

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01180

研究課題名(和文) 近藤絶縁体における中性フェルミオン励起の観測

研究課題名(英文) Charge neutral fermionic excitations in Kondo insulators

研究代表者

笠原 裕一 (Kasahara, Yuichi)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10511941

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：近藤絶縁体YbB12においてその低エネルギー励起を熱輸送および比熱測定により調べ、普遍的な中性フェルミオン励起が存在することを明らかにした。さらに強磁場測定を行い、絶縁体状態と磁場誘起金属状態の両方の状態において量子振動を観測し、電荷中性の粒子が量子振動を引き起こしていることを示した。また、微細加工を施した試料における電気抵抗測定により、トポロジカル表面金属状態の存在を明らかにした。

さらに反強磁性秩序を示すYbIr3Si7の研究を行い、中性フェルミオン励起が磁気相転移に伴いその性質を大きく変えることを明らかにし、中性フェルミ粒子が電子スピンと強く結合していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近藤絶縁体は発見から半世紀近くにもなる古い物質系であるが、本研究で観測された量子振動や中性フェルミオンはこれまでの常識では予測されてこなかった新しい現象であり、近藤絶縁体において特異な量子凝縮状態が実現していることが明らかとなった。本研究成果に続いて、他の絶縁体物質においてこれらの現象が報告されるなど、物性研究の新展開となりつつある。中性フェルミオンとして量子コンピューターの基本粒子となるマヨラナ粒子も提案されており、中性フェルミオンの起源の解明は物性物理だけでなく関係応用分野においても極めて重要である。

研究成果の概要(英文)：We have investigated low-energy excitations in YbB12 by thermal transport and specific heat measurements. A finite linear-in-temperature specific heat coefficient and the residual thermal conductivity is observed, providing evidence for the presence of charge-neutral fermionic quasiparticles. We observed quantum oscillations in both insulating state and field-induced metallic state. From a detailed analyses of oscillation amplitude and periods, we found that the neutral fermions give rise to quantum oscillations in both insulating and metallic state. Moreover, a signature of topological surface metallic state is detected by transport measurements in microstructured crystals.

We also observed signatures of charge-neutral fermionic excitations in a new Kondo insulator YbIr3Si7 that exhibits antiferromagnetic order. The neutral fermions change its properties across the field-induced magnetic transition, indicating the strong coupling between the neutral fermions and electronic spins.

研究分野：強相関電子系

キーワード：近藤絶縁体 中性フェルミオン トポロジカル表面状態

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

伝導電子と局在 f 電子の混成に伴う強い電子相関効果によって電子バンドにギャップが開き絶縁体となる近藤絶縁体は、発見から半世紀近くにもなる古い物質系であるが、近年の理論および実験で得られた新しい知見により、新たな局面を迎えている。特に、本来金属で観測され絶縁体では期待されない量子振動現象が典型的な近藤絶縁体である SmB_6 や YbB_{12} において観測され、これらの物質においては絶縁体とも金属とも異なる奇妙な量子凝縮状態が実現していることが明らかとなってきた。量子振動の起源として特異な準粒子励起、特に中性フェルミオン励起が理論的に提唱されているものの、実証には至っていない。

また、 SmB_6 や YbB_{12} は理論的にトポロジカル絶縁体状態となることが指摘されている。多くのトポロジカル絶縁体のトポロジカルな性質は、スピン・軌道相互作用を伴う軌道のバンド反転に由来している一方、近藤絶縁体ではバンド反転が近藤効果、つまり電子相関効果に由来しており、トポロジカル近藤絶縁体と呼ばれている。実際、トポロジーに由来した表面金属状態の存在が実験的に指摘されているものの、 YbB_{12} においてはトポロジカル絶縁体の特徴であるスピン・運動量ロッキングは観測されておらず、トポロジカル表面状態の有無は議論となっていた。

2. 研究の目的

本研究で目的とするのは、近藤絶縁体における中性フェルミオンを実験的に検出し、その非自明な準粒子の示す物性現象を解明することである。また、中性フェルミオンと量子振動の関係を明らかにすることで、近藤絶縁体における新奇量子凝縮状態の解明を目指す。

3. 研究の方法

(1) 低エネルギー励起に敏感なプローブである熱伝導率および比熱の高感度測定を行った。特に熱伝導率は、電気抵抗率との比較から中性粒子と荷電粒子の寄与を区別して検出することが可能である。さらに、比熱が局所的な励起と遍歴的な励起の両方の寄与を含むのに対し、熱伝導率は遍歴的な励起を選択的に検出できるため、遍歴的な低エネルギー励起に非常に敏感なプローブである。これは量子振動との関わりを明らかにする上でも非常に重要である。近藤絶縁体の研究は、本研究開始当初は国内外で SmB_6 に集中していたが、我々は SmB_6 と同様に典型物質とされる YbB_{12} に着目した。

(2) YbB_{12} においては、強磁場において絶縁体状態から金属状態へ転移することが知られている。先行研究¹⁾において絶縁体状態における量子振動を報告したが、金属状態については詳細な研究例がなく、量子振動の有無は不明であった。磁場誘起金属状態の性質を明らかにすることは、量子振動や中性フェルミオンの起源を解明する鍵となると考えられる。そこで強磁場中電気抵抗測定を行った。

(3) 中性フェルミオン励起が近藤絶縁体に普遍的な現象であるのか、さらには中性フェルミオンが磁気的自由度とどのように相互作用するかを明らかにするために、反強磁性を示す近藤絶縁体 YbIr_3Si_7 の研究を行った。

(4) YbB_{12} におけるトポロジカル表面金属状態を検証するために、集束イオンビーム装置により微細加工した試料について強磁場における精密電気抵抗測定を行った。微細加工を行うことで、表面金属状態の寄与が支配的になり、表面金属状態を詳細に調べることが可能となる。

4. 研究成果

(1) YbB_{12} の絶縁体状態における中性フェルミオン励起

極低温における熱伝導率および比熱測定を行った結果、有限の電子比熱係数 $\gamma = C/T (T \rightarrow 0)$ ならびに残留熱伝導率 $\kappa_0/T = \kappa/T (T \rightarrow 0)$ を観測した (図1)。これらの結果は、金属のようなギャップレスで遍歴的な粒子が存在することを意味する。しかしながら、金属において期待される熱伝導度と電気伝導度のユニバーサル則 (ウィーデマン・フランツ則) は完全に破綻している。したがって、有限の κ_0/T は電荷を持つ粒子 (特に伝導電子) によるものではないことを示している。有限の比熱と熱伝導率の結果は、 YbB_{12} は電気的には絶縁体であるが熱的には金属のように振る舞うことを示しており、ギャップレスで遍歴的な電気的中性のフェルミ粒子が存在することを示している。^{2,3)} 中性フェルミオン励起の理論提案のうち、複合エキシトン説では大きな熱ホール効果の可能性を指摘しており、我々は熱ホール効果の測定を行ったが、観測された熱ホール角は理論の単純な予想の 1% 以下であった。今のところ、量子振動や中性フェルミオン励起をすべて説明できる理論はないように思われる。

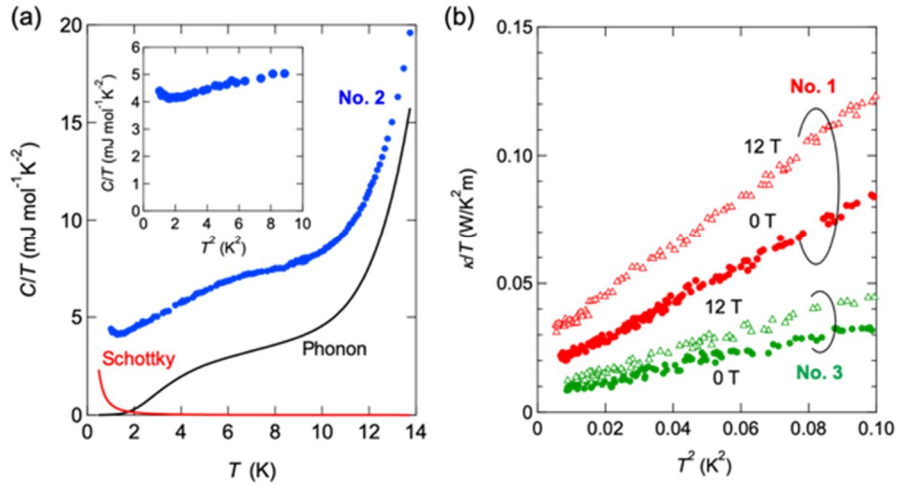


図 1 : YbB₁₂ の比熱 C/T 。挿入図は低温における C/T を T^2 の関数としてプロットしたもの。(b) ゼロ磁場および磁場中の熱伝導率 κ/T を T^2 の関数としてプロットしたもの。 $T \rightarrow 0$ において、 C/T と κ/T はどちらも有限の残留項をもつ。

(2) YbB₁₂ の絶縁体および金属状態における量子振動

精密電気抵抗測定を米国ロスアラモス国立研究所の強磁場施設において 75 テスラまでの強磁場中で行った結果、絶縁体と金属の両方の状態において量子振動を観測した。量子振動の周波数は絶縁体状態では磁場によらず一定であるのに対し、金属状態では大きく磁場依存する。一方、周波数の磁場角度依存性は両状態において変わらず、同一粒子によるフェルミ面が観測されたことを示している。周波数や振幅の詳細な解析により、量子振動は電子によるものではなく、絶縁体と金属の両方の状態において電荷中性の粒子が量子振動を引き起こしていることを明らかにした。さらに金属状態においては中性粒子と電子が共存し、前例のない特異な金属状態が実現していることを示した。⁴⁾

(3) YbIr₃Si₇ における中性フェルミオン励起

YbIr₃Si₇ における反強磁性転移を詳細に調べ、低磁場と高磁場で 2 つの反強磁性相が存在することを明らかにした (低磁場 : AFM-I、高磁場 : AFM-II とする)。この相転移は磁気モーメントが面直方向から面内方向へと突如として倒れるスピン・フロップ転移である。次に低エネルギー励起を調べるために極低温における熱伝導率および比熱の測定を行った。その結果、YbB₁₂ と同様、有限の γ と κ_0/T を観測し、中性フェルミオンの存在が明らかとなった。AFM-I 相で有限であった κ_0/T は AFM-II 相に入ると急激に抑制され、ほぼゼロとなることが明らかとなった。以上の結果は、AFM-II 相において中性フェルミオンの励起スペクトルにギャップが開いたことを意味している。これは中性フェルミオン励起が磁気モーメントと強く結合していることを初めて示すものである。⁵⁾

(4) YbB₁₂ におけるトポロジカル表面状態

微細構造を施した YbB₁₂ 単結晶における電気抵抗測定を行い、微細加工の厚み依存性から表面金属状態の存在を明らかにした。さらに磁場中電気抵抗測定を行い、負の磁気抵抗を観測した。詳細な解析から、負の磁気抵抗の起源がスピン・運動量ロッキングであることを示し、トポロジに保護された表面状態の存在を明らかにした。

一方、単結晶試料における量子振動の磁場角度依存性から、電気抵抗において観測された量子振動は表面ではなく試料の内部 (バルク) に由来することが指摘されているが、表面伝導の寄与は不明であった。これを明らかにするために、表面伝導が支配的な微細加工試料における強磁場中電気抵抗測定を行った。その結果、単結晶試料において観測された量子振動は微細加工試料においては観測されず、量子振動が試料内部のバルク部分由来であることを明らかにした。⁶⁾

< 引用文献 >

- 1) Z. Xiang, Y. Kasahara *et al.*, *Science* **362**, 65-69 (2018).
- 2) Y. Sato, Y. Kasahara *et al.*, *Nat. Phys.* **15**, 954-959 (2019).
- 3) 佐藤雄貴、笠原裕一、伊賀文俊、松田祐司、*日本物理学会誌* **76**, 87-92 (2021).
- 4) Z. Xiang, Y. Kasahara *et al.*, *Nat. Phys.*, published online (2021).
- 5) Y. Sato, Y. Kasahara *et al.*, arXiv:2103.13718 (2021).
- 6) Y. Sato, Y. Kasahara *et al.*, submitted.

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 5件／うちオープンアクセス 3件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Z. Xiang, L. Chen, K.-W. Chen, C. Tinsman, Y. Sato, T. Asaba, H. Lu, Y. Kasahara, M. Jaime, F. Balakirev, F. Iga, Y. Matsuda, J. Singleton, L. Li | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Unusual high-field metal in a Kondo insulator | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Nature Physics | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41567-021-01216-0 | 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 H. Murayama, K. Ishida, R. Kurihara, T. Ono, Y. Sato, Y. Kasahara, H. Watanabe, Y. Yanase, G. Cao, Y. Mizukami, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and S. Kasahara | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Bond Directional Anapole Order in a Spin-Orbit Coupled Mott Insulator $\text{Sr}_2(\text{Ir}_{1-x}\text{Rhx})\text{O}_4$ | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review X | 6. 最初と最後の頁 11021 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevX.11.011021 | 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 M. Yamashita, Y. Sato, T. Tominaga, Y. Kasahara, S. Kasahara, H. Cui, R. Kato, T. Shibauchi, and Y. Matsuda | 4. 巻 101 |
| 2. 論文標題 Presence and absence of itinerant gapless excitations in the quantum spin liquid candidate $\text{EtMe}_3\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 140407(R) |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.101.140407 | 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. Sato, Z. Xiang, Y. Kasahara, T. Taniguchi, S. Kasahara, L. Chen, T. Asaba, C. Tinsman, H. Murayama, O. Tanaka, Y. Mizukami, T. Shibauchi, F. Iga, J. Singleton, Lu Li, and Y. Matsuda | 4. 巻 15 |
| 2. 論文標題 Unconventional thermal metallic state of charge-neutral fermions in an insulator | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Nature Physics | 6. 最初と最後の頁 954-959 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41567-019-0552-2 | 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 M. Naritsuka, S. Nakamura, Y. Kasahara, T. Terashima, R. Peters, and Y. Matsuda | 4. 巻 100 |
| 2. 論文標題 Coupling between the heavy-fermion superconductor CeCoIn ₅ and the antiferromagnetic metal CeIn ₃ through the atomic interface | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 24507 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.024507 | 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 H. Murayama, Y. Sato, T. Taniguchi, R. Kurihara, X. Z. Xing, W. Huang, S. Kasahara, Y. Kasahara, I. Kimchi, M. Yoshida, Y. Iwasa, Y. Mizukami, T. Shibauchi, M. Konczykowski, and Y. Matsuda | 4. 巻 2 |
| 2. 論文標題 Effect of quenched disorder on the quantum spin liquid state of the triangular-lattice antiferromagnet 1T-TaS ₂ | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Research | 6. 最初と最後の頁 13099 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013099 | 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 M. Yamashita, Y. Sato, T. Tominaga, Y. Kasahara, S. Kasahara, H. Cui, R. Kato, T. Shibauchi, and Y. Matsuda | 4. 巻 101 |
| 2. 論文標題 Presence and absence of itinerant gapless excitations in the quantum spin liquid candidate EtMe ₃ Sb[Pd(dmit) ₂] ₂ | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 140407(R) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.140407 | 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 Z. Xiang, Y. Kasahara, T. Asaba, B. Lawson, C. Tinsman, Lu Chen, K. Sugimoto, S. Kawaguchi, Y. Sato, G. Li, S. Yao, Y. L. Chen, F. Iga, John Singleton, Y. Matsuda, Lu Li | 4. 巻 362 |
| 2. 論文標題 Quantum oscillations of electrical resistivity in an insulator | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Science Advances | 6. 最初と最後の頁 65-69 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aap9607 | 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. Kasahara, K. Sugii, T. Ohnishi, M. Shimozawa, M. Yamashita, N. Kurita, H. Tanaka, J. Nasu, Y. Motome, T. Shibauchi, and Y. Matsuda | 4. 巻 120 |
| 2. 論文標題 Unusual Thermal Hall Effect in a Kitaev Spin Liquid Candidate -RuCl ₃ | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 217205/1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.217205 | 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. Kasahara, T. Ohnishi, Y. Mizukami, O. Tanaka, Sixiao Ma, K. Sugii, N. Kurita, H. Tanaka, J. Nasu, Y. Motome, T. Shibauchi and Y. Matsuda | 4. 巻 559 |
| 2. 論文標題 Majorana quantization and half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Nature | 6. 最初と最後の頁 227-231 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-018-0274-0 | 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 Yoshifumi Tokiwa, Takuya Yamashita, Daiki Terazawa, Kenta Kimura, Yuichi Kasahara, Takafumi Onishi, Yasuyuki Kato, Mario Halim, Philipp Gegenwart, Takasada Shibauchi, Satoru Nakatsuji, Eun-Gook Moon, and Yuji Matsuda | 4. 巻 87 |
| 2. 論文標題 Discovery of Emergent Photon and Monopoles in a Quantum Spin Liquid | 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 064702/1-5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.064702 | 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46件(うち招待講演 12件/うち国際学会 15件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐藤雄貴, 富永貴弘, 笠原 成, 笠原裕一, Macy Stavinoha, Emilia Morosan, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 比熱測定でみた近藤絶縁体YbIr ₃ Si ₇ の低エネルギー励起 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 富永貴弘, 佐藤雄貴, 笠原 成, 笠原裕一, Macy Stavinoha, Emilia Morosan, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 反強磁性相を伴う近藤絶縁体YbIr ₃ Si ₇ の熱伝導率測 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 横井太一, 馬斯嘯, 笠原裕一, 笠原成, 芝内孝禎, 栗田伸之, 田中秀数, 那須讓治, 求幸年, C. Hickey, S. Trebst, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 -RuCl ₃ のキタエフスピン液体状態における半整数異常熱ホール効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大湊浩明, 成塚政裕, 横井太一, 笠原成, 笠原裕一, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 キタエフ候補物質 -RuCl ₃ 原子層膜作 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 小野孝浩, 成塚政裕, 井伊崇仁, 笠原成, 笠原裕一, 寺嶋孝仁, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 パルスレーザー堆積法によるKitaev候補物質 -RuCl ₃ 薄膜の作製 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 鈴木裕貴, 佐藤雄貴, 村山 陽奈子, 笠原成, 笠原裕一, 花栗哲郎, 町田理, 芝内孝 禎, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 比熱測定によるFeSeのc軸磁場下における高磁場超伝導相の検証 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 笠原成, 佐藤雄貴, S. Licciardello, M. Culo, S. Arsenijevic, T. Ottenbros, 富永貴弘, J. Boker, I. Eremin, 芝内孝 禎, J. Wosnitza, F. N. E. Hussey, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 強磁場熱輸送測定によるFeSeのab面内磁場下におけるFFLO超伝導の観測 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 村山陽奈子, 富永貴弘, 末次祥大, 笠原成, 笠原裕一, 大熊隆太郎, 廣井善二, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 カゴメ反強磁性体Herbertsmithiteにおける比熱のスケーリング則 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 末次祥大, 横井太一, 田中 伊路, 笠原裕一, 笠原成, 鐘承超, 戸塚圭介, 影山洋, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 SrCu ₂ (BO ₃) ₂ におけるボソンのトポロジカル熱ホール効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Andre de Oliveira Silva, 笠原成, 村山陽奈子, Neven Barisic, Mario Novak, 芝内孝禎, 笠原裕一, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 Thermal Hall effect in the pseudogap phase of underdoped cuprates |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 笠原成, 村山陽奈子, 石田 浩祐, 栗原遼, 小野孝浩, 佐藤雄貴, 笠原裕一, 渡邊 光, 柳瀬陽一, G. Cao, 水 上雄太, 芝内孝禎, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 Sr2Ir1-xRhxO4におけるボンド方向型アナポール秩序 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐藤雄貴, 末次祥大, 富永 貴弘, 笠原裕一, 笠原成, 北川俊作, 石田憲二, Robert Peters, 芝内孝禎, Andriy Nevidomskyy, Long Qian, Jaime Moya, Macy Stavinoha, Emilia Morosan, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 近藤絶縁体YbIr3Si7における中性フェルミオンとその磁場誘起不安定性 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 彭浪, 佐野大樹, 高橋敏史, 板東涼, 末次祥大, 笠原成, 寺嶋孝仁, 笠原裕一, 松田 祐司 |
| 2. 発表標題 Striking enhancement of upper critical field of d-wave CeCoIn5 with atomic layer thickness |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小野孝浩, 井伊崇仁, 武田 海渡, 末次祥大, 笠原成, 笠原裕一, 寺嶋孝仁, 松田 祐司 |
| 2. 発表標題 キタエフ量子スピン液体物質 -RuCl ₃ の薄膜作製 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 鶴飼柚希, 笠原裕一, 末次 祥大, 村山陽奈子, 栗田伸 之, 田中秀数, 橋本顕一郎, 水上雄太, 芝内孝禎, 松田 祐司 |
| 2. 発表標題 Kitaevスピン液体候補物質 -RuCl ₃ におけるトポロジカル相転移の探索 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hinako Murayama, Kousuke Ishida, Ryo Kurihara, takahiro ono, Yuki Sato, Yuichi Kasahara, Hikaru Watanabe, Youichi Yanase, Gang Cao, Yuta Mizukami, Takasada Shibauchi, Yuji Matsuda, Shigeru Kasahara |
| 2. 発表標題 Bond directional anapole state in a spin-orbit coupled Mott insulator Sr ₂ (Ir _{1-x} Rh _x)O ₄ |
| 3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuki Sato, Takahiro Tominaga, Shota Suetsugu, Shigeru Kasahara, Yuichi Kasahara, Robert Peters, Shunsaku Kitagawa, Kenji Ishida, Andriy Nevidomskyy, Long Qian, Jaime Moya, Macy L Stavinoha, Emilia Morosan, Yuji Matsuda |
| 2. 発表標題 Gapless neutral fermions in insulating YbIr ₃ Si ₇ revealed by specific heat and thermal conductivity |
| 3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shota Suetsugu, Taichi Yokoi, Ibuki Tanaka, Yuichi Kasahara, Shigeru Kasahara, Zhong Chengchao, Keisuke Totsuka, Hiroshi Kageyama, Yuji Matsuda |
| 2. 発表標題 Topological thermal Hall effect of strongly interacting bosons in a disordered quantum magnet SrCu ₂ (BO ₃) ₂ |
| 3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichi Kasahara, Taichi Yokoi, Sixiao Ma, Shigeru Kasahara, Takasada Shibauchi, Nobuyuki Kurita, Hidekazu Tanaka, Joji Nasu, Yukitoshi Motome, Ciaran Hickey, Simon Trebst, Yuji Matsuda |
| 2. 発表標題 Half-integer quantized anomalous thermal Hall effect and topological Chern number in the Kitaev material -RuCl ₃ |
| 3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichi Kasahara |
| 2. 発表標題 Half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid: A signature of Majorana fermions and non-Abelian anyons |
| 3. 学会等名 The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON21) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichi Kasahara |
| 2. 発表標題 Half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid: A signature of Majorana fermions and non-Abelian anyons |
| 3. 学会等名 Oxide Superspin Workshop 2019 (OSS2019) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichi Kasahara |
| 2. 発表標題 Half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid: A signature of Majorana fermions and non-Abelian anyons |
| 3. 学会等名 Workshop on Quantum Spin Liquids, Aspen Center for Physics 2019Summer (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 笠原裕一 |
| 2. 発表標題 磁性絶縁体における創発マヨラナ・フェルミオン、非可換エニオン |
| 3. 学会等名 2019年 第80回 応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 富永貴弘, 佐藤雄貴, 笠原成, 笠原裕一, M. Stavinoha, J. Zhang, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 近藤絶縁体YbIr ₃ Si ₇ における極低温熱伝導率測定 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 L. Peng, D. Sano, T. Takahashi, T. Terashima, S. Kasahara, Y. Kasahara, Y. Matsuda |
| 2. 発表標題 Scanning tunneling microscopy and spectroscopy of ultra-thin CeCoIn ₅ films |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 横井太一, 馬斯嘯, 笠原裕一, 笠原成, 芝内孝禎, 栗田伸之, 田中秀数, 那須讓治, 求幸年D, C. Hickey, S. Trebst, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 -RuCl ₃ のKitaevスピン液体状態におけるChern数の磁場角度依存性 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Taichi Yokoi |
| 2. 発表標題 Determining topological Chern number in Kitaev material α -RuCl ₃ |
| 3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science (TopoMat2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuki Sato |
| 2. 発表標題 Quantum oscillations and charge neutral fermions in topological Kondo insulator YbB ₁₂ |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 鈴木裕貴, 村山陽奈子, 佐藤雄貴, 谷口智哉, 栗原遼, X. Z. Xing, 笠原成, 笠原裕一, Itamar Kimchi, 吉田将郎, 岩佐義宏, Marcin Konczykowski, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 1T-TaS ₂ の量子スピン液体における電子線照射の効果と比熱のスケーリング則 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 佐藤雄貴, 笠原成, 笠原裕一, 芝内孝禎, Ziji Xiang, Lu Chen, Colin Tinsman, Lu Li, 伊賀文俊, Nityan Nair, James Analytis, John Singleton, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 微細加工したトポロジカル近藤絶縁体YbB12の輸送現象測定 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 成塚政裕, 高津浩, 笠原成, 笠原裕一, 寺嶋孝仁, 陰山洋, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 キタエフスピン液体候補物質 -RuCl3の単層薄膜作製II |
| 3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 富永貴弘, 横井太一, 馬斯嘯, 笠原裕一, 佐藤雄貴, 村山陽奈子, 栗田伸之, 田中秀数, 那須謙治, 求幸年, C. Hickey, S. Trebst, Chunhyeon Lee, Kwang-Yong Song, 芝内孝禎, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 -RuCl3における熱輸送とIr置換効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 馬斯嘯, 笠原裕一, 大西隆史, 水上雄太, 田中桜平, 杉井かおり, 下澤雅明, 山下穰, 栗田伸之, 田中秀数, 那須謙治, 求幸年, 芝内孝禎, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 -RuCl3におけるマヨラナ量子化条件の検証 |
| 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 谷口智哉, 村山陽奈子, 佐藤雄貴, Z. X. Xing, 笠原成, 笠原裕一, 吉田将郎, 岩佐義宏, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 量子スピン液体候補物質1T-TaS ₂ における遍歴・局在ギャップレス励起の共存 |
| 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 H. Murayama, Y. Sato, T. Taniguchi, R. Kurihara, X. Z. Xing, S. Kasahara, Y. Kasahara, M. Yoshida, Y. Iwasa, M. Konczykowski, Y. Matsuda |
| 2. 発表標題 Effect of randomness on spin excitations in quantum spin liquid state of 1T-TaS ₂ |
| 3. 学会等名 American Physical Society, March Meeting 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Sato, Z. Xiang, Y. Kasahara, T. Taniguchi, S. Kasahara, Lu Chen, T. Asaba, C. Tinsman, H. Murayama, O. Tanaka, Y. Mizukami, T. Shibauchi, F. Iga, John Singleton, Lu Li, Y. Matsuda |
| 2. 発表標題 Charge neutral fermions and quantum oscillations in a topological Kondo insulator YbB ₁₂ |
| 3. 学会等名 American Physical Society, March Meeting 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichi Kasahara |
| 2. 発表標題 Half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid: A signature of Majorana edge modes and non-Abelian excitations |
| 3. 学会等名 American Physical Society, March Meeting 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 村山陽奈子, 佐藤雄貴, 谷口智哉, 栗原遼, Z. X. Xing, 笠原成, 笠原裕一, 吉田将郎, 岩佐義宏, Marcin Konczykowski, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 1T-TaS ₂ の量子スピン液体状態におけるスピン励起へのランダムネスの効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2019年年次大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 馬斯嘯, 笠原裕一, 大西隆史, 水上雄太, 田中桜平, 杉井かおり, 下澤雅明, 山下穰, 栗田伸之, 田中秀数, 那須謙治, 求幸年, 芝内孝禎, 松田祐司 |
| 2. 発表標題 -RuCl ₃ における熱ホール効果の磁場角度依存性 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2019年年次大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichi Kasahara |
| 2. 発表標題 Majorana quantization and half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid |
| 3. 学会等名 Novel Phenomena in Quantum Materials driven by Multipoles and Topology (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichi Kasahara |
| 2. 発表標題 Majorana quantization and half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid |
| 3. 学会等名 21st International Conference on Magnetism (ICM2018) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichi Kasahara |
| 2. 発表標題 Majorana quantization and half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid |
| 3. 学会等名 Erice Workshop 2018 “Majorana Fermion and Topological Materials Science” (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichi Kasahara |
| 2. 発表標題 Half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid: A signature of chiral Majorana edge current |
| 3. 学会等名 International Conference, Control and Dynamics of Quantum Materials (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 笠原裕一 |
| 2. 発表標題 キタエフスピン液体における半整数熱量子ホール効果 |
| 3. 学会等名 基研研究会「スピン系物理の最前線」(招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 笠原裕一 |
| 2. 発表標題 Majorana quantization and half-integer thermal quantum Hall effect in a magnetic insulator |
| 3. 学会等名 量子情報技術研究会(QIT39) (招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 笠原裕一 |
| 2. 発表標題 量子スピン液体におけるマヨラナ準粒子と量子ホール効果 |
| 3. 学会等名 基研研究会・iTHEMS研究会2018「非平衡系の物理学 階層性と普遍性」(招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| 量子凝縮物性研究室 - 京都大学 http://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.php?Top Quantum Condensed Matter Group http://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.php?Top |
|--|

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 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 伊賀 文俊 (Iga Fumitoshi) (60192473) | 茨城大学・理工学研究科(理学野)・教授 (12101) | |

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 | | | |
|---------|------------------------|--------------------------------|-----------------|------|
| 米国 | University of Michigan | Los Alamos National Laboratory | Rice University | 他1機関 |
| フランス | Ecole Polytechnique | | | |