

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800199

研究課題名(和文)トポロジカル超流動 ^3He のダイナミクスへの微視的アプローチ研究課題名(英文)Microscopic theory for the nonequilibrium dynamics of the topological superfluid ^3He

研究代表者

水島 健 (Mizushima, Takeshi)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：50379707

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：非従来型超伝導・超流動体のトポロジカル構造と対称性の不可分な関係を明らかにし、その帰結として現れる低エネルギー準粒子励起の特異な性質を示した。具体的には、重い電子系超伝導UPt₃やトポロジカル絶縁体を母物質とした超伝導 CuxBi₂Se₃ において結晶対称性によって守られたマヨラナ粒子が存在することを指摘し、その異常な磁気異方性や奇周波数クーパ対相関の背後にあるトポロジーと対称性の関係を明らかにした。さらに、CuxBi₂Se₃の表面状態を詳細に議論することで、この物質における一連の実験結果を最もよく説明する超伝導対関数は奇パリティトポロジカル状態であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In this work, we theoretically investigated the interplay of symmetry and topology in unconventional superconductors and superfluids. We here unveiled the emergence of low-energy quasiparticles which possess nontrivial properties attributed to the symmetry and topology. In particular, Majorana fermions which are hallmark of nontrivial topology appear in the heavy-fermion superconductor UPt₃ and the superconducting topological insulator CuxBi₂Se₃. It was shown that the intertwining of symmetry and topology attributed to the unconventional gap functions brings about anomalous magnetic response and Cooper pair correlation of the Majorana fermions. Furthermore, we demonstrated that the most promising candidate of the gap function in CuxBi₂Se₃ is an odd-parity topological state, which well explains recent experimental results.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジカル超伝導 超流動 マヨラナ粒子

1. 研究開始当初の背景

近年、トポロジを基軸とした新しい物質観が広がりを見せている。ここでいうトポロジとは電子状態の「連続的にほどこつのできない捻り」のことであり、輸送係数の量子化やギャップレス電子状態として顕在化する。量子ホール効果やベリー位相の発見に端を発するこの新しい物質観は、対称性の破れを伴わない量子現象を説明してきた。対称性の破れの好例である超伝導・超流動にもこの概念は適用され、マヨラナ粒子などのトポロジカルな背景を持つ準粒子がもたらす新しい機能性に期待が集まっている。

本研究課題申請時は、まさにトポロジカルな物質観が様々な超伝導体に浸透しつつあった。超流動³He などではすでに、超流動状態が保っている対称性と非自明なトポロジカル構造の存在との不可分な関係性が明らかにされつつあったが、超伝導一般にはトポロジと対称性との関わりは明らかではなかった。また、超流動³He-B ではその非自明なトポロジカル構造を反映して表面マヨラナ粒子が現れることが理論的に示唆されており、さらにその磁気的性質がイジング的な強い一軸異方性を示すことがわかってきた。しかし、超伝導全体を俯瞰したときに、どのような条件で表面マヨラナ粒子が出現し、さらに、イジング的な異常磁気応答を示すのかわらかではなかった。

水島は、本研究課題開始時まで、超流動³He を舞台として、バルクに内在する非自明なトポロジカル構造とその背後にある対称性の役割についての知見を蓄えつつあった。本研究課題では、このような知見を超伝導体へフィードバックすることで、重い電子系超伝導のような非従来型超伝導体のトポロジカル構造について理解し、その磁気応答や輸送現象などの動的量子現象について明らかにしようと考えた。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、非従来型超伝導・超流動体に内在する非自明なトポロジカル構造とその背後にある対称性の不可分な関係を明らかにし、その帰結として現れるマヨラナ粒子の性質を明らかにすることにある。さらに、トポロジカルな起源を持つ準粒子が媒介する磁気応答や動的応答を理解することで、トポロジカル超流体に特有な動的量子現象を予言していくことも目的とする。

研究課題当初は、主に超流動³He でのマヨラナ粒子のダイナミクスに焦点を当てていたが、研究を進めていく中で、マヨラナ粒子の性質を理解するためにはトポロジと対称性の関係性を明確にすることが不可欠であるとの認識に至った。そこで、以下のような具体的な研究目的を考えた：(1)非従来型超伝導体の対称性とトポロジ。(2)マヨラナ粒子の非可換統計性と対称性の役割。(3)トポロジカル超流体における量子輸送現象。

3. 研究の方法

本研究課題のターゲットであるトポロジカル超流体のダイナミクスには、トポロジカルな背景を持つ準粒子に加えて、内部自由度を持つ超伝導秩序変数の揺らぎも大きな影響を与える。本研究課題を効果的に遂行するためには、トポロジと対称性に基づく解析に加えて、フェルミ液体理論を基盤とした微視的理論を用いた。後者は、準古典近似を施すことで定量的かつ扱いやすい理論を構築することが可能であり、超伝導・超流動研究全般によく用いられている手法である。このように、本研究課題では、トポロジと対称性に基づく俯瞰的な視野に加えて、微視的理論を併用することで、トポロジカル超流体の動的現象を多面的に理解することを目指す。

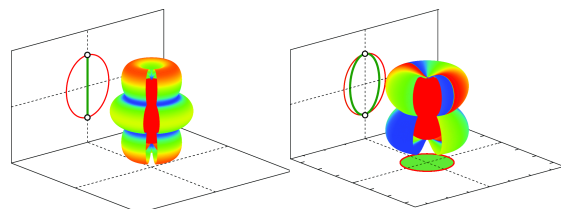
4. 研究成果

本研究課題で得られた主な成果は以下のとおりである。

(1) 異方的超伝導体の対称性とトポロジ

重い電子系超伝導体 UPt_3 は超流動³He と類似した性質を示す典型的な異方的超伝導である。しかし、その超伝導対関数については未だ確定しておらず、議論的となっている。そこで、本研究課題では、トポロジカルな観点から UPt_3 の超伝導特性を再考し、超伝導対関数を確定することのできる実験手法を提案した。 UPt_3 の対関数の有力な候補は時間反転対称性を破った E_{2u} 状態か、時間反転対称性を保つ E_{1u} 状態である。前者はワイル型超伝導であり、後者は結晶対称性によって守られたトポロジカル超伝導体であることがわかった。特に後者の場合では、結晶対称性とトポロジの帰結として、表面マヨラナ粒子がイジング的な磁気違法性を持つことが示された。一連の成果から、 E_{1u} 状態ではトンネルコンダクタンスに強い磁気異方性が見られることを指摘した。

さらに、トポロジカル絶縁体を母物質とした超伝導体 $Cu_xBi_2Se_3$ のトポロジカル構造についても詳細に調べた。この物質の超伝導特性については、バルク・表面ともにさまざまな実験がなされているが、コンセンサスは得られていなかった。そこで本研究課題では、この超伝導体の表面状態を詳細に調べること、一連の実験結果がトポロジカルに非自明な構造を伴う奇パリティ超伝導状態によ



図： E_{1u} (左) と E_{2u} 状態 (右) のギャップ構造と表面状態

つてのみ説明することができることを示した。これまで、偶パリティ超伝導状態の表面は自明であると思われていたが、母物質の非自明なトポロジカル構造の帰結として現れる表面ディラック粒子と偶パリティ超伝導が表面において互いに結合し、非自明な表面状態を形成することがわかった。この結果は一連の実験結果と矛盾しており、ゆえに、この物質の超伝導特性は奇パリティ状態に由来すると考えられる。

さらに、時間反転対称性をもつ奇パリティトポロジカル超伝導・超流動体に現れる表面マヨラナ粒子の磁気応答について、奇周波数クーパー対相関という観点から調べた。表面マヨラナ粒子は結晶対称性などの離散対称性によって守られている。磁場などを印加することで対称性が破られ、表面マヨラナ粒子は質量ギャップを獲得する。この質量ギャップの獲得とともに、マヨラナ粒子のもつ奇周波数クーパー対相関が磁場応答に影響を及ぼす。この結果、質量ギャップをもつマヨラナ粒子は常磁性的な磁気応答を示すことがわかった。超伝導・超流動体にとって常磁性応答は異常であり、ゆえにこの系に内在する非自明なトポロジカル構造は磁気応答を観測することで検出することができる。

(2)マヨラナ粒子の非可換統計性と対称性

バルクに非自明なトポロジーが内在する帰結として、系の表面や量子渦（磁束渦）などに局在したマヨラナ粒子が現れる。マヨラナ粒子がスピンなどの内部自由度を持たない場合は非可換統計性を示すことが指摘されていた。非可換統計性を持つマヨラナ粒子はトポロジカル量子演算のプラットフォームとして注目されている。しかしながら、現実の系ではスピン自由度などを持つ場合が多く、ゆえに、内部自由度を持つマヨラナ粒子が非可換統計性を示すのかという問いに答えることは重要である。

本課題では、超流動³He-Aの量子渦に束縛されたマヨラナ粒子に注目し、その統計性を考えた。このマヨラナ粒子はスピン自由度を持つが、系がある鏡映対称性を満たすときはスピン自由度を持つマヨラナ粒子も非可換統計性を示すことがわかった。この研究成果により、トポロジカル量子演算への応用の可能性を秘めたマヨラナ粒子の統計性に対する対称性の役割が明らかとなった。

(3)トポロジカル超流体における量子輸送現象

異方的超流体の典型例であるバルク超流動³Heの熱・スピンなどの輸送現象については長年の研究の膨大な蓄積がある。フルギャップ構造を持つB相での低温輸送現象は主に超流動秩序変数の集団振動モードが媒介することが知られている。一方で、³He-Bを制限空間中に閉じ込めると表面などの影響が無視できなくなる。このような状況では、

集団振動モードというボソン励起以外にも表面に局在したトポロジカルな準粒子励起が存在する。そのため、ボソン励起とトポロジカルなフェルミオン励起との相互作用の結果、制限空間中でのトポロジカル超流体における量子輸送現象はバルクでのそれから劇的に変わるであろう。このような状況は異方的超伝導体を用いた接合系の界面でも生じる。

本研究課題では、このようなトポロジカル超流体での量子輸送現象の解明に向けて、制限空間中における超流動³Heの集団振動モードを解析した。バルクでは南部・ゴールドストーンモードやヒグス（振幅）モード以外にも、Squashingモードと呼ばれる低エネルギーボソン励起モードが存在することが知られている。本研究成果により、制限空間中では表面に局在したSquashingモードも存在することが明らかとなった。制限空間中の量子輸送現象には、表面に局在したSquashingモードの役割が顕著になるであろう。一方で、その存在領域はトポロジカル準粒子励起であるマヨラナ粒子の波動関数と完全にオーバーラップするため、両者の相互作用は不可避であることが予想される。現在は一連の研究成果を取りまとめながら、将来的なトポロジカル超流体での量子輸送現象の解明に向けて、マヨラナ粒子とボソン励起モードとの結合についての知見を得ることを目指している。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 9 件)

1. Y. Tsutsumi, M. Ishikawa, T. Kawakami, T. Mizushima, *et al.*, “ UPt_3 as a Topological Crystalline Superconductor”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 113707 (2013) [pp. 1-5].
2. T. Mizushima, M. Takahashi, K. Machida, “Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov states in two-band superconductors”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 023703 (2014) [pp. 1-5].
3. M. Sato, A. Yamakage, T. Mizushima, “Mirror Majorana zero modes in spinful superconductors/superfluids: Non-abelian anyons in integer quantum vortices”, *Physica E* **55**, 20-24 (2014).
4. T. Mizushima, “Odd frequency pairing and Ising spin susceptibility in time-reversal-invariant superfluids and superconductors”, *Phys. Rev. B* **90**, 184506 (2014) [pp. 1-15].
5. T. Mizushima, A. Yamakage, M. Sato, Y. Tanaka, “Dirac-fermion-induced parity mixing in superconducting topological insulators”, *Phys. Rev. B* **90**, 184516 (2014) [page 1-11].
6. M. Takahashi, T. Mizushima, K. Machida, “Multiband effects on Fulde-Ferrell-Larkin-

Ovchinnikov states of Pauli limited superconductors”

7. T. Mizushima, Y. Tsutsumi, M. Sato, K. Machida, “Symmetry Protected Topological Superfluid $^3\text{He-B}$ ”, J. Phys.: Condensed Matter **27**, 113203 (2015) [page 1-56, Invited Review Paper].
8. S. Sasaki and T. Mizushima, “Superconducting doped topological materials”, Physica C **514**, 206-217 (2015) [Invited Review Paper].
9. T. Mizushima, *et al.*, “Symmetry Protected Topological Superfluids and Superconductors: From the Basics to ^3He ”, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 022001 (2016) [page 1-74, Invited Review Paper].

[学会発表](計 32 件)

1. T. Mizushima, “Surface Squashing Modes in Topological Superfluid $^3\text{He-B}$ ”, Grand Challenges in Quantum Fluids and Solids, 2015年8月7-9日, Buffalo, USA, 【招待講演】
2. 水島健, 「超流動 ^3He と冷却原子気体で広がるトポロジカル超流動の物理」日本物理学会秋季大会 2015年9月16-19日, 関西大学, 大阪府【シンポジウム講演】
3. T. Mizushima, “Surface excitations in topological superfluid $^3\text{He-B}$ ”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, 2015年8月9-15日, Niagara Falls, USA, 【招待講演】
4. T. Mizushima, “Topological superconductivity of doped topological insulators”, EMN Qingdao Meeting 2015, 2015年6月14-17日, Qingdao, China 【招待講演】
5. T. Mizushima, “Topological Phase Transitions in Superfluids and Superconductors”, International Conference on Topological Quantum Phenomena, 2014年12月9-15日, Kyoto 【招待講演】
6. T. Mizushima, “Surface excitations in topological superfluid $^3\text{He-B}$ ”, Asia-Pacific Workshop on Strongly Correlated System, 2014年10月9-11日, Beijing, China 【招待講演】
7. T. Mizushima, “Confinement effect on Anderson-Higgs modes in superfluid $^3\text{He-B}$ ”, ULT2014: Frontiers of Low Temperature Physics, 2014年8月14-19日, Argentina【招待講演】
8. T. Mizushima, “Symmetry Protected Topological Superfluids and Superconductors”, RIKEN-APW Joint Workshop: Highlights in Condensed Matter Physics, 2014年1月23-25日, Wako【招待講演】
9. T. Mizushima, “Symmetry Protected Topological Superfluids and

Superconductors”, Aspen Workshop: Multi-Component Many-Body Systems, 2013年8月25-9月15日, Aspen, USA【招待講演】

10. 水島健, 「超流動 $^3\text{He-B}$ の磁場中トポロジカル量子相転移」日本物理学会秋季大会, 2013年9月25-28日, 関西大学, 大阪府【シンポジウム講演】
11. T. Mizushima, “Topological Superfluidity of ^3He ”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, 2013年8月1-6日, Matsue 【招待講演】

[図書](計 0 件)

[産業財産権]
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水島 健 (MIZUSHIMA TAKESHI)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授
研究者番号: 50379707

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: