

令和 3 年 5 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05517

研究課題名（和文）量子スピン液体の新奇素励起と特異輸送現象の研究

研究課題名（英文）Exotic excitations and anomalous transport phenomena in quantum spin liquids

研究代表者

藤本 聡 (Fujimoto, Satoshi)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：10263063

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、量子スピン液体を実現するKitaev磁性体においてマヨラナ粒子が生み出す新規物性の研究を進めた。通常の磁性体とは異なり、スピン液体状態では絶対零度でも電子スピンの磁気秩序を起こさず、さらに電子スピンの自由度があたかも分裂したかのような振る舞いを示し、マヨラナ粒子という電子の半分の自由度しか持たない励起が発現する。このマヨラナ粒子は量子情報への応用の観点からも興味を持たれている。本研究では、現実のKitaev磁性体の候補物質に存在する様々な相互作用が、このマヨラナ粒子に重要な影響を与え、新規トポロジカル物性を発現することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Kitaev磁性体で実現が期待されるマヨラナ粒子状態は、近未来の量子情報への応用の観点から国内外で非常に興味を持たれ、活発に研究がされている。本研究で明らかになった新しいマヨラナ粒子の性質である、マヨラナ・フェルミ面やトポロジカル相転移は、将来の候補物質におけるマヨラナ粒子の実験探索に利用できる期待される。さらに本研究で新たに分かったマヨラナ粒子の性質を用いて、マヨラナ粒子を制御して、量子計算に応用する新しい方法の開発にも利用できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this research project, novel quantum phenomena associated with Majorana particles in the Kitaev spin liquid state are theoretically explored. In contrast to conventional magnets, Kitaev magnets do not show magnetic order even at zero temperature, and moreover, in the spin liquid state, a Majorana particle emerges from the fractionalization of an electron, and has only a half degrees of freedom of an electron. The Majorana particles in solid state materials are important, and attracting much attention, because they can be applied to quantum computation. We have clarified that non-Kitaev interactions, which exist in real candidate materials of Kitaev magnets, drastically change properties of Majorana particles, inducing novel topological quantum phenomena.

研究分野：物性物理学

キーワード：磁性 マヨラナ粒子 量子スピン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2次元量子スピン液体の研究は1987年のAndersonによるRVB状態の提唱以来、長い歴史を持ち、多くの研究の蓄積がある。量子スピン液体の重要な特徴の一つは素粒子である電子の“分数化”という極めて特異な現象が発現することである。スピン液体には様々なタイプのものが提唱されており、それぞれにおいて、固有の分数化現象が理論的に予言されている。例えば、量子スピアイスではスピン自由度が分数化したスピノン励起が発現することが指摘されている。しかしながらこのような研究において、現実物質での実現と理論基盤の確立の両面において、分野のコンセンサスが得られた成果は乏しい状況であった。この状況は2006年のKitaevの論文によって、一変する。Kitaevは2次元蜂の巣格子上で定義されたある特殊な相互作用を有する量子スピン系のモデルを構築し、これが厳密可解で、基底状態でスピン液体状態を示し、さらに、トポロジカル不変量であるChern数が0でなく、開いた端や渦中にマヨラナ粒子が現れる非アーベル・トポロジカル相を実現することを明らかにした。さらに、このモデルを近似的に実現する物質がIr酸化物やRu塩化物で見つかり、実験・理論両面で研究が大きく進展し始めた。

2. 研究の目的

Kitaev磁性体の候補物質には、理想的なKitaevモデルには存在しない様々なスピン間の相互作用がある。これらの相互作用がスピン液体状態を破壊するほどには強くない場合には、Kitaevスピン液体状態で発現するマヨラナ粒子に新しい性質を付与し、新規量子現象を誘起する可能性がある。本研究では、現実の候補物質において非Kitaev相互作用に由来して実現する新規マヨラナ物性を開拓する。具体的には候補物質において重要な非Kitaev相互作用である非対角交換相互作用、およびそれと磁場や磁気秩序との結合によって生み出されるマヨラナ・バンドの劇的な変更やマヨラナ粒子間の相互作用、およびトポロジカル相転移について調べる。

また、マヨラナ粒子は、トポロジカル超伝導やワイル超伝導でも実現し、Kitaevスピン液体におけるマヨラナ粒子と類似の現象が発現することが知られている。マヨラナ物性の理解を深化させるため、超伝導体におけるマヨラナ物性の探索も進めていく。ワイル超伝導で発現するマヨラナ・ワイル準粒子によるカイラル異常現象がどのように実現されるか、ワイル金属におけるワイル準粒子(マヨラナ粒子ではない)との違いは何か、などを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

Kitaev磁性体の研究においては、現実のKitaev候補物質に存在する非Kitaev相互作用を摂動的に扱うことによって、マヨラナ粒子系の有効ハミルトニアンを導出し、それに基づいてマヨラナ粒子が生み出す、理想的なKitaevモデルには存在しない、新規現象を探索する。また、非Kitaev相互作用によって生み出されるマヨラナ粒子間の相互作用については、平均場近似と数値厳密対角化法を用いて解析する。超伝導の場合のマヨラナ粒子については、準古典近似理論とBogoloubov-de-Gennes方程式に基づく解析によって研究を行う。この際、マヨラナ・ワイル準粒子のトポロジカルな性質に深く関わりのあるベリー曲率の効果を取り入れることが必要不可欠で重要である。しかしながら、従来の準古典近似理論では、ベリー曲率の効果が完全に無視されているため、この効果を取り入れることができるように理論を改良する。このように修正された準古典近似理論を持ちいて、マヨラナ・ワイル準粒子に由来する輸送現象の計算を行う。

4. 研究成果

Kitaev磁性体の研究：

1. 非Kitaev相互作用や、付加的な磁気構造がマヨラナ粒子のバンド構造に劇的な影響を与えることを発見した。非Kitaev相互作用である非対角交換相互作用が磁場と1次で結合することによって、磁場誘起のエネルギーギャップを増大させ、カイラル・スピン液体状態を安定化することが明らかになった。Kitaev磁性体の候補物質であるRuCl₃ではマヨラナ粒子の重要な特徴である半整数量子熱ホール効果が実験で観測されているが、現実物質でのこの効果の安定性を理解する上で、本成果は有用である。さらに、反強磁性秩序との共存によって、マヨラナ粒子のフェルミ面が発現することが示された。RuCl₃では低温でジグザク磁気秩序を示すが、この磁気秩序を磁場印加で抑制することによって、Kitaevスピン液体相が実現する。RuCl₃において磁気相との境界付近で、磁気秩序とスピン液体の共存が実現できれば、マヨラナ・フェルミ面が現れる可能性があることが示された。また、このマヨラナ・フェルミ面はトポロジカルに保護されていることも分かった。
2. 非Kitaev相互作用である非対角交換相互作用が、マヨラナ粒子の長距離ホッピング項を生み出し、これによってマヨラナ・ディラック・バンドが増殖する現象を発見した。この状態に磁場によるエネルギーギャップを導入すると、チャーン数が2で、アーベル型エニオンを

実現する新規なトポロジカル相が出現することが明らかになった。すなわち、非対角交換相互作用の強さが大きくなると、チャーン数1の非アーベル・トポロジカル相から、チャーン数2のアーベル・トポロジカル相に相転移する。この相で実現するエニオンは通常の電子の1/4に相当する自由度を持つことが分かった。

3. 非キタエフ相互作用と磁場が絡むことによって生ずるマヨラナ粒子間の相互作用が、自発的な回転対称性の破れを誘起し、ネマティック相が実現することが示された。さらに、このネマティック転移はトポロジカル不変量のチャーン数が1から0に変化するトポロジカル相転移であることが明らかになった。この結果は、磁場中比熱測定の実験で観測された回転対称性の破れる現象を理解する上で、非常に有用であると考えられる。

トポロジカル超伝導、ワイル超伝導におけるマヨラナ粒子の研究：

1. ワイル超伝導において、格子変形がマヨラナ・ワイル準粒子に有効的に作用する擬似的な磁場を生成する。これによって、擬似的磁場に平行な超伝導電流が発現することが明らかになった。これは通常の反磁性超伝導電流とは全く異なるメカニズムによって発現する現象である。また、この擬似的磁場は、通常の磁場と異なり、マイスナー効果を生み出さないことも明らかになった。
2. ワイル金属では、ワイル準粒子が電磁場印加によって、カイラル異常と呼ばれる特異な輸送特性を示すことが知られているが、ワイル超伝導においては、マヨラナ・ワイル準粒子は電荷を持たないため、通常の電磁場と結合することができない。しかしながら、ある種の格子変形がマヨラナ・ワイル準粒子に有効的に作用する擬似的な磁場を生成し、カイラル異常現象が発現することが明らかになった。特に格子変形由来の擬似的磁場による負の熱磁気抵抗として発現することが明らかになった。また、この研究を進める上で、従来の準古典近似理論をトポロジカルなベリー曲率の効果を含めるように拡張することにも一定の成果をあげることができた。
3. ワイル超伝導におけるマヨラナ・ワイル準粒子の流れが、スカーミオンの磁気構造によって誘起されることがわかった。これも前述のカイラル異常現象の例の一つである。この場合には、スカーミオン構造が、電荷を持たないマヨラナ粒子に働く擬似的磁場を生み出すことによって発現する現象であることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takikawa Daichi, Fujimoto Satoshi	4. 巻 99
2. 論文標題 Impact of off-diagonal exchange interactions on the Kitaev spin-liquid state of RuCl_3	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224409-1--8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.224409	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 Uematsu Hiroki, Mizushima Takeshi, Tsuruta Atsushi, Fujimoto Satoshi, Sauls J.?A.	4. 巻 123
2. 論文標題 Chiral Higgs Mode in Nematic Superconductors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 237001-1--7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.237001	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 Matsushita Taiki, Nagai Yuki, Fujimoto Satoshi	4. 巻 100
2. 論文標題 Disorder-induced exceptional and hybrid point rings in Weyl/Dirac semimetals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245205-1--9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.245205	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 Takuro Kobayashi, Taiki Matsushita, Takeshi Mizushima, Atsushi Tsuruta, and Satoshi Fujimoto	4. 巻 121
2. 論文標題 Negative Thermal Magnetoresistivity as a Signature of a Chiral Anomaly in Weyl Superconductors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 207002-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.207002	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 Yusuke Ishihara, Takeshi Mizushima, Atsushi Tsuruta, and Satoshi Fujimoto	4. 巻 99
2. 論文標題 Torsional chiral magnetic effect due to skyrmion textures in a Weyl superfluid 3He-A	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024513-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.024513	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 T. Matsushita, T. Liu, T. Mizushima, and S. Fujimoto	4. 巻 97
2. 論文標題 Charge/spin supercurrent and the Fulde-Ferrell state induced by crystal deformation in Weyl/Dirac superconductors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134519-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.134519	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 T. Liu, M. Franz, and S. Fujimoto	4. 巻 96
2. 論文標題 Quantum oscillations and Dirac-Landau levels in Weyl superconductors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224518-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.224518	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 R. Takashima, S. Fujimoto, and T. Yokoyama	4. 巻 96
2. 論文標題 Adiabatic and nonadiabatic spin torques induced by a spin-triplet supercurrent	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 121203-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.121203	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 Sanno Takumi、Miyazaki Shunsuke、Mizushima Takeshi、Fujimoto Satoshi	4. 巻 103
2. 論文標題 Ab initio simulation of non-Abelian braiding statistics in topological superconductors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054504-1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.054504	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 Takikawa Daichi、Fujimoto Satoshi	4. 巻 102
2. 論文標題 Topological phase transition to Abelian anyon phases due to off-diagonal exchange interaction in the Kitaev spin liquid state	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174414-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.174414	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、Fujimoto Satoshi、Schnyder Andreas P.	4. 巻 2
2. 論文標題 Topological piezoelectric effect and parity anomaly in nodal line semimetals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043311-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043311	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11件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Satoshi Fujimoto
2. 発表標題 Chiral anomaly Phenomena in Weyl superconductors
3. 学会等名 Superstripes 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daichi Takikawa, Satoshi Fujimoto
2. 発表標題 Impact of off-diagonal exchange interactions on the Kitaev spin-liquid state of RuCl_3
3. 学会等名 3rd EPIQS-TMS Alliance Workshop on Topological Phenomena in Quantum Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Fujimoto
2. 発表標題 Chiral anomaly and chiral electromagnetism in Weyl/Dirac superconductors
3. 学会等名 12th International Conference on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications (CMCEE 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Fujimoto
2. 発表標題 Chiral anomaly and chiral electromagnetism in Weyl/Dirac superconductors
3. 学会等名 Erice Workshop 2018 "Majorana Fermions and Topological Materials Science" (Erice, Sicily, Italy, 2018/Jul/21-27) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Fujimoto
2. 発表標題 Nematicity and chirality in odd-parity superconductors with strong spin-orbit coupling
3. 学会等名 International Workshop on j-fermion Physics and Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤本聡
2. 発表標題 Dynamics of Spin Textures and Weyl Quasiparticles in Superconductor-Magnet Heterostructures
3. 学会等名 TMS-EPiQS 2nd Alliance Workshop: Topological Magnets and Topological Superconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤本聡
2. 発表標題 トポロジカル超伝導とワイル/ディラック超伝導
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 松下太樹、Tianyu Liu, 水島健、藤本聡
2. 発表標題 Weyl/Dirac系における超伝導磁気効果
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 藤本聡
2. 発表標題 Chiral anomaly phenomena in Weyl superconductors
3. 学会等名 Trends in theory of correlated material 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤本聡
2. 発表標題 Chiral anomaly phenomena induced by geometrical responses in Weyl semimetals and Weyl superconductors
3. 学会等名 BEC2018(Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤本聡
2. 発表標題 Geometrically-Induced Transport Phenomena in Weyl Semimetals and Weyl Superconductors
3. 学会等名 WINDS2017 (国際学会)
4. 発表年 2017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
---------	---------