルギー束縛状態と呼ぶ。ZBSはZero-energy Bound Stateの略。

[5] 走査型トンネル顕微鏡法 (STM)、走査型トンネル分光 (STS)、希釈冷凍機 STM

STMは、先端を尖がらせた金属の針(探針)で物質の表面をなぞるように走査し、探針の高さをマッピングすることで、物質表面の凹凸を原子スケールで観察することができる顕微鏡。探針位置を固定し、電流-電圧特性を測定すると、その位置において、どのようなエネルギーを持った電子がどのくらい存在するかを知ることが可能である。それは、走査型トンネル分光(STS)と呼ばれている。STMはScanning Tunneling Microscope、STSはScanning Tunneling Spectroscopyの略。希釈冷凍機STMとは、液体の ^3He と ^4He のエントロピー差を利用した冷却法である希釈冷凍を使用することで、100 mK以下の超低温環境で測定が行えるSTMである。

[6] フェルミ粒子、ボーズ粒子、粒子の交換側

自然界に存在する粒子は、主にフェルミ粒子とボーズ粒子に分類される。フェルミ粒子は、粒子の交換に対して全波動関数の符号が変わるフェルミ・ディラック統計と呼ばれる量子統計(粒子の交換側)に従う。例として、電子、陽電子、中性子などがこれに属する。一方、ボーズ粒子は、粒子の交換に対して全波動関数の符号が変化しないボーズ・アインシュタイン統計に従う。例として、フォノン、マグノン、超伝導体中のクーパー対などがこれに属する。フェルミ・ディラック統計、ボーズ・アインシュタイン統計については補足説明[14]を参照。

[7] 反粒子

ある粒子に対して、質量やスピンは同じで電荷が逆の粒子を反粒子と呼ぶ。電子に対する陽電子がこれにあたる。

[8] 鉄系超伝導体

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発見された $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ と、それに関連した超伝導体の総称。鉄の周りにヒ素、リン、セレン、テルルなどが配位したものを単位として、それが二次元的に配列したシートを基本構造として持つ。 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ の超伝導転移温度は26Kであるが、Laをイオン半径の小さな希土類元素に置き換えると50K以上にまで超伝導転移温度が上昇する。銅酸化物高温超伝導体に次ぐ高い温度で超伝導を示す物質群である。

[9] 超伝導転移温度

超伝導状態が発現する臨界温度。超伝導体をこの温度以下まで冷やすと超伝導状態が実現する。

[10] 電子ボルト(eV)

エネルギーの単位の一つ。自由空間中の電子を電圧 1 V で加速させたとき、電子が持つエネルギーが 1 eV である。1 eV はおよそ 1.602×10^{-19} J (J: ジュール)。

[11] マルチローレンツフィッティング

複数のピーク構造を持つデータを複数のローレンツ関数の重ね合わせでフィッティングすること。

[12] スピン偏極性

トポロジカル超伝導体の量子渦のマヨラナ粒子による ZBS は、スピンアップ状態の粒子数がスピンドアウン状態の粒子数よりも多くなること（スピン偏極性）が理論的に予想されている。

[13] コンダクタンスの量子化

マヨラナ粒子の ZBS を STM 探針と試料間の距離を変えながら測定すると、観測されるトンネルコンダクタンスが量子化されたある一定値になるという理論的に予想されている現象。通常の電子による束縛状態ではこれは起こらない。ここでいうコンダクタンスとは、STM の探針と試料の間に電圧 V を印可した際に、探針-試料間に流れる電流 I を印可電圧 V で微分した dI/dV のことである。

[14] トポロジカル量子コンピュータ

マヨラナ粒子のような、非可換統計に従う粒子同士の交換操作による論理ゲートを用いて行う量子計算。従来の量子計算の最大の問題点である環境ノイズに対する耐性が極めて高いことから、次世代の量子計算技術として期待されている。非可換統計とは、粒子の交換によって波動関数の位相以外も変わる量子統計である。一方、従来の基本粒子であるボーズ粒子やフェルミ粒子が従うボーズ・アインシュタイン統計やフェルミ・ディラック統計では、粒子同士の交換によって波動関数の位相以外は変化しない。

6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせ下さい
 理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発物性計測研究チーム
 研究員 町田 理 (まちだ ただし)
 チームリーダー 花栗 哲郎 (はなぐり てつお)
 TEL : 048-462-1111 (内線 8813) (町田) FAX : 048-462-4656 (町田)
 E-mail : tadashi.machida[at]riken.jp (町田)

東京工業大学 科学技術創成研究院 フロンティア材料研究所
 准教授 笹川 崇男 (ささがわ たかお)
 東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻
 准教授 為ヶ井 強 (ためがい つよし)



町田 理

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当
TEL : 048-467-9272 FAX : 048-462-4715
E-mail : ex-press[at]riken.jp

東京工業大学 広報・社会連携本部 広報・地域連携部門
TEL : 03-5734-2975 FAX : 03-5734-3661
E-mail : media[at]jim.titech.ac.jp

東京大学 大学院工学系研究科 広報室
TEL : 03-5841-6295 FAX : 03-581-0529
E-mail : kouhou[at]pr.t.u-tokyo.ac.jp

科学技術振興機構 広報課
TEL : 03-5214-8404 FAX : 03-5214-8432
E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

<JST事業に関すること>

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ
中村 幹 (なかむら つよし)
TEL : 03-3512-3531 FAX : 03-3222-2066
E-mail : crest[at]jst.go.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。