

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03860

研究課題名（和文）トポロジカル超伝導の量子幾何構造が生み出す新奇スピン物性

研究課題名（英文）Spin transport phenomena induced by quantum geometric structure in topological superconductors

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題を通して、トポロジカル超伝導における新規な熱スピン輸送現象を明らかにした。特に、時間反転対称性を保ったトポロジカル超伝導では、ヘリカルクーパー対の対称性を反映して、不純物における準粒子散乱がスピン依存した非対称散乱となることを示した。この結果、温度勾配を印加すると、その垂直方向にスピン流が流れることを示した（スピネルンスト効果）。さらに、時間反転対称性を破った非ユニタリ超伝導状態では、温度勾配に沿った方向にスピン流が流れる「スピンゼーベック効果」が生じることを明らかにした。これらの熱スピン輸送現象を観測することで、トポロジカル超伝導の対称性を直接検出することができることを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では得られた成果の最も重要な意義は、トポロジカル超伝導を担うクーパー対の非自明な対称性を熱スピン輸送現象を通して検出することができるということを明らかにしたことである。これまで、時間反転対称性を破った超伝導では、カイラルクーパー対が鏡映対称性を破ることで、異常熱ホール効果が現れることがわかってきた。一方で、時間反転対称性を保ったトポロジカル超伝導や非ユニタリ超伝導固有の輸送現象は知られていなかった。我々の成果によって、前者ではスピネルンスト効果が現れ、後者の超伝導状態ではスピンゼーベック効果が現れることを明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Through this research project, we revealed thermal spin transport phenomena in topological superconductors. In particular, we demonstrated that in time-reversal-invariant topological superconductors, Bogoliubov quasiparticles experience spin-dependent asymmetric scattering at nonmagnetic impurities, reflecting the symmetry of helical Cooper pairs. Therefore, when a temperature gradient is applied, a spin current mediated by quasiparticles flows in the direction perpendicular to the temperature gradient, i.e., the spin Nernst effect. Furthermore, we revealed that in nonunitary superconducting states with broken time-reversal symmetry, the spin Seebeck effect occurs in which spin current flows in the direction along the temperature gradient. Our findings suggest that the symmetry of Cooper pairs in topological superconductors can be directly detected by observing these thermal spin transport phenomena.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジカル超伝導 スピントロニクス 異方的超伝導 マヨラナ準粒子

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トポロジックに基づく新しい物質観が急速に浸透している。このトポロジカルな物質観は、新規な機能性を有するトポロジカル物質群の発見をもたらしただけでなく、エニオンやベリー位相、量子幾何構造など超伝導・超流動や量子ホール系、量子スピン液体といった異分野に共通してみられる物理を明らかにした。中でも、超伝導体の量子幾何構造には、超伝導ギャップ関数の対称性、トポロジック、スピン構造などの情報が直接的に反映される。さらに、熱、電荷、スピンなどの郵送の担い手である Bogoliubov 準粒子の運動は量子幾何構造に支配されることもわかってきた。たとえば、ワイル超伝導では、超伝導ギャップの点ノードがベリー位相の特異点として振る舞い、それを源として波数空間中に擬似磁場が現れる。この擬似磁場によって、ワイル超伝導では異常熱ホール効果が現れることが期待されている。さらに、ワイル超伝導では磁束渦などの実空間でのトポロジカル励起が「捩れ場」という幾何構造を創出し、負の熱磁気抵抗効果が生じることが我々の以前の研究で明らかになった (PRL **121**, 207002 (2018))。このように、量子幾何構造の観点から新規物性を探求することが新しい超伝導研究・トポロジカル物質研究の潮流となりつつある。

2. 研究の目的

トポロジカル超伝導体において、非自明な量子幾何構造に由来した輸送現象としては、異常熱ホール効果・量子熱ホール効果が知られている。しかしながら、超低温下での熱測定やクリーンな試料が要求されるなど、実験的観測のためにはいくつもの困難な点がある。実際に、未だ、超伝導における熱ホール効果の観測報告はされていない。そこで本研究課題では、スピン輸送現象に注目した。トポロジカル超伝導候補物質の多くはスピン 3 重項超伝導であり、クーパー対や準粒子励起はスピン自由度を持つ。本研究課題では、輸送現象の担い手であるクーパー対や準粒子の持つスピン自由度と、トポロジカル超伝導に内在する量子幾何構造という 2 つの要素に注目し、それらが織りなす新しい輸送現象を明らかにすることを目的とする。さらに、トポロジカル超伝導に現れるマヨラナ準粒子や非可換エニオンの制御や検出を目指した理論計算も実施する。

3. 研究の方法

超伝導の輸送現象に対する最も強力な理論は準古典 Keldysh-Eilenberger 理論である。Gor'kov 理論に準古典近似を施すことで、計算コストを大幅に削減することができる一方で、ベリー曲率などのトポロジカル超伝導固有の量子幾何構造の情報が失われる。たとえば、時間反転対称性を破った超伝導では、ベリー曲率に由来した内因性機構による異常熱ホール効果と、非対称な不純物散乱による外因性機構の異常熱ホール効果が存在する。しかしながら、準古典 Keldysh-Eilenberger 理論では後者のみを記述することができる。内因性機構は、準古典理論への量子補正として取り込むことができる。そこで、本給研究課題では、準古典 Keldysh-Eilenberger 理論を用いて、トポロジカル超伝導における熱・スピン輸送現象を調べた。特に、不純物バーテックス補正を取り込むことで、トポロジカル超伝導に現れるクーパー対の対称性の破れを反映した熱・スピン輸送現象を議論する。さらに、準古典 Keldysh-Eilenberger 理論への量子補正を取り込んだ理論計算も行う。

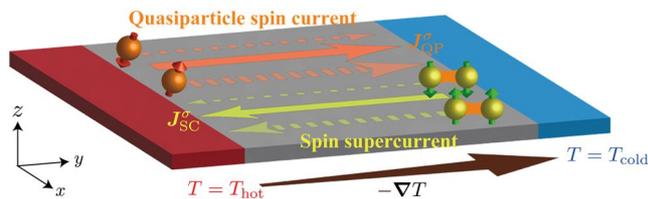
4. 研究成果

本申請課題の主な研究成果は以下の 4 つに分類できる：(A)トポロジカル超伝導における新奇輸送現象、(B)重い電子系超伝導 UTe₂ の対称性とトポロジック、(C)トポロジカル超伝導・量子スピン液体のマヨラナ準粒子、(D)中性子星内部の 3P₂ 超流動とトポロジック。以下、4 つの項目の成果について個別に紹介する。

A. トポロジカル超伝導の輸送現象

本研究課題の主要なテーマである、トポロジカル超伝導での輸送現象の理論研究を行った。これまで、時間反転対称性を破った超伝導では、クーパー対の軌道角運動量を反映して、運動量空間に非自明なベリー曲率が現れることが知られていた。その結果、内因性機構による熱ホール効果が存在する。また、時間反転対称性ととも鏡映対称性も破れるため、不純物によって準粒子の非対称なスキュー散乱が引き起こされる。この結果、外因性機構による熱ホール効果も現れる。一方で、時間反転対称性を保ったトポロジカル超伝導の特徴が輸送現象にどのように現れるのかは謎であった。我々は、[A1]において、トポロジカル超伝導に内在するヘリカルクーパー対に注目し、その対称性を反映してスピンネルンスト効果が現れることを示した。ヘリカルクーパー

対によって、不純物周りで準粒子がスピン依存したスキュー散乱を示す。準古典 Keldysh-Eilenberger 理論を用いて、温度勾配に垂直な方向にスピン流が誘起されることを示した。また、時間反転対称性を破った非ユニタリ超伝導状態では、温度勾配に沿った方向にスピン流が流れるスピンゼーベック効果がバルクで起こりうることを示した[A3]。これらの成果によって、トポロジカル超伝導のトポロジーや対称性の破れを反映した非自明な熱スピン交差相関応答が明らかとなった。さらに、カイラルクーパ対固有の集団励起である「クラッピングモード」を媒介とした異常電気音響効果の発見[A2]や、ワイル超伝導における外因性異常熱ホール効果と超伝導ラインノードの関係について明らかにした[A4]。特に、[A2]では、量子補正を取り込んだ計算を行い、準古典 Keldysh-Eilenberger 理論では得られないことのない新しい知見を得ることに成功した。



[A1] T. Matsushita, J. Ando, Y. Masaki, T. Mizushima, S. Fujimoto, and I. Vekhter, Phys. Rev. Lett. **128**, 097001 (2022).

[A2] T. Matsushita, T. Mizushima, I. Vekhter, and S. Fujimoto, Phys. Rev. B **105**, 134520 (2022).

[A3] T. Matsushita, T. Mizushima, Y. Masaki, S. Fujimoto, and I. Vekhter, arXiv:2404.02633

[A4] T. Matsushita, N. Kimura, T. Mizushima, Y. Masaki, I. Vekhter, and S. Fujimoto, arXiv:2405.09840

B. 重い電子系超伝導 UTe₂ の対称性とトポロジー

重い電子系 UTe₂ は常磁性物質であるが、強磁性量子臨界点近くにあるとされている。実際に、その超伝導状態はスピン 3 重項超伝導として説明され、多重超伝導相や高磁場下でリエントラント超伝導相が発見されるなど注目を集めている。実験的には、時間反転対称性を破った超伝導と時間反転対称性を保った超伝導状態の可能性が議論されており、未だ決着はついていない。我々は、時間反転対称性を破った超伝導状態ではワイル点が現れることを示し、ワイル点から現れる非自明なベリー曲率に由来した内因性機構による異常熱ホール効果について明らかにした[B1]。一方で、時間反転対称性を保った超伝導状態では、結晶の持つ回転対称性や鏡映対称性によって守られたトポロジカル超伝導となることを示し、可能な全ての超伝導ギャップ関数に対してトポロジカル不変量と表面マヨラナ状態の分散を議論した[B2]。また、圧力を加えることで、超伝導相から反強磁性相へ相転移することも報告されている。そこで、強磁性揺らぎと反強磁性揺らぎを取り込んで Eliashberg 方程式を計算することで、UTe₂ の圧力下で観測されている多重超伝導相転移を説明する理論を構築した[B3]。

[B1] Y. Moriya, T. Matsushita, M. G. Yamada, T. Mizushima, and S. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 094710 (2022); JPS Hot Topics **2**, 034.

[B2] J. Tei, T. Mizushima, and S. Fujimoto, Phys. Rev. B **107**, 144517 (2023).

[B3] J. Tei, T. Mizushima, and S. Fujimoto, Phys. Rev. B **109**, 064516 (2024).

C. トポロジカル超伝導・量子スピン液体におけるマヨラナ準粒子の制御と検出

トポロジカル超伝導やKitaef スピン液体にはマヨラナ準粒子励起が現れる。これは、非局所性や非可換統計性といった著しい特徴を持ち、トポロジカル量子計算への応用で注目を集めている。我々は、マヨラナ準粒子の存在をあらわに仮定せず、Bogoliubov-de Gennes 方程式という超伝導状態での量子力学的運動方程式を数値計算することで、マヨラナ準粒子のブレイディングと非可換統計性についてのシミュレーションを行った[C1, C2]。マヨラナ準粒子はイジングエニオンであり、それ自身で万能型トポロジカル量子計算を実現することはできない。一方で、フィボナッチエニオンという非可換エニオンを使うことで、万能型トポロジカル量子計算を実現できることが知られている。我々は、電子浴と結合した量子マヨラナ多対系において、Yang-Lee エニオンというフィボナッチエニオンと同じフェージョン則に従う非可換エニオンを実現することができることを提案した[C3]。厳密対角化により、現実的な状況下で Yang-Lee エニオンがどこまで安定に存在し得るかについて議論した。また、トポロジカル超伝導やKitaef スピン液体に現れるマヨラナ準粒子を非局所測定を用いて検出する方法を提案した[C4, C5]。

[C1] T. Sanno, S. Miyazaki, T. Mizushima, and S. Fujimoto, Phys. Rev. B **103**, 054504 (2021).

[C2] Y. Tanaka, T. Sanno, T. Mizushima, and S. Fujimoto, Phys. Rev. B **106**, 014522 (2022).

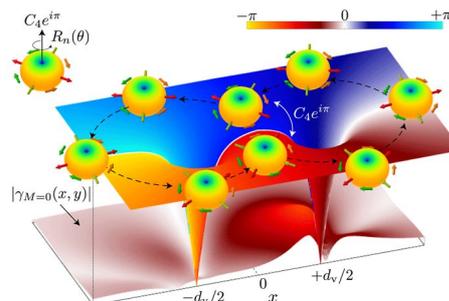
[C3] T. Sanno, M. G. Yamada, T. Mizushima, and S. Fujimoto, Phys. Rev. B **106**, 174517 (2022).

[C4] M. Sugeta, T. Mizushima, and S. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 054701 (2023) [Editor's Choice]; Y. Tanaka, JPSJ News Comments **20**, 09 (2023); JPS Hot Topics **3**, 018.

[C5] M. O. Takahashi, M. G. Yamada, M. Udagawa, T. Mizushima, and S. Fujimoto, Phys. Rev. Lett. **131**, 236801 (2023).

D. 中性子星内部の 3P2 超流動とトポロジ

トポロジカル物質の研究は物性にとどまらず、原子核物理や宇宙へも波及しつつある。特に、中性子星は高密度の中性子で構成されているが、その内部では中性子による超流動が実現されている。中性子同士はテンソル力を介して全角運動量が $J=2$ のスピン 3 重項クーパー対を形成する。これは 3P2 超流動状態と呼ばれ、我々の以前の研究により、トポロジカルに非自明な超流動状態であることがわかっている。我々は、巨大な磁場を伴う中性子星（マグネター）内部で、この 3P2 超流動状態の安定性を調べ、高磁場領域において DIII クラスのトポロジカル超流動相から完全にスピン偏極したワイル超流動状態へと相転移することを見出した [D1]。さらに、このマグネター中の 3P2 超流動状態では非可換統計性に従う分数量子渦状態が実現されることを示した（図は安定な分数量子渦構造を示す） [D2,D3]。



[D1] T. Mizushima, S. Yasui, D. Inotani, and M. Nitta, Phys. Rev. C 104, 045803 (2021).

[D2] Y. Masaki, T. Mizushima, and M. Nitta, Phys. Rev. B **105**, L220503 (2022).

[D3] Y. Masaki, T. Mizushima, and M. Nitta, in Encyclopedia of Condensed Matter Physics (Second Edition), Volume 2, Pages 755-794 (Elsevier, 2024).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T. Matsushita, T. Mizushima, I. Vekhter, S. Fujimoto	4. 巻 105
2. 論文標題 Anomalous acoustoelectric effect induced by clapping modes in chiral superconductors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134520
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.105.134520	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 Y. Masaki, T. Mizushima, M. Nitta	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 Y. Tanaka, T. Sanno, T. Mizushima, S. Fujimoto	4. 巻 106
2. 論文標題 Manipulation of Majorana-Kramers qubit and its tolerance in time-reversal invariant topological superconductor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 14522
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.106.014522	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. Moriya, T. Matsushita, M. G. Yamada, T. Mizushima, S. Fujimoto	4. 巻 91
2. 論文標題 Intrinsic Anomalous Thermal Hall Effect in the Unconventional Superconductor UTe2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 94710
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.094710	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. Sanno, M. G. Yamada, T. Mizushima, S. Fujimoto	4. 巻 106
2. 論文標題 Engineering Yang-Lee anyons via Majorana bound states	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174517
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.174517	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 Mizushima Takeshi, Tamura Shun, Yada Keiji, Tanaka Yukio	4. 巻 107
2. 論文標題 Odd-frequency pairs and anomalous proximity effect in nematic and chiral states of superconducting topological insulators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 64504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.064504	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 Inotani Daisuke, Yasui Shigehiro, Mizushima Takeshi, Nitta Muneto	4. 巻 103
2. 論文標題 Radial Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov-like state in a population-imbalanced Fermi gas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 053308/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.103.053308	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 Mizushima Takeshi, Yasui Shigehiro, Inotani Daisuke, Nitta Muneto	4. 巻 104
2. 論文標題 Spin-polarized phases of 3P2 superfluids in neutron stars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 045803/1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.104.045803	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 Takahashi Masahiro O., Yamada Masahiko G., Takikawa Daichi, Mizushima Takeshi, Fujimoto Satoshi	4. 巻 3
2. 論文標題 Topological nematic phase transition in Kitaev magnets under applied magnetic fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023189/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.023189	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 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 097001/1-7
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 -

1. 著者名 T. Sanno, S. Miyazaki, T. Mizushima, S. Fujimoto	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 水島健	4. 巻 55
2. 論文標題 ネマティック超伝導	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 479
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 Sugeta Masayuki、Mizushima Takeshi、Fujimoto Satoshi	4. 巻 92
2. 論文標題 Enhanced 2-periodic Aharonov-Bohm Effect as a Signature of Majorana Zero Modes Probed by Nonlocal Measurements	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054701-1/7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.054701	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 Tei Jushin、Mizushima Takeshi、Fujimoto Satoshi	4. 巻 107
2. 論文標題 Possible realization of topological crystalline superconductivity with time-reversal symmetry in UTe ₂	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144517-1/12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.144517	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 Mizushima Takeshi、Sato Masahiro	4. 巻 5
2. 論文標題 Imprinting spiral Higgs waves onto superconductors with vortex beams	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L042004-1/7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.L042004	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 Takahashi Masahiro O.、Yamada Masahiko G.、Udagawa Masafumi、Mizushima Takeshi、Fujimoto Satoshi	4. 巻 131
2. 論文標題 Nonlocal Spin Correlation as a Signature of Ising Anyons Trapped in Vacancies of the Kitaev Spin Liquid	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 236701-1/6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.131.236701	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 Tei Jushin、Mizushima Takeshi、Fujimoto Satoshi	4. 巻 109
2. 論文標題 Pairing symmetries of multiple superconducting phases in UTe ₂ : Competition between ferromagnetic and antiferromagnetic fluctuations	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064516-1/9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.109.064516	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 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Takeshi Mizushima
2. 発表標題 Pair Density Waves in Confined Superfluid 3He
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水島健
2. 発表標題 トポロジカル超伝導における交差相関応答
3. 学会等名 短期研究会「不均一系の超伝導・超流動」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水島健
2. 発表標題 光渦で探る超伝導ヒッグスモード
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水島健
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 水島健
2. 発表標題 s波超伝導体における光渦を用いたHiggsモード励起と線形光学応答の理論
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 水島健
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体のネマティック・カイラル超伝導相における奇周波数クーパー対と異常近接効果
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 水島健
2. 発表標題 テラヘルツ光渦で探る超伝導体のHiggsモード
3. 学会等名 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 水島健
2. 発表標題 光渦で探る超伝導体のHiggsモード
3. 学会等名 第3回光渦研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takeshi Mizushima
2. 発表標題 Spatially-modulated superfluid phases in confined 3He: nucleation and crystallization of polka-dots
3. 学会等名 UK Quantum Fluids network webinars (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水島健, 佐藤正寛
2. 発表標題 光渦レーザーを照射した超伝導薄膜におけるクーパー対ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水島健, 石浦大暉, 川上拓人
2. 発表標題 制限空間中の超流動 ^3He におけるCooper対揺らぎと対液晶状態
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeshi Mizushima
2. 発表標題 Pair-Density-Wave Fluctuation and Crystallization in Confined Superfluid 3He
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水島健, 安井繁宏, 猪谷太輔, 新田宗土
2. 発表標題 中性子星内部のスピンの偏極した3P2超流動状態
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 (素核宇)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水島健
2. 発表標題 Pair Density Waves in Superfluid 3He under Nanoscale Confinement
3. 学会等名 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 2020年

1. 発表者名 荻原惇, 松下太樹, 水島健
2. 発表標題 トポロジカル超伝導体における内因性逆スピンホール効果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水島健
2. 発表標題 Introduction (企画提案・趣旨説明): シンポジウム「Current Status of physics in odd frequency Cooper pairings」にて
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeshi Mizushima
2. 発表標題 Pair Density Waves in Topological Superfluid 3He
3. 学会等名 Superstripes 2023: Quantum physics in Complex Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takeshi Mizushima
2. 発表標題 Thermal Generation of Spin Current in Superfluid 3He and Unconventional SC
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------