

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02600

研究課題名（和文）キタエフスピン液体候補物質におけるトポロジカル相転移探索

研究課題名（英文）Search for topological phase transitions in Kitaev spin liquid candidate materials

研究代表者

水上 雄太（Mizukami, Yuta）

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80734095

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では磁場角度回転環境下で比熱測定を行うことで、キタエフスピン液体のバルク状態の磁場角度に対する励起の変化を調べた。特に単一の単結晶における磁場角度依存性を検出するため、高感度な磁場角度回転比熱測定系を構築し測定を行った。その結果、キタエフスピン液体候補物質 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>において磁場がa軸方向では励起ギャップが開く一方、b軸方向ではディラック型の分散を反映したギャップレスな励起が生ずることが明らかとなった。これは、キタエフモデルにおいて予測されるマヨラナ粒子の励起ギャップと一致しており、キタエフスピン液体におけるエッジ状態に対するバルク状態を実験的に明らかにしたと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象としたキタエフモデルは、キタエフにより提案された量子スピンモデルであり、このモデルで期待されるマヨラナ粒子や非可換エニオンは、基礎学理として重要なみならず、トポロジカル量子計算への応用も期待されている。本研究により、キタエフ量子スピン液体状態のバルク状態が明らかとなったことにより、現実の物質においてマヨラナ粒子や非可換エニオンの性質に対する理解が大きく進んだと言える。本研究は、量子計算への応用に向けた学理の構築に寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the change of the excitation in the bulk state of Kitaev spin liquid by performing specific heat measurements under magnetic field angle rotation. In particular, in order to detect the field-angle dependence in a single crystal, a highly sensitive field-angle-resolved specific heat measurement system was developed. We found that there is finite excitation gap when the field is directed along a-axis for the Kitaev spin liquid candidate  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>, whereas gapless excitation is observed for magnetic field along b-axis, indicating the Dirac-type dispersion. This observation is consistent with the excitation gap predicted by the Kitaev model for the Majorana fermion, and is first experimental verification of the bulk edge correspondence in the Kitaev spin liquid.

研究分野：磁性

キーワード：キタエフモデル 量子スピン液体 マヨラナ粒子 非可換エニオン チャーン数 トポロジカル転移 比熱測定 磁場角度回転

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

キタエフ模型は、キタエフにより提案された蜂の巣格子上の量子スピン模型であり、スピン 1/2 間にボンドに依存したイジング型の相互作用が働く。この **exchange frustration** により、キタエフ模型においては、基底状態として量子スピン液体状態が厳密解として得られることが理論的に知られている。この模型の特徴的な点の一つとして、スピンのマヨラナ粒子に分数化することが挙げられる。近年、キタエフ模型の候補物質  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  において、マヨラナ粒子の存在を示唆する結果が実験的に報告されてきた。このマヨラナ粒子のバルク状態においては、チェーン数により規定されるトポロジカルな状態が存在し、それに対応したマヨラナ粒子の異なる励起構造が存在することが理論的に予測される。しかしながら、実際の候補物質において、バルク状態のチェーン数に反映されるマヨラナ粒子の励起の詳細は実験的にはまだ調べられていなかった。

### 2. 研究の目的

近年理論的に提案されたキタエフ模型は、その基底状態として量子スピン液体状態を厳密解に持つ稀有な系である。このキタエフ模型は、マヨラナフェルミオン、非可換エニオンといった準粒子の舞台となっている。本研究の目的は、キタエフ量子スピン液体候補物質に対して、磁場方位を制御可能な磁場中精密比熱測定を行い、トポロジカル相を規定する励起ギャップの磁場角度依存性を決定する。これにより、ギャップの閉じるトポロジカル相転移を検出し現実の物質における詳細な相図を構築することでキタエフ量子スピン液体やその準粒子励起に対する理解を飛躍的に向上させる。

### 3. 研究の方法

単一な単結晶を対象とした磁場角度回転可能な比熱測定系の作製を試みる。比熱測定用の試料ステージは応募者が自作したコンパクトな高精度比熱測定用セルを用いる。この測定系により応募者は既存の商用装置の二桁以上上回る分解能を実現している。このセルを、蜂の巣格子面内で磁場方向を制御可能な角度回転系に搭載することで、図 1 のような蜂の巣格子面内の磁場角度回転実験を実現する。この回転系を既存の希釈冷凍機と 12 テスラ超伝導マグネットに搭載することで、12T までの高磁場かつ 100 ミリケルビンの極低温環境下において、比熱の精密測定が可能となることが期待される。本研究で用いる  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  の単結晶試料は、応募者らの先行研究に引き続き共同研究者である東京工業大学の田中秀数教授、栗田伸之助教より提供頂いたものを用いる。

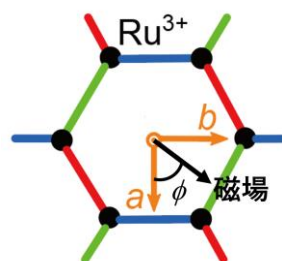


図 1.  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  の蜂の巣格子面内の磁場角度回転の模式図。

### 4. 研究成果

本研究は、キタエフ模型において期待されるマヨラナ粒子のバルク状態の性質を調べることを目的としている。近年、キタエフ量子スピン液体候補物質である $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>において、熱ホール効果の実験を始めとしてマヨラナ粒子の存在を示す結果が報告されている。熱ホール効果は、マヨラナ粒子のエッジ流により生ずることが当初理論的に予測されており、その後実験的に報告された。一方、バルク・エッジ対応として、このエッジ状態に対するバルク状態が存在するが、そのバルク状態の詳細な励起構造はまだ明らかになっていなかった。

本研究では、精密な比熱測定を磁場角度回転環境下で行うことで、マヨラナ粒子のバルク状態の磁場角度に対する励起構造変化を調べた。試料の磁場角度に対する高精度な変化を検出するためには、単一単結晶を対象とした測定が望ましく、その場合は高感度な熱量計が必要となる。本研究では、磁場角度回転環境下で測定可能な高感度な熱量計を構築し測定を行った。その結果、 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>において図2に示すように、比熱が、蜂の巣格子面内の磁場角度に対して、大きな6回対称を示すことが明らかとなった。この6回対称の磁場角度依存性においては、7テスラ程度以下の反強磁性相とそれ以上の

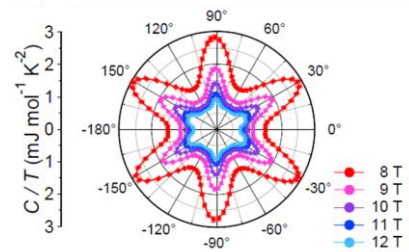


図 2. 比熱の磁場角度回転依存性 [1]

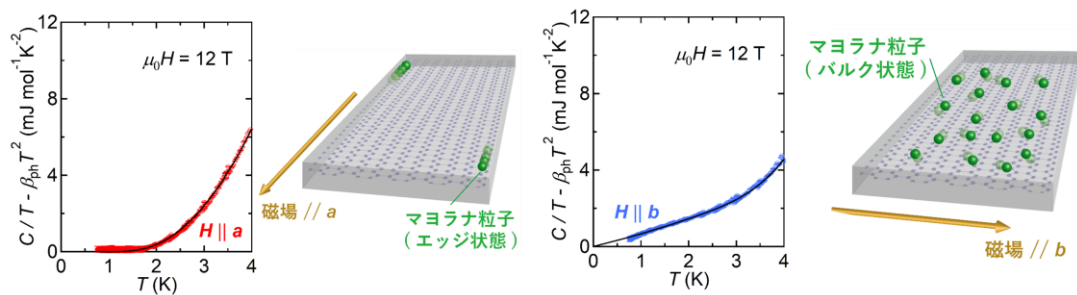


図 3. 磁場を  $a$  軸と  $b$  軸方向に印加した際の比熱の温度依存性[1]と、それぞれ対応するマヨラナ励起の概念図。

無秩序状態とでは、位相が  $30^\circ$  変化しており、それぞれ異なる状態を反映していることが明らかとなった。7 テスラ以上の無秩序状態での、比熱の温度依存性を調べると、磁場が  $a$  軸方向では、励起ギャップが開いている一方、 $b$  軸方向にはディラック型の分散を反映したギャップレスな励起が生ずることが明らかとなった(図3)。この励起ギャップの磁場角度依存性を調べると、磁場を蜂の巣格子面内で角度変化させる場合においては、この系は6つのギャップレスな方向を持つ6回対称性を持つ励起ギャップを持つことが明らかとなった。これは、キタエフ模型において予測されるマヨラナ粒子の励起ギャップと一致しており、そのバルク状態を実験的に明らかにしたと言える。さらにこの結果は、先行研究におけるマヨラナ粒子のエッジ状態と、バルク・エッジ対応として矛盾なく説明が可能である。

[1] O. Tanaka, Y. Mizukami *et al.*, Nat. Phys. 18, 429-435 (2022).

## 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 8件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Kuwayama T., Matsuura K., Gouchi J., Yamakawa Y., Mizukami Y., Kasahara S., Matsuda Y., Shibauchi T., Kontani H., Uwatoko Y., Fujiwara N.	4. 巻 11
2. 論文標題 Pressure-induced reconstitution of Fermi surfaces and spin fluctuations in S-substituted FeSe	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 17265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-96277-9	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 Ishihara K., Takenaka T., Miao Y., Mizukami Y., Hashimoto K., Yamashita M., Konczykowski M., Masuki R., Hirayama M., Nomoto T., Arita R., Pavlosiuk O., Wisniewski P., Kaczorowski D., Shibauchi T.	4. 巻 11
2. 論文標題 Tuning the Parity Mixing of Singlet-Septet Pairing in a Half-Heusler Superconductor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 41048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.11.041048	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 Tanaka O., Mizukami Y., Harasawa R., Hashimoto K., Hwang K., Kurita N., Tanaka H., Fujimoto S., Matsuda Y., Moon E.-G., Shibauchi T.	4. 巻 18
2. 論文標題 Thermodynamic evidence for a field-angle-dependent Majorana gap in a Kitaev spin liquid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 429 ~ 435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-021-01488-6	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 Roppongi M., Ishihara K., Tanaka Y., Ogawa K., Okada K., Liu S., Mukasa K., Mizukami Y., Uwatoko Y., Grasset R., Konczykowski M., Ortiz B. R., Wilson S. D., Hashimoto K., Shibauchi T.	4. 巻 14
2. 論文標題 Bulk evidence of anisotropic s-wave pairing with no sign change in the kagome superconductor CsV3Sb5	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 667
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-36273-x	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 Watanabe Yoshito, Miyake Atsushi, Gen Masaki, Mizukami Yuta, Hashimoto Kenichiro, Shibauchi Takasada, Ikeda Akihiko, Tokunaga Masashi, Kurumaji Takashi, Tokunaga Yusuke, Arima Taka-hisa	4. 巻 14
2. 論文標題 Double dome structure of the Bose Einstein condensation in diluted S=3/2 quantum magnets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-36725-4	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 Ishida Kousuke, Onishi Yugo, Tsujii Masaya, Mukasa Kiyotaka, Qiu Mingwei, Saito Mikihiro, Sugimura Yuichi, Matsuura Kohei, Mizukami Yuta, Hashimoto Kenichiro, Shibauchi Takasada	4. 巻 119
2. 論文標題 Pure nematic quantum critical point accompanied by a superconducting dome	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2110501119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2110501119	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 Tsujii Masaya, Ishida Kousuke, Ishida Shigeyuki, Mizukami Yuta, Iyo Akira, Eisaki Hiroshi, Shibauchi Takasada	4. 巻 91
2. 論文標題 Charge Transport in Ba1-xRbxFe2As2 Single Crystals	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 104706-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.104706	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 Roppongi M., Ishihara K., Tanaka Y., Ogawa K., Okada K., Liu S., Mukasa K., Mizukami Y., Uwatoko Y., Grasset R., Konczykowski M., Ortiz B. R., Wilson S. D., Hashimoto K., Shibauchi T.	4. 巻 14
2. 論文標題 Bulk evidence of anisotropic s-wave pairing with no sign change in the kagome superconductor CsV3Sb5	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 667
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-36273-x	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 Watanabe Yoshito, Miyake Atsushi, Gen Masaki, Mizukami Yuta, Hashimoto Kenichiro, Shibauchi Takasada, Ikeda Akihiko, Tokunaga Masashi, Kurumaji Takashi, Tokunaga Yusuke, Arima Taka-hisa	4. 巻 14
2. 論文標題 Double dome structure of the Bose-Einstein condensation in diluted S=3/2 quantum magnets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-36725-4	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 Takenaka T., Ishihara K., Roppongi M., Miao Y., Mizukami Y., Makita T., Tsurumi J., Watanabe S., Takeya J., Yamashita M., Torizuka K., Uwatoko Y., Sasaki T., Huang X., Xu W., Zhu D., Su N., Cheng J.-G., Shibauchi T., Hashimoto K.	4. 巻 7
2. 論文標題 Strongly correlated superconductivity in a copper-based metal-organic framework with a perfect kagome lattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabf3996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abf3996	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 Murayama H., Ishida K., Kurihara R., Ono T., Sato Y., Kasahara Y., Watanabe H., Yanase Y., Cao G., Mizukami Y., Shibauchi T., Matsuda Y., Kasahara S.	4. 巻 11
2. 論文標題 Bond Directional Anapole Order in a Spin-Orbit Coupled Mott Insulator Sr <sub>2</sub> (Ir <sub>1-x</sub> Rh <sub>x</sub> )O <sub>4</sub>	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 Mukasa K., Matsuura K., Qiu M., Saito M., Sugimura Y., Ishida K., Otani M., Onishi Y., Mizukami Y., Hashimoto K., Gouchi J., Kumai R., Uwatoko Y., Shibauchi T.	4. 巻 12
2. 論文標題 High-pressure phase diagrams of FeSe <sub>1-x</sub> Te <sub>x</sub> : correlation between suppressed nematicity and enhanced superconductivity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-20621-2	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 Mizukami Y., Konczykowski M., Tanaka O., Juraszek J., Henkie Z., Cichorek T., Shibauchi T.	4. 巻 2
2. 論文標題 Suppression of anharmonic phonons and s-wave superconductivity by defects in the filled skutterudite LaRu4As12	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043428	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 Hosoi S., Aoyama T., Ishida K., Mizukami Y., Hashizume K., Imaizumi S., Imai Y., Ohgushi K., Nambu Y., Kimata M., Kimura S., Shibauchi T.	4. 巻 2
2. 論文標題 Dichotomy between orbital and magnetic nematic instabilities in BaFe2S3	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043293	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 Hashimoto Takahiro, Ota Yuichi, Tsuzuki Akihiro, Nagashima Tsubaki, Fukushima Akiko, Kasahara Shigeru, Matsuda Yuji, Matsuura Kohei, Mizukami Yuta, Shibauchi Takasada, Shin Shik, Okazaki Kozo	4. 巻 6
2. 論文標題 Bose-Einstein condensation superconductivity induced by disappearance of the nematic state	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabb9052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abb9052	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 Huang W. K., Hosoi S., Culo M., Kasahara S., Sato Y., Matsuura K., Mizukami Y., Berben M., Hussey N. E., Kontani H., Shibauchi T., Matsuda Y.	4. 巻 2
2. 論文標題 Non-Fermi liquid transport in the vicinity of the nematic quantum critical point of superconducting FeSe1-xSx	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033367	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 Ishida Kousuke, Hosoi Suguru, Teramoto Yuki, Usui Tomohiro, Mizukami Yuta, Itaka Kenji, Matsuda Yuji, Watanabe Takao, Shibauchi Takasada	4. 巻 89
2. 論文標題 Divergent Nematic Susceptibility near the Pseudogap Critical Point in a Cuprate Superconductor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 064707 ~ 064707
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.064707	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41件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 水上雄太
2. 発表標題 FeSe系超伝導体におけるマルチバンドBCS-BECクロスオーバー
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 六本木雅生, 石原滉大, 田中優之介, 小河弘樹, 岡田昂, 劉蘇鵬, 向笠清隆, 水上雄太, 上床美也, R. Grasset, M. Konczykowski, Brenden R. Ortiz, Stephen D. Wilson, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 カゴメ格子系超伝導体CsV3Sb5における超伝導対称性
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 大西朝登, 影山遥一, 六本木雅生, 水上雄太, Brenden R. Ortiz, Stephen D. Wilson, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 カゴメ格子超伝導体CsV3Sb5におけるネマティック感受率測定
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 今村薫平, 水上雄太, 吉田悠生, 橋本顕一郎, 栗田伸之, 田中秀数, 藤本聡, 山田昌彦, 松田祐司, E.-G. Moon, 芝内孝禎
2. 発表標題 極低温磁場角度分解比熱測定によるキタエフ候補物質 $-RuCl_3$ におけるマヨラナ励起の検証
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 Shengjie Fang, 水上雄太, 今村薫平, 難波隆一, 石原滉大, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 Kitaev候補物質 $Na_2Co_2TeO_6$ における磁場中比熱の角度依存性
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 Z.-Y. Yu, 中村昂矢, 猪股和也, 御栗丈虎, 沈曉玲, 松浦康平, 水上雄太, 笠原成, 松田祐司, 芝内孝禎, 上床美也, 藤原直樹
2. 発表標題 NMRから見たS置換FeSe系の超伝導状態での異常なスピン揺らぎ
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 石原滉大, 小林雅之, 六本木雅生, 松浦康平, 水上雄太, M. Konczykowski, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 Fe(Se,S)における不純物効果と超伝導ギャップ構造
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 新井陽介, 黒田健太, 野本拓也, 筒井智嗣, 田中宏明, Yuyang Dong, 岩田拓万, 片山和郷, 水上雄太, 平井大悟郎, 幸埴, 久保田正人, 芳賀芳範, 鈴木博之, 宮坂茂樹, 田島節子, 有田亮太郎, 近藤猛
2. 発表標題 少数キャリア半金属 CeX における強相関電子状態
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 近藤玲央名, 石原滉大, 松浦康平, 水上雄太, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 磁場角度分解抵抗測定を用いた正方晶Fe(Se,S)におけるネマティック超伝導状態の検証
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 永島拓也, 石原滉大, 小林雅之, 六本木雅生, 松浦康平, 水上雄太, Romain Grasset, Marcin Konczykowski, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 不純物効果を用いたFe(Se,S)の超伝導ギャップ構造の研究
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 Z.-Y. Yu, 中村昂矢, 猪股和也, 御栗丈虎, 沈曉玲, 松浦康平, 水上雄太, 笠原成, 松田祐司, 芝内孝禎, 上床美也, 藤原直樹
2. 発表標題 18%S置換FeSeの超伝導状態における異常なスピン揺らぎ
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 水上雄太
2. 発表標題 FeSe系超伝導体におけるマルチバンドBCS-BECクロスオーバー
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 六本木雅生, 石原滉大, 田中優之介, 小河弘樹, 岡田昂, 劉蘇鵬, 向笠清隆, 水上雄太, 上床美也, R. Grasset, M. Konczykowski, Brenden R. Ortiz, Stephen D. Wilson, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 カゴメ格子系超伝導体CsV3Sb5における超伝導対称性
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 大西朝登, 影山遥一, 六本木雅生, 水上雄太, Brenden R. Ortiz, Stephen D. Wilson, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 カゴメ格子超伝導体CsV3Sb5におけるネマティック感受率測定
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 今村薫平, 水上雄太, 吉田悠生, 橋本顕一郎, 栗田伸之, 田中秀数, 藤本聡, 山田昌彦, 松田祐司, E.-G. Moon, 芝内孝禎
2. 発表標題 極低温磁場角度分解比熱測定によるキタエフ候補物質 -RuCl3におけるマヨラナ励起の検証
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 Shengjie Fang, 水上雄太, 今村薫平, 難波隆一, 石原滉大, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 Kitaev候補物質Na <sub>2</sub> Co <sub>2</sub> Te <sub>6</sub> における磁場中比熱の角度依存性
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 Z.-Y. Yu, 中村昂矢, 猪股和也, 御栗丈虎, 沈曉玲, 松浦康平, 水上雄太, 笠原成, 松田祐司, 芝内孝禎, 上床美也, 藤原直樹
2. 発表標題 NMRから見たS置換FeSe系の超伝導状態での異常なスピン揺らぎ
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 石原滉大, 小林雅之, 六本木雅生, 松浦康平, 水上雄太, M. Konczykowski, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 Fe(Se,S)における不純物効果と超伝導ギャップ構造
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 新井陽介, 黒田健太, 野本拓也, 筒井智嗣, 田中宏明, Yuyang Dong, 岩田拓万, 片山和郷, 水上雄太, 平井大悟郎, 辛埴, 久保田正人, 芳賀芳範, 鈴木博之, 宮坂茂樹, 田島節子, 有田亮太郎, 近藤猛
2. 発表標題 少数キャリア半金属 CeX における強相関電子状態
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 近藤玲央名, 石原滉大, 松浦康平, 水上雄太, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 磁場角度分解抵抗測定を用いた正方晶Fe(Se,S)におけるネマティック超伝導状態の検証
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 永島拓也, 石原滉大, 小林雅之, 六本木雅生, 松浦康平, 水上雄太, Romain Grasset, Marcin Konczykowski, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 不純物効果を用いたFe(Se,S)の超伝導ギャップ構造の研究
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 Z.-Y. Yu, 中村昂矢, 猪股和也, 御栗丈虎, 沈曉玲, 松浦康平, 水上雄太, 笠原成, 松田祐司, 芝内孝禎, 上床美也, 藤原直樹
2. 発表標題 18%S置換FeSeの超伝導状態における異常なスピン揺らぎ
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 水上雄太
2. 発表標題 比熱測定から見るKitaエフ量子スピン液体のマヨラナ励起
3. 学会等名 ワークショップ(4)「超伝導物質、トポロジカル物質」 SCTM2020 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水上雄太
2. 発表標題 強相関超伝導体の電子対形成に関する実験研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 Bond directional anapole state in a spin-orbit coupled Mott insulator $\text{Sr}_2(\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x)\text{O}_4$
3. 学会等名 American Physical Society, March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Mukasa, K. Matsuura, M. Qiu, M. Saito, Y. Sugimura, K. Ishida, M. Otani, Y. Onishi, Y. Mizukami, K. Hashimoto, J. Gouchi, R. Kumai, Y. Uwatoko, and T. Shibauchi
2. 発表標題 High-pressure electronic phase diagrams in $\text{FeSe}_{1-x}\text{Tex}$
3. 学会等名 American Physical Society, March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ishihara, M. Roppongi, M. Kobayashi, Y. Mizukami, H. Sakai, Y. Haga, K. Hashimoto, and T. Shibauchi
2. 発表標題 Low-energy quasiparticle excitations in the spin-triplet superconductor $\text{UTe}_2$
3. 学会等名 American Physical Society, March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Roppongi, K. Ishihara, Y. Mizukami, K. Hashimoto, K. Hoshi, Y. Mizuguchi and T. Shibauchi
2. 発表標題 Low-energy quasiparticle excitations in a BiCh <sub>2</sub> -based superconductor studied by magnetic penetration depth measurements
3. 学会等名 American Physical Society, March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 影山遥一, 児玉壮平, 水上雄太, 谷内敏之, 橋本顕一郎, Arnaud Fouchet, Andres F. Santander-Syro, 辛埴, 芝内孝禎
2. 発表標題 レーザー励起光電子顕微鏡を用いたSrVO <sub>3</sub> における強磁性ドメインの観察
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 石原滉大, 六本木雅生, 小林雅之, 水上雄太, 橋本顕一郎, 酒井宏典, 芳賀芳範, 芝内孝禎
2. 発表標題 スピントリプレット超伝導体UTe <sub>2</sub> における磁場侵入長測定
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 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 Sr <sub>2</sub> Ir <sub>1-x</sub> Rh <sub>x</sub> O <sub>4</sub> 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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 六本木雅生, 石原滉大, 水上雄太, 星和久, 水口佳一, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 BiCh <sub>2</sub> 系超伝導体における磁場侵入長測定
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 鶴飼袖希, 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 K <sub>1</sub> taevスピン液体候補物質 -RuCl <sub>3</sub> 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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原澤龍平, 田中桜平, 水上雄太, 栗田伸之, 田中秀数, 山田昌彦, 藤本聡, 笠原裕一, 松田祐司, Eun-Gook Moon, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 キタエフスピン液体候補物質 -RuCl <sub>3</sub> における磁場中比熱の異方性
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 今村薫平, 田中桜平, 水上雄太, 原澤龍平, 橋本顕一郎, 栗田伸之, 田中秀数, 山田昌彦, 藤本聡, 松田祐司, E.-G. Moon, M. Konczykowski, 芝内孝禎
2. 発表標題 キタエフ物質 -RuCl <sub>3</sub> における電子線照射の影響
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 長島椿, 橋本高広, Sahand Najafzadeh, 大内俊一郎, 鈴木剛, 福島昭子, 笠原成, 松田祐司, 松浦康平, 水上雄太, 橋本顕一郎, 芝内孝禎, 幸埴, 岡崎浩三
2. 発表標題 レーザー角度分解光電子分光によるFe(Se, S)の非ネマティック相における超伝導状態の研究
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 斎藤三樹彦, 松浦康平, 向笠清隆, 杉村優一, 大谷棕, M. Qiu, 石田浩祐, 大西由吾, 水上雄太, 橋本顕一郎, 熊井玲児, 郷地順, 上床美也, 芝内孝禎
2. 発表標題 FeSe <sub>1-x</sub> Texの単結晶試料合成と電子相図の研究
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 向笠清隆, 松浦康平, 杉村優一, 大谷棕, M. Qiu, 斎藤三樹彦, 石田浩祐, 大西由吾, 水上雄太, 橋本顕一郎, 郷地順, 上床美也, 芝内孝禎
2. 発表標題 鉄系超伝導体FeSe <sub>1-x</sub> Texの圧力下電子相図
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 石田浩祐, 大西由吾, 辻井優哉, 向笠清隆, M. Qiu, 斎藤三樹彦, 松浦康平, 杉村優一, 水上雄太, 橋本顕一郎, 芝内孝禎
2. 発表標題 鉄系超伝導体Fe(Se,Te)におけるネマティック量子臨界点
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 中村昂矢, 桑山昂典, 松浦康平, 水上雄太, 笠原成, 松田祐司, 芝内孝禎, 上床美也, 藤原直樹
2. 発表標題 FeSe <sub>1-x</sub> S <sub>x</sub> (x = 0.18)における高圧下 <sup>77</sup> Se-NMR測定
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 猪股和也, 中村昂矢, 桑山昂典, 松浦康平, 水上雄太, 笠原成, 松田祐司, 芝内孝禎, 上床美也, 藤原直樹
2. 発表標題 FeSe <sub>1-x</sub> S <sub>x</sub> (x = 0.05)における高圧下 <sup>77</sup> Se-NMR測定
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="https://sites.google.com/view/yutamizukamipage/home?authuser=0">https://sites.google.com/view/yutamizukamipage/home?authuser=0</a> <a href="http://www.vlt.phys.tohoku.ac.jp/">http://www.vlt.phys.tohoku.ac.jp/</a>
--

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			
中国	Chinese Academy of Sciences			
米国	University of Colorado at Boulder			
フランス	Ecole Polytechnique			
ポーランド	Polish Academy of Sciences			
オランダ	Radboud University			
韓国	KAIST			