

「トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ粒子の検出と制御」

研究期間：2019年10月～2022年3月

研究者：町田 理

1. 研究のねらい

情報科学分野に革新をもたらす量子計算技術の確立とその普及は、超スマート社会の実現に向けた重要な指針の一つである。近年、「粒子=反粒子」という特異な性質を持ったマヨラナ粒子を基本構成要素とした、外乱に強固なトポロジカル量子計算が提案され、次世代の量子計算技術として期待されている。このトポロジカル量子計算の実現のためには、固体中でマヨラナ粒子を実現・検出・制御する必要があり、これらが現在の固体物理における一つの課題となっている。マヨラナ粒子がトポロジカル超伝導体のエッジや渦糸芯に局在して現れることから、現在までに多様なトポロジカル超伝導体候補が開拓され、マヨラナ粒子実現の舞台が整いつつある。一方、検出については、マヨラナ粒子の兆候が準粒子励起スペクトルにおけるゼロエネルギー励起(マヨラナゼロモード)として現れることから、局所的に分光測定が可能な、走査型トンネル顕微鏡(STM)を用いた検出実験が行われてきた。しかし、超伝導体のエッジや渦糸芯では、通常の電子や正孔による“自明”な束縛状態がゼロエネルギー近傍に現れうる可能性があり、この“自明”な束縛状態とマヨラナゼロモードの明確な区別ができていないことがマヨラナ粒子の検出における最大の問題点となっている。このため、できる限り高いエネルギー分解能での局所分光測定が必要となる。本研究のねらいの一つは、世界最高レベルのエネルギー分解能を有する希釈冷凍機STMを用いて、ゼロエネルギー励起の検出のみならず、マヨラナゼロモードのスピン偏極性やコンダクタンスの量子化等のマヨラナ粒子の特徴を同時に捉え、マヨラナ粒子の検出を行うことである。また、マヨラナ粒子が常に対をなす性質や母体の超伝導体のトポロジー制御を介したマヨラナ粒子の制御法の開拓も本研究のねらいである。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、世界最高レベルのエネルギー分解能(20 μeV)を有する希釈冷凍機STM(理研 創発物性計測研究チーム所有)を主たる実験装置として用い、一次元・二次元トポロジカル超伝導体の端や渦糸芯のマヨラナ粒子の検出と磁場による制御を目指すものである。研究初段階で、マヨラナ粒子制御実験に適した一次元及び二次元トポロジカル超伝導体作製用超高真空チャンバと磁場制御に必要なベクトルマグネットを導入し、超薄膜超伝導体作製、磁性原子操作等の実験技術の確立を行った(研究テーマA)。

マヨラナ粒子検出法の開拓(研究テーマB)については、表面で二次元トポロジカル超伝導が期待されるFe(Se,Te)の渦糸芯を対象とし、マヨラナゼロモードの量子化コンダクタンスの検証を行ったが、明確にマヨラナ粒子の存在を示す結果は得られなかった。また、理論的に予想されている渦糸芯マヨラナ粒子のスピン偏極性の検証を目指し、高いスピン分解能を有す

る Yu-Shiba-Rusinov(YSR)探針を作製し、探針先端で形成される YSR 状態の磁場効果を調べた。その結果、異なる量子相にある二種類の YSR 状態が存在し、それらが異なったゼーマン効果を示すことを明らかにした(成果リスト-原著論文-1)。

一方で、マヨラナ粒子の制御に関しては、一次元トポロジカル超伝導体における面内回転磁場による制御法をみすえた研究に従事した(研究テーマ C)。本研究では、この制御法で必須となる、面内磁場に強固な超伝導基板の作製を行った。具体的には、面内臨界磁場が大きな単層超伝導体に着目し、Si(111)表面上の単層 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb)の超伝導状態を詳細に調べた。その結果、この系の超伝導性が、僅かな化学ポテンシャルシフトで誘起されるリフシツ転移と関係していることを提案した(成果リスト-原著論文-2)。当初計画の一次元磁性原子鎖の作製までは到達することができなかったが、今後の研究展開において礎となる知見を得た。

(2) 詳細

研究一テーマ A「1次元・二次元トポロジカル超伝導体作成・顕微分光装置の構築」

マヨラナ粒子の検出において、高いエネルギー分解能でゼロエネルギー励起を観察することが最低の条件である。よって、超低温希釈冷凍機 STM が非常に強力なプローブとなるが、これに加えて、トポロジカル超伝導体の作製も研究遂行において重要な要素である。本研究では、マヨラナ粒子の検出のみならず制御も見据えており、理論的に制御法が提案されている二次元トポロジカル超伝導体ナノアイランドや一次元ナノワイヤといった人工ナノ構造を研究対象としている。STM の表面感受性を考慮すると、これらの人工構造作製から STM 測定までを超高真空中で一貫して行う必要がある。さらに、後述の研究テーマ C では面内回転磁場によるマヨラナ粒子の制御を目指しているため、希釈冷凍機 STM にベクトルマグネットの導入も必要である。研究初期段階で、希釈冷凍機 STM に人工ナノ構造作製用超高真空チャンバ及びベクトルマグネットを融合させた STM システムの設計・構築を行った。研究期間内に発生したコロナウィルス感染の影響やベクトルマグネットの初期不良により、システムの完成が当初予定の 2020 年度末から約 1 年程度遅れてしまった。図 1(a),(b)は、構築したシステムを用いて行った原子操作の一例で、Cu(111)表面で人工的に Fe 原子のナノワイヤ・ナノリングを作製した結果である。また、ベクトルマグネットについても、バルクの NbSe₂ に斜めに磁場を印可した際に期待される面内磁場成分方向に延びた

渦糸芯状態の観察(図 1(c))により正常動作を確認した。

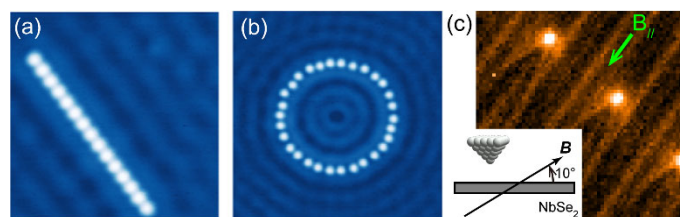


図 1.(a)(b) Cu(111)表面上の Fe 原子鎖とナノリング。
(c)バルク NbSe₂ における斜めに磁場下のゼロバイアスコンダクタンス像。

研究一テーマ B「二次元トポロジカル超伝導体の渦糸芯におけるマヨラナ粒子検出」

マヨラナ粒子の検出においてゼロエネルギー励起は必要条件の一つに過ぎないため、その存在証明には、マヨラナ粒子が有する他の特徴を捉える必要がある。本研究では、既にマヨラナゼロモードと矛盾しないゼロバイアスピーク(ZBP)が観察されているFe(Se,Te)の渦糸芯を研究対象とし、マヨラナゼロモードの量子化コンダクタンスの検証を行った。マヨラナ粒子がトンネル接合内に存在する場合、完全アンドレーフ反射が生じ、絶対零度且つ無限寿命の極限では ZBP のコンダクタンスが $G_0=2e^2/h$ に量子化することが知られている。実際には、有限温度や有限寿命の効果によってコンダクタンスは接合障壁に依存し、プラトー構造を示す。このプラトー構造の有無を検証すべく、STM 探針を試料へと近づけ(接合障壁を減少させ)ながら ZBP のコンダクタンスを測定した結果を図 2 に示す。探針の高さが-120 pm でコンダクタンスの急峻な立ち上がりが見られる。これは、理論で予想されているようなプラトーが見られる前に、トンネル領域からポイントコンタクト領域へと接合が転移していることを示しており、この方法では、マヨラナ粒子の有無を決定することは難しいことが明らかとなった。

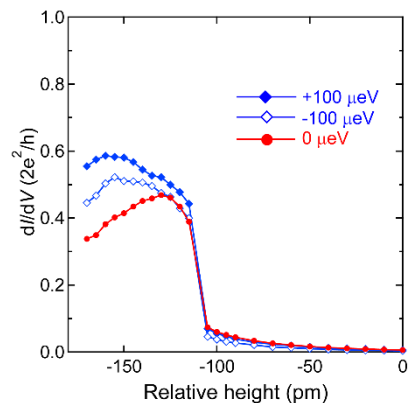


図 2. Fe(Se,Te)の渦糸芯束縛状態におけるトンネルコンダクタンスの探針高さ依存性. 青は $\pm 100 \mu\text{eV}$, 赤はゼロエネルギーでの束縛状態.

本研究では、マヨラナ粒子のもう一つの特徴であるスピン偏極性の検証を見据え、高いスピン分解能を有する YSR 探針の作製とその評価にも着手した。この探針は、超伝導探針の先端に、磁性原子を付着させたものである。この場合、磁性原子は超伝導体における磁性不純物として働き、探針先端の状態密度には、超伝導ギャップ内に YSR 状態と呼ばれる不純物束縛状態が正負対称のエネルギーに対となって現れる。この YSR 状態は磁性原子による時間反転対称性の破れにより、正負のエネルギーで互いに逆向きに 100%ス

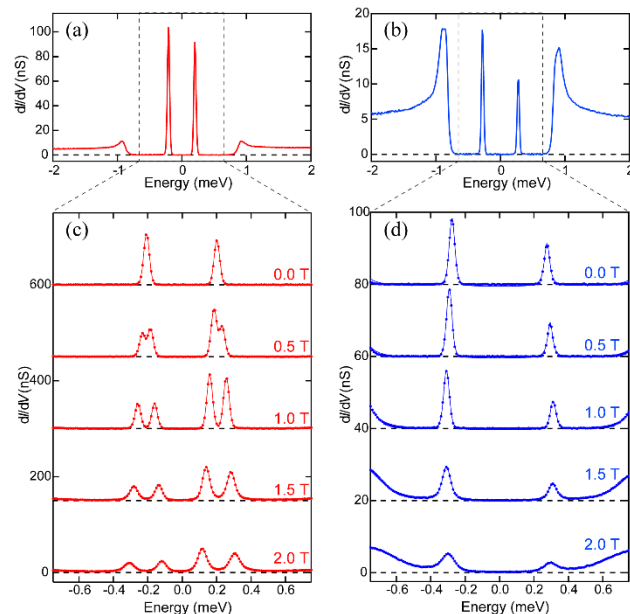


図 3, 典型的な二種類の YSR 探針におけるトンネルスペクトルの磁場依存性.

ピン偏極した状態となる。このような完全にスピン偏極した状態を STM 探針の状態密度として用いることで、前例にないスピン分解性能が実現する。図 3(a),(b)は、実際に超伝導 Nb 探針の先端に磁性原子 Fe を付着させた状態での Cu(111)表面におけるトンネルスペクトルを二種類示している。どちらも超伝導ギャップ内に YSR 状態が形成されている。本研究では、渦糸

芯のマヨラナ粒子に着目しており、実際の測定の前に YSR 状態の磁場効果を調べておく必要がある。図 3(c),(d)は、それぞれ図 3 (a),(b)の YSR 探針の磁場依存性である。一見して解るように、Zeeman 分裂を示す場合(図 3(c))と Zeeman シフトを示す場合(図 3(d))の、二種類の Zeeman 効果の存在が明らかとなった。どちらの場合でも、各ピークが 100%スピン偏極していることも確認でき、今後のマヨラナ粒子のスピン偏極性の検証実験へと発展させる予定である。

研究一テーマ C「面内回転磁場によるマヨラナ粒子制御を見据えた単層超伝導基板探索」

一次元トポロジカル超伝導体のエッジのマヨラナ粒子の制御に関する研究は、トポロジカル量子計算の実装という観点で、最も理論研究が進んでいる系である。本研究ではスピン軌道相互作用が強い超伝導体上の磁性原子ナノワイヤに焦点をあて、ナノワイヤに誘起される超伝導の面内磁場によるトポロジー制御を利用したマヨラナ粒子制御を一つの目標に掲げた。

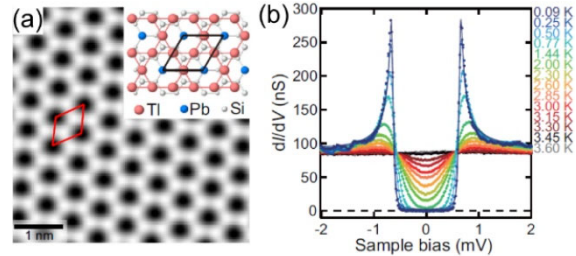


図 4, (a) 単層 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb)の STM 像と(b)トンネルスペクトル

この実現には、基板となる超伝導体が面内外部磁場に対して強固である必要がある。これまでの一次元磁性体ナノワイヤの研究ではバルクの超伝導体が基板として用いられており、軌道対破壊効果によって超伝導臨界磁場が著しく抑制され、面内磁場によるマヨラナ粒子の制御実験は行われてこなかった。ここでは、このテーマの第一段階として、基板の超伝導体を単層化させることで軌道対破壊効果が抑制されることに着目し、超伝導体 Si(111)表面上の単層 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb)の作製とその超伝導状態の評価を行った。

本物質は、重元素である Tl と Pb から構成され、大きなスピン軌道相互作用を有する超伝導体である。実際、Si 基板表面と単層 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb)との接合における面直方向の空間反転対称性の破れとスピン軌道相互作用の協調によって、バンド構造は Rashba 分裂している。図 4(a)は、典型的な STM 像で、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb)の Tl-trimer によるハニカム状の構造が確認できる。ゼロ磁場下及び渦糸芯でのトンネル分光測定から s 波の従来型超伝導状態($T_c \sim 3.3$ K)が実現し(図 4(b))、一次元磁性体ナノワイヤにおけるマヨラナ粒子制御に適した超伝導基板であることも確認できた。一方で、この結果は非従来超伝導の兆候を示す先行研究とは矛盾するものである。本研究では、その要因を調べるために、準粒子干渉パターンの測定を行なった。その結果、この系の化学ポテンシャルは、フェルミ面のトポロジーが変わるリフシツツ転移点近傍に位置し、フェルミ面のトポロジー変化と超伝導状態の間に何らかの関連性があることが解った。この関連性の背後にある原理については今後さらなる研究が必要である。

3. 今後の展開

本研究成果は、マヨラナ粒子の検出と制御の実現のための基礎技術を確認したものである。検出については、高いスピン分解性能を可能とする YSR 探針を開発し、制御については、面内外部磁場による制御を見据え、面内磁場に強固な単層超伝導体を作成した。今後はこれらの検出手法、

単層超伝導基板を用いてマヨラナ粒子の検出・制御法の確立へと研究の発展が見込まれる。マヨラナ粒子の検出と制御の最終的な社会実装形態はトポロジカル量子計算の実現であるが、それには、マヨラナ粒子からなる単一量子ビット操作・量子状態読み取りの実現、量子ビットの集積化といったプロセスを経る必要がある。トポロジカル量子計算実現への研究は、未だに検出の段階にあり、確固たる検出法が確立されていない。このため、制御法以降の研究が大きく立ち遅れているのが現状で、トポロジカル量子計算の普及には、大きなブレイクスルーがない限り少なくとも四半世紀は時間を要すると推測する。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

前述の様に、本研究では大分して、以下3つの研究テーマを掲げた。研究一テーマA「1次元・二次元トポロジカル超伝導体作成・顕微分光装置の構築」では、新たな超高真空チャンバ・3軸ベクトルマグネットの設計・導入を行った。当初の計画通りの性能を有するシステムを構築することができた。研究一テーマB「二次元トポロジカル超伝導体の渦糸芯におけるマヨラナ粒子検出」に従事した。この研究では、マヨラナ粒子の存在を断言できる結果は得られていないものの、マヨラナ粒子のスピンの偏極性を極めて高いスピン分解能で捉えられるYSR探針の開発に成功した。研究一テーマC「面内回転磁場によるマヨラナ粒子制御を見据えた単層超伝導基板探索」では、面内外部磁場に強固な単層超伝導体Si(111)表面上の単層 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb)の作製に成功し、その超伝導状態の評価を行った。前述の様に、前者ではリフシツト転移と超伝導状態の関連性を提案した。当初の計画通り、マヨラナ粒子の検出法・制御法の確立までには至らなかったが、その礎となる技術・知識を得ることができた。また、YSR状態のZeeman効果を始め、当初予定していなかった成果も得ることができた。これらを総合的に鑑みると、当初の研究目的に対する達成度は6~7割程度と考えられる。

研究成果の科学技術及び社会経済への波及効果

本研究は、マヨラナ粒子のトポロジカルな性質に基づく外乱に強いトポロジカル量子計算の礎となるものであり、今後、マヨラナ粒子の制御へと研究が進展すれば、トポロジカル量子計算実現を目指す研究が大きく前進する。これによって、近い将来限界を迎える従来コンピュータにとってかわる量子計算が実現すると期待される。さらに、量子計算の実現は、従来コンピュータでは困難であった理論シミュレーションを可能にするため、ほぼ全ての科学分野へ影響を及ぼす。量子計算技術への影響に加えて、今後、未知の粒子であるマヨラナ粒子の性質を実験的に解明できれば、その実験結果はトポロジカル材料科学のみならず、素粒子物理、量子統計物理、冷却原子等の分野への学術的波及効果も期待できる。特に、マヨラナ粒子は、本来素粒子物理で注目されており、素粒子物理の実験が物質中でも実践できる道も開け、将来的には素粒子分野との学術上の相乗効果も期待できる。

また、本研究では、高スピン分解能トンネル分光を可能とするYSR探針の作製に成功し、二種類をZeeman効果の存在を示した。この成果は、マヨラナ粒子のスピンの偏極性のみならず、今後の表面科学、スピン物性物理において新たな実験手法を与える。さらに、極最近、100%スピン偏極したYSR状態を利用した新たな量子ビット(YSR-Qbit)が理論的に提案されていることを鑑みると、YSR状態の基礎的性質を明らかにした本研究成果は、新たな量子計算技術の開拓にも波及する

可能性を秘めている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:2件

1. T. Machida, Y. Nagai, and T. Hanaguri ” Zeeman effects on Yu-Shiba-Rusinov states” Physical Review Research (2022) 4, 033182
トポロジカル超伝導体の渦糸芯のマヨラナ粒子に期待されるスピン偏極状態を捉えることを見据え、極めて高いスピン分解能が期待される Yu-Shiba-Rusinov(YSR)探針の作製を行い YSR 状態の磁場依存性を評価した。その結果、Zeeman 分裂を示すものと Zeeman shift を示す、二種類の Zeeman 効果の存在を明らかにした。これらは YSR 状態そのものにスピン一重項状態と二重項状態の二種類の基底状態が存在し、これらの磁場応答として解釈される。
2. T. Machida, Y. Yoshimura, T. Nakamura, Y. Kohsaka, T. Hanaguri, C.-R. Hsing, C.-M. Wei, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, and A. Takayama ” Superconductivity near the saddle point in the two-dimensional Rashba system Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb)”, Physical Review B (2022) 105, 064507
Si(111)表面上の単層 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb)はスピン軌道相互作用が強い二次元超伝導体であり、一次元磁性体ナノワイヤにおけるマヨラナ粒子の面内外部磁場制御に適した系である。この系における高エネルギー分解能 STM 分光によって、この系の超伝導性が僅かな化学ポテンシャルシフトで誘起されるリフシツ転移と関係していることを提案した。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0 件(特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

解説記事

町田 理

「超低温走査型トンネル顕微鏡を用いたトポロジカル超伝導体におけるマヨラナ準子探索」

真空と表面 2022 年 Vol.65, 53-58 (Vacuum and Science)

国際会議(招待講演)

“Nature of zero-energy vortex bound states in the topological superconductor Fe(Se,Te)”

Materials Research Meeting 2019

“Zero-energy vortex bound states in the topological superconductor Fe(Se,Te)”

The 32nd International symposium on superconductivity

“Searching for Majorana quasiparticles in iron-based superconductors”

The Janet Das Sarma Conference Series: Searching for Topological Majorana zero modes

“Detecting signatures of Majorana quasiparticles at the vortex cores of topological superconductor Fe(Se,Te)”

The 6th Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics, and the 5th Symposium on International Joint Graduate Program in Materials Science