

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K17715

研究課題名(和文) 磁束渦系に束縛されたマヨラナフェルミオンによる非平衡現象の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study on nonequilibrium property of vortices hosted a Majorana fermion

研究代表者

堤 康雅 (Tsutsumi, Yasumasa)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員

研究者番号：10631781

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)：トポロジカル超伝導体の磁束渦系に束縛されたマヨラナフェルミオンの不純物効果を明らかにした。マヨラナフェルミオンの干渉に関する性質を記述するコヒーレンス因子が不純物効果に反映されており、磁束渦系を駆動した際の磁束フロー抵抗に影響を与える。また、非平衡現象を記述できるKeldyshグリーン関数を用いた数値計算手法を開発することで、マヨラナフェルミオンが束縛された磁束渦系の交流電場下の動的性質も明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、マヨラナフェルミオンの干渉に関する性質を決めるコヒーレンス因子が動的性質に重要な寄与をすることが明らかになった。干渉効果は量子力学的な性質であり、マヨラナフェルミオンでは生成と消滅の演算子が等しいという際立った特徴を直接観測する道を拓く。コヒーレンス因子は、中性子非弾性散乱や準粒子干渉を利用すれば観測できると期待される。

研究成果の概要(英文)：Impurity effect for Majorana fermions hosted by vortices in topological superconductors has been clarified. The flux-flow resistivity is influenced by the impurity effect given by the coherence factor of the Majorana fermions. Non-equilibrium properties of the Majorana fermions under ac electric field has also been clarified by using a developed program to calculate Green's functions in the Keldysh formalism.

研究分野：物性理論

キーワード：不純物効果 交流応答 トポロジカル超伝導 Keldyshグリーン関数

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スピン三重項超伝導体は、トポロジカル超伝導体という観点からも注目を集めている。トポロジカル超伝導体の重要な特徴の一つは、量子渦に束縛された準粒子がマヨラナフェルミオンとなる場合があることである。マヨラナフェルミオンは粒子と反粒子が同一であり、ディラックフェルミオンの半分の自由度しかない実数場で記述されるフェルミオンである。素粒子物理学の分野では、ニュートリノがマヨラナフェルミオンである可能性が指摘されているが、結論には至っておらず議論が続けられている。物性物理学においても、トポロジカル超伝導体でのマヨラナフェルミオンの存在が指摘されてから、精力的な研究が行われてきている。特に、量子渦に束縛された励起エネルギーがゼロであるマヨラナゼロエネルギーモードは応用上にも重要な興味深い特徴を持つ。例えば、マヨラナゼロエネルギーモードが非可換統計に従うという特徴を利用すると、量子渦の交換による量子計算が考えられる。

研究開始当初、スピン三重項超伝導体であると広く考えられていた物質として Sr_2RuO_4 と UPt_3 が挙げられる。 Sr_2RuO_4 はスピン三重項 p 波状態であることが確実視されていたが、スピンの向きについては結論に至っていなかった。スピンの向きは量子渦に束縛された準粒子の励起エネルギーにスピン軌道相互作用によるギャップが開くかどうかを決める重要な要素である。重い電子系超伝導体 UPt_3 は温度-磁場相図上に A, B, C の 3 つの超伝導相を持つ特異な超伝導体であり、スピン三重項 f 波状態のギャップ関数を実現していることが明らかにされている。 UPt_3 では各相でのスピンの向きも NMR 測定から決められているため、ギャップ関数の対称性が完全に明らかになっている。 UPt_3 の B 相では磁場を増加させるとスピンの向きが変化しギャップ関数が鏡映対称性を持つようになる。対称性の変化に伴って、量子渦束縛状態がスピン軌道相互作用によるギャップを持つディラックフェルミオンから、鏡映対称性に守られたマヨラナゼロエネルギーモードへとトポロジカル相転移することも理論的に明らかになっている。

2. 研究の目的

本研究では、量子計算への応用でも重要な磁束渦糸に束縛されたマヨラナゼロエネルギーモードによる非平衡現象を理論的に明らかにし、マヨラナゼロエネルギーモードを観測する実験方法を提案することを目的とする。具体的には、(1) 直流電流による磁束渦糸の磁束フロー抵抗、(2) 交流外場に対する磁束渦糸の動的性質の理論研究を行う。

(1) UPt_3 の B 相では磁場を増加させると、量子渦束縛状態がギャップを持つディラックフェルミオンから、対称性に守られたギャップレスなマヨラナゼロエネルギーモードへとトポロジカル相転移する。磁束フロー抵抗には磁束渦糸に束縛されたゼロエネルギー状態の準粒子が運ぶスペクトラルフローが重要な寄与をするため、トポロジカル相転移前後で磁束フロー抵抗が急激な磁場変化を示すことが期待できる。マヨラナゼロエネルギーモードの有無による磁束フロー抵抗の違いを微視的理論により定量的に明らかにすることで、トポロジカル相転移によるマヨラナゼロエネルギーモードの出現がどのように観測されるかを示す。 UPt_3 の B 相でのトポロジカル相転移を念頭に置いているが、磁束フロー抵抗は一般的な超伝導体のギャップレス励起の有無を判別するために利用することができる。このように、磁束フロー抵抗は量子渦束縛状態の影響を受けるので、マヨラナフェルミオンの不純物効果も磁束フロー抵抗を理解するためには明らかにする必要がある。

(2) マヨラナゼロエネルギーモードは生成と消滅の演算子が等しいため、演算子の二乗がゼロとならず真空状態を定義できない。“真空状態”を定義してフォック空間の基底を作るためには、異なる磁束渦糸に束縛されたマヨラナゼロエネルギーモードを対として非局所的なディラックフェルミオンを構成する必要がある。ディラックフェルミオンを構成する磁束渦糸が対となることで、交流外場に対して磁束渦糸が同位相で振動する音響モードだけでなく、渦糸対が逆位相で振動する光学モードも現れる。本研究では、交流外場に対する磁束渦糸の動的性質を明らかにすることで、光学モードを観測するための指針を与える。光学モードが観測されれば、磁束渦糸にマヨラナゼロエネルギーモードが束縛されていることをマヨラナフェルミオンの物理的性質から示したことになる。

3. 研究の方法

(1) トポロジカル超伝導体の量子渦に束縛されたゼロエネルギーモードであるマヨラナフェルミオンの不純物効果を微視的なグリーン関数の従う Dyson 方程式に基づいて調べる。グリーン関数は、不純物自己エネルギーを用いて記述することができるが、不純物自己エネルギーを求めるには不純物が無い時の Bogoliubov-de Gennes 波動関数の性質で決まるコヒーレンス因子を計算すればよい。つまり、ゼロエネルギーモードのコヒーレンス効果を調べることで、マヨラナフェルミオンの不純物効果を明らかにすることができる。

(2) 微視的理論に基づいた Gor'kov 方程式に準古典近似を行って、Keldysh グリーン関数で記述した Eilenberger 方程式の自己無撞着な解を得ることで、磁束渦糸に束縛されたマヨラナフェルミオンによる非平衡現象を明らかにする。研究の遂行にあたって、超伝導体の非平衡現象に関する数値計算の第一人者であり、多くの先行研究を公表している Matthias Eschrig 教授(イギリス、Royal Holloway, University of London 所属)の研究室に滞在して議論を行った。

4. 研究成果

(1) トポロジカル超伝導体の量子渦に束縛されたゼロエネルギーモードであるマヨラナフェルミオンの不純物効果を明らかにした。フルギャップのトポロジカル超伝導体では、マヨラナフェルミオンの存在が運動量空間のトポロジーにより保証されているので、マヨラナフェルミオンが不純物に対して安定であることが知られている。しかし通常は、トポロジカル超伝導体はギャップノードを持っているので、マヨラナフェルミオンの有無に関連するトポロジカル不変量はノードを避けた特定の運動量空間上で定義する必要がある。このように定義されたトポロジカル不変量はノードをまたぐと値が変化し得るので、不純物散乱等により運動量状態間の遷移がある場合に、マヨラナフェルミオンが安定なのかは明らかではなかった。本研究では、不純物散乱によりノードをまたぐ運動量状態の遷移が引き起こされると、マヨラナフェルミオンが安定ではなくなることを解析計算と数値計算を組み合わせることで明らかにした。一方で、ノードをまたがない運動量状態の遷移に対しては、マヨラナフェルミオンは安定である。つまり、一軸伸長した柱状欠陥のような不純物に対しては、ノードがあってもマヨラナフェルミオンは安定に存在できる。柱状欠陥は人工的に導入することができるので、マヨラナフェルミオンの特徴的な不純物効果を磁束フロー抵抗を通して実験で観測できる可能性がある。物理的には、マヨラナフェルミオン間のコヒーレンス因子がノードの同一側にある運動量状態の組ではゼロとなるため、このような不純物効果が表れている。マヨラナフェルミオンの関与する特殊なコヒーレンス因子を中性子非弾性散乱や準粒子干渉を使って直接観測できる可能性もある。

(2) 交流電場下の磁束渦糸の動的性質を明らかにした。s 波超伝導体中の渦糸とマヨラナフェルミオンが束縛されているカイラル p 波超伝導体中の渦糸の交流電場に対する応答の比較を行った。その結果、s 波超伝導体とカイラル p 波超伝導体では磁束渦糸の動的性質が異なることが明らかになった。また、カイラル p 波超伝導体中の渦糸の動的性質は、磁束渦糸の渦度の向きと秩序変数のカイラリティの向きが平行か反平行かで異なることも明らかになった。しかし、これらの動的性質の違いとマヨラナフェルミオンの有無についての関係は自明ではなく、さらなる研究で明らかにしていく必要がある。動的性質とマヨラナフェルミオンの関係が明らかになれば、交流応答を調べることでマヨラナフェルミオンの有無を判定できるだけでなく、超伝導体のトポロジーの情報からギャップ対称性も決定できるようになると期待される。

(3) 交流電場下の磁束渦糸の振動モードを解析するために必要となる数値計算手法を開発した。本研究の数値計算では、Keldysh 形式の準古典グリーン関数を超伝導の秩序変数、不純物自己エネルギー、及び、電気化学ポテンシャルと自己無撞着に解く必要がある。しかし、秩序変数と電気化学ポテンシャルを求めるためには、準粒子励起のエネルギーについて超伝導ギャップよりも十分に大きいエネルギーカットオフまでエネルギー積分を実行する必要があり、従来の計算方法では高エネルギーまでの緻密な Keldysh グリーン関数を要する膨大な数値計算が必要であった。本研究で新たに開発した数値計算手法では、Keldysh グリーン関数を松原形式のグリーン関数への解析接続が可能な遅延グリーン関数、先進グリーン関数と解析接続できない異常関数に分ける。遅延グリーン関数と先進グリーン関数は松原グリーン関数に解析接続できるので、エネルギー積分を実行する代わりに有限個の松原周波数についての和をとればよい。異常関数についてはエネルギー積分を実行する必要があるが、低温では交流電場の周波数以下のエネルギーを持つ準粒子にしか異常関数は寄与しないので、エネルギー積分の積分範囲を小さくできる。このようにして、秩序変数と電気化学ポテンシャルを松原グリーン関数の有限和と Keldysh グリーン関数の異常関数部分についての交流周波数までのエネルギー積分から計算することで、数値計算コストを抑えることができる。本研究で開発した Keldysh グリーン関数を扱う新たな数値計算手法は、より一般的な非平衡現象を解析する上でも有用である。実際に研究代表者は、この数値計算手法を非平衡状態が本質となるスピントロニクス分野でも用いている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Kittaka Shunichiro, Nakamura Shota, Sakakibara Toshiro, Kikugawa Naoki, Terashima Taichi, Uji Shinya, Sokolov Dmitry A., Mackenzie Andrew P., Irie Koki, Tsutsumi Yasumasa, Suzuki Katsuhiko, Machida Kazushige	4. 巻 87
2. 論文標題 Searching for Gap Zeros in Sr2RuO4 via Field-Angle-Dependent Specific-Heat Measurement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 093703/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.093703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Machida Kazushige, Irie Koki, Suzuki Katsuhiko, Ikeda Hiroaki, Tsutsumi Yasumasa	4. 巻 99
2. 論文標題 Theoretical studies for identifying horizontal line nodes via angle-resolved density-of-states measurements: Application to Sr2RuO4	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064510/1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.064510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tsutsumi Yasumasa, Kato Yusuke	4. 巻 807
2. 論文標題 Coherence Effects of Caroli-de Gennes-Matricon Modes in a Nodal Topological Superconductor UPt3	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 052005/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/807/5/052005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kittaka Shunichiro, Shimizu Yusei, Sakakibara Toshiro, Haga Yoshinori, Yamamoto Etsuji, Onuki Yoshichika, Tsutsumi Yasumasa, Nomoto Takuya, Ikeda Hiroaki, Machida Kazushige	4. 巻 807
2. 論文標題 Nodal gap structure of the heavy-fermion superconductor URu2Si2 revealed by field-angle-dependent specific-heat measurements	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 052001/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/807/5/052001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 池上弘樹、堤康雅、河野公俊	4. 巻 52
2. 論文標題 超流動 ³ Heにおけるイオンの輸送現象と相対論的準粒子	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 771-781
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Shimizu, S. Kittaka, T. Sakakibara, Y. Tsutsumi, T. Nomoto, H. Ikeda, K. Machida, Y. Homma, and D. Aoki	4. 巻 117
2. 論文標題 Omnidirectional Measurements of Angle-Resolved Heat Capacity for Complete Detection of Superconducting Gap Structure in the Heavy-Fermion Antiferromagnet UPd ₂ Al ₃	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 037001/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.117.037001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Kittaka, Y. Aoki, Y. Shimura, T. Sakakibara, S. Seiro, C. Geibel, F. Steglich, Y. Tsutsumi, H. Ikeda, and K. Machida	4. 巻 94
2. 論文標題 S. Kittaka, Y. Aoki, Y. Shimura, T. Sakakibara, S. Seiro, C. Geibel, F. Steglich, Y. Tsutsumi, H. Ikeda, and K. Machida	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054514/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.94.054514	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Tsutsumi, T. Nomoto, H. Ikeda, and K. Machida	4. 巻 94
2. 論文標題 Nodal gap detection through polar angle-resolved density of states measurements in uniaxial superconductors	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224503/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.94.224503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Tsutsumi	4. 巻 118
2. 論文標題 Scattering Theory on Surface Majorana Fermions by an Impurity in 3He-B	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 145301/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.118.145301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Mizushima, Y. Tsutsumi, T. Kawakami, M. Sato, M. Ichioka, and K. Machida	4. 巻 85
2. 論文標題 Symmetry-Protected Topological Superfluids and Superconductors -From the Basics to 3He-	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 022001-1-74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.85.022001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Kittaka, Y. Shimizu, T. Sakakibara, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Onuki, Y. Tsutsumi, T. Nomoto, H. Ikeda, and K. Machida	4. 巻 85
2. 論文標題 Evidence for Chiral d-wave Superconductivity in URu2Si2 from the Field-Angle Variation of Its Specific Heat	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 033704-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.85.033704	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Tsutsumi and Y. Kato	4. 巻 85
2. 論文標題 Coherence Effects of Caroli-de Gennes-Matricon Modes in Nodal Topological Superconductors	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 053704-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.85.053704	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計16件(うち招待講演 1件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 堤康雅、前川禎通
2. 発表標題 Generation of spin current in liquid helium-3
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堤康雅、前川禎通
2. 発表標題 液体ヘリウム3におけるスピンの流
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堤康雅、前川禎通
2. 発表標題 ヘリウム3における超流動スピンの流
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堤康雅
2. 発表標題 Scattering theory on surface Majorana fermions by an impurity in $^3\text{He-B}$
3. 学会等名 The 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 堤康雅
2. 発表標題 トポロジカル超流動体であるヘリウム3の表面状態
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 堤康雅
2. 発表標題 単一磁束渦糸の交流電場応答
3. 学会等名 第25回渦糸物理国内会議
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 堤康雅
2. 発表標題 Depth dependence of ion mobility due to scattering by surface Majorana fermions in 3He-B
3. 学会等名 The International Workshop on Electrons and Ions in Quantum Fluids and Solids(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堤康雅
2. 発表標題 ヘリウム3-B相における表面マヨラナフェルミオンと不純物束縛状態の共鳴散乱
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Tsutsumi and Y. Kato
2. 発表標題 Coherence Effects of Caroli-de Gennes-Matricon Modes in a Nodal Topological Superconductor UPt3
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron System (SCES2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Y. Tsutsumi
2. 発表標題 Theoretical analysis for mobility of ions below a free surface of 3He-B
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 堤康雅
2. 発表標題 ヘリウム3-B相の自由表面下での不純物の移動度の理論解析
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 堤康雅
2. 発表標題 交流電場下での磁束渦糸の集団励起
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Tsutsumi
2. 発表標題 Impurity Scattering of Surface Majorana Fermions in superfluid $^3\text{He-B}$
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 堤康雅
2. 発表標題 超流動ヘリウム3-B相における表面準粒子の不純物散乱
3. 学会等名 日本物理学会2015年秋季大会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 堤康雅、加藤雄介
2. 発表標題 ギャップノードのあるトポロジカル超伝導体におけるマヨラナ粒子の不純物効果
3. 学会等名 第23回渦糸物理国内会議
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 堤康雅、加藤雄介
2. 発表標題 ギャップノードのあるトポロジカル超伝導体における量子渦束縛状態の不純物効果
3. 学会等名 日本物理学会第71回年次大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 前川禎通、堤康雅	4. 発行年 2019年
2. 出版社 日本評論社	5. 総ページ数 160
3. 書名 スピントロニクス	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----