

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14662

研究課題名（和文）トポロジカル超伝導・超流動におけるマヨラナ表面状態とボソン励起の結合に関する理論

研究課題名（英文）Theoretical studies on couplings between surface Majorana fermions and boson excitations in topological superconductors and superfluids

研究代表者

正木 祐輔（Masaki, Yusuke）

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：90837840

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000 円

研究成果の概要（和文）：マヨラナフェルミオンはトポロジカル超伝導・超流動の端や渦などの位相欠陥において現れ、その非可換統計性を用いた量子計算への応用の期待から注目を集めている。本研究ではある種のトポロジカル超流動において非可換統計に従う渦の安定性を見出し、またその非可換渦内にそれとは別の非可換統計を示すMajoranaフェルミオンの存在を理論的に明らかにした。また超伝導にとどまらず、磁性体の表面ボソンモード不安定性などについても調べ、実験で観測されている巨大な物性変化の起源を明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果によって、量子渦というボソンの秩序変数における非可換性とマヨラナフェルミオンというフェルミオンの渦内束縛状態の非可換性という二種類の非可換性を備えた半整数渦が安定に存在しうることが明らかとなった。非可換統計は量子計算への応用が期待される重要な特徴である。またソリトンの表面バリアの消失が表面ボソンモードの不安定化であることを明らかにした。表面での不安定化は実験でも急峻な物理量（物性状態）の変化として観測されており、次世代デバイス応用に期待されるソリトンの制御性からも重要である。

研究成果の概要（英文）：Majorana fermions can be realized at edges or topological defects of topological superconductors/superfluids and have attracted much attentions because of possible applications to quantum computing based on their non-Abelian statistics. In this work, the stability of non-Abelian vortex was found, and a Majorana fermion in its vortex core was also obtained theoretically, that is, a two-fold non-Abelian anyon. A surface bosonic mode in magnetic systems was also investigated, and its instability was clarified as the origin of a sharp change in the magnetic properties observed in experiments.

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 マヨラナフェルミオン 非可換渦 表面ボソンモード

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル超伝導・超流動の特徴の一つとして、そのバルクの非自明なトポロジを反映して系の表面やトポロジカル欠陥にマヨラナフェルミオンがゼロエネルギー状態として現れる。マヨラナフェルミオンは自身が反粒子でもあり物性物理における縮退した基底状態を構成する。また非可換統計に従うという特徴を利用して、量子計算への応用可能性が指摘されていることから大変注目を集めている。一方で実験の側面では、ゼロエネルギーに存在する状態密度の観測に頼ったものがほとんどであり、ゼロエネルギー状態密度の出現は自明な Andreev 束縛状態でも起こりうるために、その区別は依然議論が続いている。トポロジカル物性のさらなる探索には、新しいトポロジカル系の舞台や観測手段を増やすことが重要である。

研究開始当初、トポロジカル超流動相として中性子星内部の状態が注目を集めていた。トポロジによる分類では、このトポロジカル相において、渦内に束縛されたマヨラナフェルミオンを考慮しなくてもそれ自体が非可換である渦の存在が予言されていた。ここにさらに別の非可換統計に従うマヨラナフェルミオンが存在するのかが未解決課題であった。

また表面に束縛される状態はフェルミオンだけでなくボソンモードも存在するというのは、トポロジカル超流動においては空間的に局在したボソンフェルミオン結合を介してのマヨラナフェルミオンの観測可能性があることから、注目に値する。この表面に局在したボソンモードはトポロジカル超伝導・超流動に限った話ではなく、さらにはゼロエネルギーという制限を外せば、トポロジカル相でなくても境界条件から存在しうる。

2. 研究の目的

本研究では集団励起や秩序変数の励起であるボソン励起とトポロジカルなフェルミオン励起の結合という新奇トポロジカル物性の探索を目指す。秩序変数やボソンの自由度はこれまでの研究においては、ギンツブルグ・ランダウ理論を用いた枠組みで扱われることが多く、一様状態でのフェルミオン励起を介してその有効理論の係数を決定する。一方で、低エネルギーの局在したフェルミオン励起はトポロジカル物質に特徴的であり、またボソン励起と結合するため、フェルミオンボソン結合を介したトポロジカル物性探索は、今後の実験的検証の転回点になりうる。

(1) 中性子星内部でスピンと軌道が強く結合したトポロジカル超流動状態の実現が期待されている。特に高磁場相において非可換統計に従う半整数渦の存在が指摘されており、整数渦に対する安定性や渦内にマヨラナフェルミオンが存在するかどうかについて調べる。

(2) また表面に局在したボソンモードという点でトポロジカル系とは異なるが、カイラル磁性体における表面モードの役割を理解する。これは当初念頭にあった制限空間における超流動 He3 の表面ボソンモードの不安定化と関連がある。

3. 研究の方法

(1) 中性子星内部で実現が見込まれるトポロジカル超流動状態である 3P_2 超流動の孤立渦の解析を行う。フェルミオンの自由度も考慮した実空間超伝導の計算を行うために、準古典理論を用いる。またマヨラナフェルミオンに対応するゼロエネルギーフェルミオン励起の解析はボゴリューポフ・ドジャン (BdG) 方程式に基づく。

(2) カイラル磁性体の表面ボソンモードの解析は、古典スピンモデルとその線形化運動方程式であるボソン系の BdG 方程式の解析を行う。

4. 研究成果

(1) 準古典理論により、 3P_2 超流動の孤立渦の自己無撞着を構成した。特に D_4BN 状態が実現する高磁場側において、半整数渦の可能性を調べた。整数渦に対する半整数渦の安定性を調べるために、半整数渦 2 つを有限の距離だけ離して自己無撞着解を構成し、その自由エネルギーの計算を行った(図 1)。

2 つの距離が 0 に対応する整数渦は極小構造をとらず、有限の半整数渦間距離において、極小構造を取ることを明らかとした。これは整数渦でいるより、半整数渦 2 つが分子のような状態を構成したほうが安定であることを意味している。さらに 2 つの半整数渦の渦芯内にゼロエネルギー状態が存在するかどうかを調べたのが図 2 である。

2 つの渦を通る直線上で局所状態密度を計算しており、それぞれの渦内に離散的なエネルギー準位を持つ空間的に局在した状態が存在することがわ

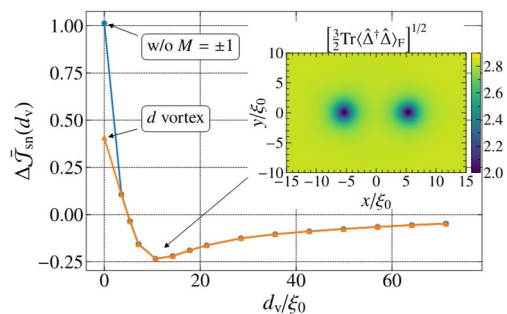


図 1. 2 つの半整数渦の距離 vs エネルギー。

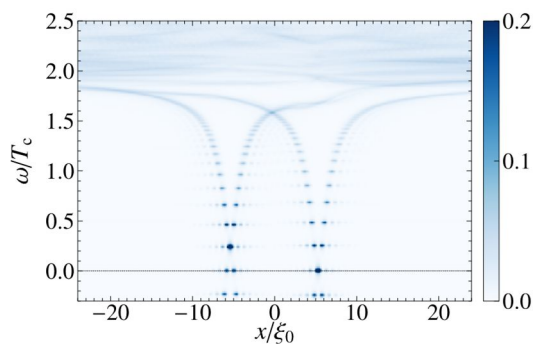


図 2. 局所状態密度。

かる．特に，それぞれの渦内にゼロエネルギー状態が存在しており，波動関数の形状を解析することでマヨラナフェルミオンが存在していることが確かめられた．このことはハミルトニアン
の半古典的な解析で，トポロジカル数を求めることでも確認された．

(2)カイラル磁性体 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ は小さいサイズにおいて顕著なヒステリシスを示すことが知られている．特に減磁過程において，急峻な磁気抵抗変化が観測されており，これはカイラルソリトンに表面バリアが存在し，表面バリアがある磁場で消失することに伴うソリトンの表面からの侵入に対応することが理論からも確かめられた(図3(b))．本研究ではこの表面バリアの消失についてボソン(マグノン)励起の観点から調べた(図3(a))．

図3(a)でバルクの連続スペクトルより低エネルギーに青で示した束縛状態のスペクトルが存在することがわかる．これはマグノンの表面束縛状態を表す(インセット)．磁場を下げていくと，この表面に束縛されたマグノンのエネルギーが下がっていき，やがてある磁場で，ゼロエネルギーとなり，不安定化を起すことが明らかとなった．この不安定化が，エネルギーランドスケープ(図3(b))でみる表面バリアの消失に対応する．熱力学的な転移磁場が赤で示されているのに対して，それより低い磁場(青)で表面バリアが消失する．表面マグノンが不安定化する磁場と表面バリアが消失する磁場は一致することが確かめられた．

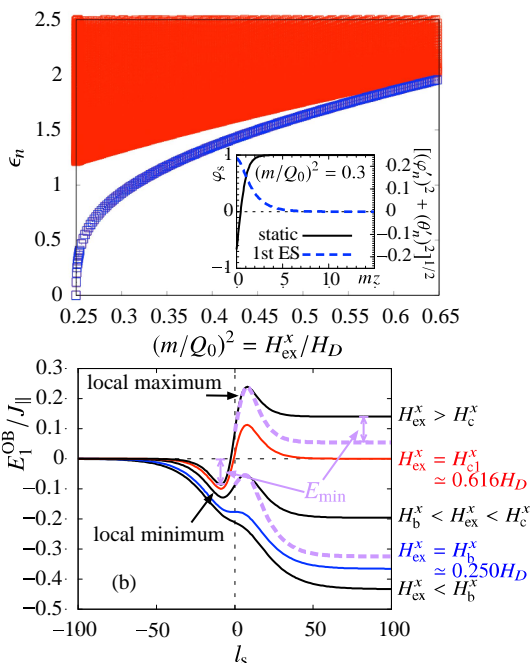


図3.(a)マグノンスペクトル．青は表面に束縛されたマグノンを表す．インセットは表面ツイスト状態と表面に束縛されたマグノンの空間分布を表す．(b)表面バリア．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Masaki Yusuke, Mizushima Takeshi, Nitta Muneto	4. 巻 105
2. 論文標題 Non-Abelian half-quantum vortices in 3P2 topological superfluids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L220503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.L220503	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 Matsushita Taiki, Ando Jiei, Masaki Yusuke, Mizushima Takeshi, Fujimoto Satoshi, Vekhter Ilya	4. 巻 128
2. 論文標題 Spin-Nernst Effect in Time-Reversal-Invariant Topological Superconductors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 97001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.097001	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 該当する

1. 著者名 Masaki Yusuke	4. 巻 101
2. 論文標題 Instabilities in monoaxial chiral magnets under a tilted magnetic field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.214424	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 Masaki Yusuke, Mizushima Takeshi, Nitta Muneto	4. 巻 2
2. 論文標題 Microscopic description of axisymmetric vortices in P23 superfluids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013193	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20件(うち招待講演 0件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 松林幸宏, 正木祐輔, 松枝宏明
2. 発表標題 ディラック電子系の超流動密度と量子幾何効果
3. 学会等名 日本物理学会 2023 年 春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松下太樹, 水島健, 正木祐輔, 藤本聡, Ilya Vekhter
2. 発表標題 非ユニタリ超伝導体を舞台としたスピнкаロリトロニクスの理論
3. 学会等名 日本物理学会 2022 年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 正木祐輔, 松枝宏明
2. 発表標題 1次元2軌道Hubbard模型における励起子絶縁体の相関
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Masaki, R. Aoki, Y. Togawa, and Y. Kato
2. 発表標題 Monoaxial Chiral Magnets in Tilted Magnetic Field
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 正木祐輔, 水島健, 新田宗土
2. 発表標題 3P2超流動の半整数渦分子
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Masaki, T. Mizushima, M. Nitta
2. 発表標題 Vortices in 3P2 Superfluid: Majorana fermion and non-Abelian half-quantum vortex
3. 学会等名 Vortex2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Masaki, T. Mizushima, M. Nitta
2. 発表標題 Vortices and non-Abelian anyons in 3P2 nematic superfluids
3. 学会等名 QFS2021 International Online Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 正木祐輔
2. 発表標題 超伝導の平衡状態における力のつりあいに対する拡張準古典的アプローチ
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松林幸宏, 正木祐輔, 松枝宏明
2. 発表標題 非一様な電荷密度波系における光駆動された超伝導界面からの集団励起の放射
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大金幸平, 松枝宏明, 正木祐輔
2. 発表標題 時間依存の横磁場下の準周期Isingモデルにおける準粒子ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松下太樹, 安藤慈英, 正木祐輔, 水島健, 藤本聡, Ilya Vekhter
2. 発表標題 時間反転対称なトポロジカル超伝導におけるスピンNernst効果
3. 学会等名 令和3年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松下太樹, 正木祐輔, 水島健, 藤本聡, Ilya Vekhter
2. 発表標題 非ユニタリ超伝導体におけるスピнкаロリトロニクス
3. 学会等名 令和3年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 正木祐輔、石原純夫
2. 発表標題 局在スピンと結合した拡張イオン性ハバード模型の光照射ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 正木祐輔、水島健、新田宗土
2. 発表標題 3P2超流動の非軸対称渦の微視的計算
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 正木祐輔、水島健、新田宗土
2. 発表標題 3P2超流動の半整数渦の微視的計算
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松下太樹、安藤慈英、正木祐輔、水島健、藤本聡、Ilya Vekhter
2. 発表標題 トポロジカル超伝導におけるヘリカルクーパー対により引き起こされる異常スピネルンスト効果
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下豊、正木祐輔、石原純夫
2. 発表標題 局在スピンと結合した拡張イオン性ハバード模型の光学応答
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 正木祐輔、石原純夫
2. 発表標題 スピン状態自由度のある強相関係における光照射効果と励起子絶縁体
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 正木祐輔、石原純夫
2. 発表標題 スピン三重項励起子絶縁体系における光照射効果
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Masaki, S. Ishihara
2. 発表標題 Photo-irradiation effects on excitonic insulating phase in correlated electron system with spin degrees of freedom
3. 学会等名 The 3rd Symposium for The Core Research Clusters for Material Science and Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------