

強相関物質のトポロジカル相

前野 悦輝 / 京都大学 大学院理学研究科 教授

計画研究 A01「強相関物質のトポロジカル相」の目的は、電子間の相互作用が強い物質（強相関物質）での、トポロジカルに非自明な量子凝縮状態や量子相転移の研究を格段に深化・発展させることです。

本研究では、遷移金属酸化物や重い電子系化合物を主な舞台として、人工超格子や微細加工・接合系も含めて、特にトポロジカル相の出現や物性制御における、電子相関の有効性を明らかにしてきました。

研究テーマとして、主にトポロジカル超伝導体、トポロジカル半金属・金属、トポロジカルモット絶縁体・磁性体の3つの軸に沿って進めています（図1）。トポロジカル磁性体に関して、昨年度にキタエフ量子スピン液体での半整数熱量子ホール効果という世界的に注目される顕著な成果を挙げました。以下ではまず、このテーマを先頭に、今年度の主な成果をテーマごとにご紹介します。

なお、文末の引用文献リストで、[a-f] は H30(2018) 年度 2 月以降、[1-25] は H31-R1 (2019) 年度の研究項目 A01（計画研究と公募研究）の発表論文を发表順に並べたものです。



図1: 計画研究 A01 で扱う主な物質と物性。

【1. トポロジカルモット絶縁体・磁性体】

(1-1) 量子スピン液体

マヨラナ・フェルミオンが実現しうる系である、キタエフ量子スピン液体に関する研究は、本領域

の松田、高木を中心とする実験グループ、また藤本、宇田川、那須(公募研究 D02)をはじめとする理論メンバーが世界をリードする成果を挙げてきました。

高木らは、このキタエフ量子スピン液体の物理概念と候補物質についての包括的なレビューを発表しました [f]。元々純粹に理論として提案されたハニカム（ハチの巣）格子上のキタエフ模型は、二種類のマヨラナ準粒子で記述し直すことにより解かれ、二次元以上の厳密解量子スピン液体として特別な意味を持ちます。このレビューでは、このキタエフ量子スピン液体の物質相での実現に向けた理論予想と実際の候補物質でのキタエフ系量子相とマヨラナ励起について近年の研究をまとめています。

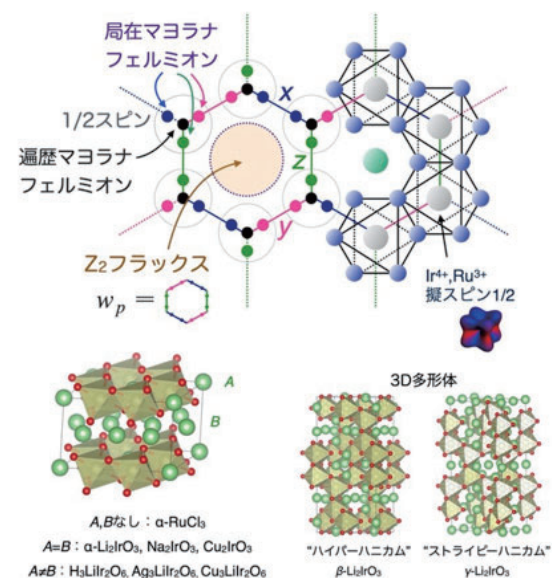


図2: キタエフハニカム模型量子液体の模式図とキタエフ系候補物質。

キタエフ量子スピン液体の実現には、磁性元素間にキタエフ型相互作用と呼ばれる特殊な異方的相互作用が必要とされてきました。強いスピン軌道相互作用をもつ Ru、Ir 化合物群ではそれらの有効磁気モーメント $J_{\text{eff}}=1/2$ 間にキタエフ型相互作用が実現しうることが予想され、(Li, Na)₂IrO₃ や α -RuCl₃ などが有力な候補物質として着目され

ました。その後、3次元ハニカム様化合物群や一価イオンによる元素置換戦略により精力的に $J_{\text{eff}} = 1/2$ 磁性が調べられました。ただし、殆どの場合低温で磁気秩序化してスピン液体性を生じません。しかし、次項に紹介します通り、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ では、高エネルギー側のマヨラナ準粒子の特徴が様々な実験で理論計算との対応が発見され、良いモデルケースとなっています。一方で、水素による元素置換体 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ では実際にスピン液体性が極低温まで成立することが本計画研究で発見されました。これらのキタエフ系研究は大きな前進でしたが、別の形の相互作用を伴う実際のスピン系では純粋なキタエフ液体の理論とは齟齬が大きいいため、より現実物質に近い場合の理論の必要性とより広い化合物群でのキタエフ系の探索が今後の研究の方向性として提案されてレビューは締めくくられています。

(1-2) $\alpha\text{-RuCl}_3$ でのマヨラナ・フェルミオン現象

笠原・松田・那須らが昨年度に発表した $\alpha\text{-RuCl}_3$ での「半整数熱量子ホール効果」の発見は、マヨラナ・フェルミオンおよび非可換エニオンの直接的な証拠を与えるものです。これは我が国が発信した重要成果で、トポロジカル現象の研究分野で世界中で大きな反響を得ています。前号でも解説記事とともに詳しくお伝えしました。今年度は、熱ホール効果が半整数量子化する磁場方向がキタエフ模型で予想される振舞と一致すること、特に面内磁場においても半整数熱量子ホールが現れることを明らかにしました [24]。

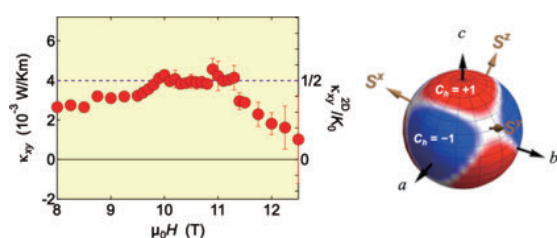


図 3: (左) 面内磁場中において観測された熱ホール効果の半整数量子化。(右) キタエフ模型におけるトポロジカル不変量 (チャーン数) の磁場方向依存性。

現実の物質ではキタエフ型相互作用以外の磁気相互作用も存在するので、それらの影響を知ることが重要です。藤本らは、異なる方向を向く隣接スピン間の交換相互作用の影響を理論的に吟味しました [3]。その結果、そのような相互作用によってマヨラナ・フェルミオンの状態はむしろ安定化することがわかりました。

(1-3) パイロクロア酸化物の量子スピナイス

宇田川らは、パイロクロア構造の酸化物磁性体に現れる量子スピナイスの素励起、磁気モノポールの運動特性を明らかにしました。キタエフ模型のマヨラナ・フェルミオンと同様、磁気モノポールはスピンが分裂して生じる、半整数の磁気量子数を備えた素励起であり、そのダイナミクスには基本的な興味があります。3次元空間を遍歴する磁気モノポールの低エネルギー状態密度には、1次元の van-Hove 特異点に対応する強い特異性が生じ、熱力学や輸送特性に大きな影響を与えることを明らかにしました [e]。

【2. トポロジカル超伝導体】

トポロジカル超伝導の研究が世界的に展開される中で、本新学術領域の特徴として、ルテニウム酸化物・重い電子系化合物を含むバルク系での研究成果があげられます。また、薄膜、微細構造、人工超格子系でも独自性の高い成果を挙げています。

(2-1) ルテニウム酸化物の超伝導状態

時間反転対称性を破るトポロジカル超伝導体の有力候補である Sr_2RuO_4 の理解は、超伝導分野での重要課題として現在、世界的に注目されています [*]。最近、これまでの核磁気共鳴 (NMR) の実験に技術的問題があったことがわかり [**]、石田、前野らは NMR パルスによって数ミリ秒の間、試料温度が超伝導転移温度 T_c 以上になっていたことを確認しました [21]。これを受けて、偏極中性子散乱でのスピン磁化率の再実験も行われました [25]。これらからクーパ対としてスピン三重項が有力となり、スピン三重項の場合も現時点では否定されていませんが、秩序変数 d ベクトルが RuO_2 面に平行、すなわちクーパ対のスピンが RuO_2 面内で少なくとも部分的に消えている状態が必要となります。

時間反転対称性の有無をめぐるのは、柏谷 (B01)、佐藤 (D01)、田仲 (B01)、前野らは、トンネル効果で従来着目されていなかった解析手法によって、臨界電流が電流・磁場の同時反転に対して不変であることから、時間反転対称性を破らないことを導き、 d ベクトルが RuO_2 面内にあるヘリカル状態を提唱しました (計画研究 B01 の記事に図を掲載) [10]。これはトポロジカル結晶超伝導状態です。ところが、ミュオンスピン緩和からは、

TOPICS

一軸性圧力に伴い T_c が倍以上に上昇するのに対して、時間反転対称性の破れを意味する内部磁場の発生温度 T_{RSB} はやや下降することがわかりました [25]。この振舞は時間反転対称を破る超伝導状態で予想されていたものです。さらに Sr_2RuO_4 のマイクロリングでは自発的に DC-SQUID の振舞が現れることから、カイラルドメインなど二つの超伝導状態の縮退が強く示唆されています。

この他、前野・米澤らは、強磁性体との接合素子で、トンネルスペクトル [5] や近接効果の磁場方向依存性 [15] から、強磁性体へクーパ対が深く浸入する特異性を明らかにしました。

浅野、羽部 (A01-PD) らは、強磁性半導体と超伝導体の接合での近接効果を分析しました [11]。また、浅野らは時間反転対称性を破るカイラル超伝導体のエッジ状態にあるマヨラナ粒子を観測する方法を理論的に提案しました [14]。さらに、浅野、田仲らは常伝導金属線の側面に取り付けた s 波、または p 波超伝導体の近接効果を理論的に調べ、 p 波では位相干渉長が接合抵抗に敏感に依存することを明らかにしました (計画研究 B01 の記事に図を掲載) [4]。

Sr_2RuO_4 の超伝状態の解明は解決に向かって激動の様相で、スピン重項のシナリオでも主な実験事実を矛盾なく説明出来るモデルがありません。現時点での実験事実をよくまとめて、一つの提案を示す論文も出されています [***]。

(2-2) ネマチック超伝導

超伝導秩序変数が結晶の回転対称性を自発的に破る「ネマチック超伝導」状態について、水島 (D01)・藤本らは、その励起状態であるカイラル・ヒッグスモードの解析を行いました (計画研究 D01 の記事に図を掲載) [18]。

また、米澤・前野らは、トポロジカル絶縁体に Sr をインターカレートして出現するトポロジカル超伝導について、そのネマチック超伝導のドメイン構造が一軸圧力の印加によって制御できることを明らかにしました [22]。

(2-4) 鉄系超伝導体の量子臨界点

トポロジカル超伝導性によって超伝導量子渦の芯にマヨラナ粒子の存在が示唆されている $\text{FeS}_{1-x}\text{S}_x$ について、松田らは、 $x=0.15$ での反強磁性相 - 超伝導相の量子臨界点付近での磁気抵抗が、2 成分からなることを明らかにしました [12]。これらは

軌道効果と量子臨界効果が共存することを意味します。

【3. トポロジカル半金属等】

(3-1) ディラック半金属

アンチペロブスカイト酸化物は 3 次元ディラック電子をもち、トポロジカル結晶絶縁体の候補物質です。米澤・前野らは、本プロジェクトによってアンチペロブスカイト酸化物で初の超伝導を発見した $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ 及び母物質 Sr_3SnO のメスバウアー分光から Sn のマイナス 4 価電子状態を明らかにしました [16]。また、羽部は、計画研究 B01 の記事で詳しく取り上げた、3 重以上に縮退したディラック電子を持つ CoSi の光学伝導度の計算から、通常のディラック半金属と異なるカイラルフェルミオン特有の周波数依存性を導きました [17]。

(3-2) 非エルミート・ハミルトニアンによるポロジカル半金属の解析

藤本、永井 (公募研究 D03) らは、非エルミート・ハミルトニアンを用いて、ワイルおよびディラック半金属の不純物効果を解析し、リングやフラットバンドの電子状態が出現することを導きました。これらの状態は光電子分光やトンネル効果による準粒子スペクトルから観測できることを提案しました [19]。

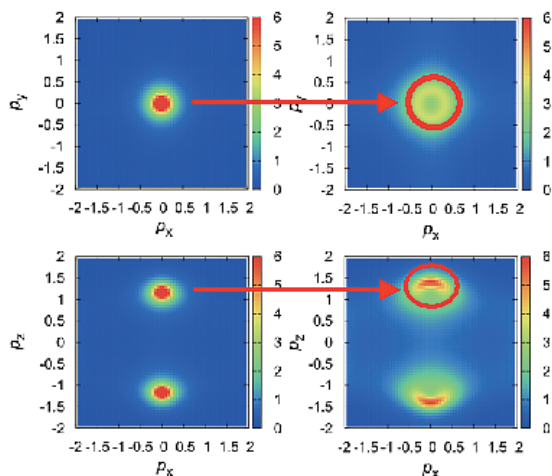


図 4: ディラック半金属・ワイル半金属では、不純物が生み出す非エルミート性によってリング状や平板状の電子バンドが出現

以上述べたように、本計画研究 A01 は、《研究項目 A：トポロジーと強相関》の柱として、公募研究 A01 (4 件)・D02 (4 件) との連携や他の研究項目との間での共同研究で様々な成果を挙げま

した。さらに、国際共同研究の展開も含め、強相関系でのトポロジカル物質科学の分野で世界を先導する研究成果を発信しています。本計画研究で取り組んできた超伝導・半金属(金属)・絶縁体(磁性体)のそれぞれのテーマで、この5年間で深化・発展を遂げ、トポロジカル物質科学の新学術領域の構築に貢献しました。

[*] "Superconductivity mystery turns 25", N. P. Armitage, *Nature* **576**, 386 (Dec. 2019).

[**] "Constraints on the superconducting order parameter in Sr_2RuO_4 from oxygen-17 nuclear magnetic resonance", A. Pustogow, Y. Luo, A. Chronister, Y.-S. Su, D. A. Sokolov, F. Jerzembeck, A. P. Mackenzie, C. W. Hicks, N. Kikugawa, S. Raghu, E. D. Bauer, and S. E. Brown, *Nature* **574**, 72 (2019).

[***] "A proposal for reconciling diverse experiments on the superconducting state in Sr_2RuO_4 ", S. A. Kivelson, A. C. Yuan, B. J. Ramshaw, R. Thomale, arXiv: 2002.00016 (Feb. 2020).

● H29(2017) 年度 2 月以降の計画研究 A01 発表論文

[a] "Low-energy electron-mode couplings in the surface bands of Sr_2RuO_4 revealed by laser-based angle-resolved photoemission spectroscopy", S. Akebi, T. Kondo, M. Nakayama, K. Kuroda, S. Kunisada, H. Taniguchi, Y. Maeno, S. Shin, *Phys. Rev. B* **99**, 081108(R)-1-6 (Feb. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.99.081108

[b] "Nano-Resolved Current-Induced Insulator-Metal Transition in the Mott Insulator Ca_2RuO_4 ", J. Zhang, A. S. McLeod, Q. Han, X. Chen, H. A. Bechtel, Z. Yao, S. N. G. Corder, T. Ciavatti, T. H. Tao, M. Aronson, G. L. Carr, M. C. Martin, C. Sow, S. Yonezawa, F. Nakamura, I. Terasaki, D. N. Basov, A. J. Millis, Y. Maeno, M. Liu, *Physical Review X* **9**, 011032-1-8 (Feb. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevX.9.011032

[c] "Quantum Vortex Core and Missing Pseudogap in the Multiband BCS-BEC Crossover Superconductor FeSe", T. Hanaguri, S. Kasahara, J. Böker, I. Eremin, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Physical Review Letters* **122**, 077001-1-5 (Feb. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.077001

[d] "Electrical resistivity across a nematic quantum critical point", S. Licciardello, J. Buhot, J. Lu, J. Ayres, S. Kasahara, Y. Matsuda, T. Shibauchi, N. E. Hussey, *Nature* **567**, 213-217 (Feb. 2019). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0923-y>

[e] "Spectrum of Itinerant Fractional Excitations in

Quantum Spin Ice", M. Udagawa, R. Moessner, *Physical Review Letters* **122**, 117201-1-6 (Mar. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.117201

[f] "Concept and realization of Kitaev quantum spin liquids", H. Takagi, T. Takayama, G. Jackeli, G. Khaliullin, S. E. Nagler, *Nature Rev. Phys.* **1**, 264-280 (Mar. 2019).

● H30(2018) 年度の研究項目 A01 発表論文 (発表順)

[1] "Ultrafast nematic-orbital excitation in FeSe", T. Shimojima, Y. Suzuki, A. Nakamura, N. Mitsuishi, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Y. Ishida, S. Shin, K. Ishizaka, *Nature Communications* **10**, 1946-1-6 (Apr. 2019). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09869-5>

[2] "Impact of off-diagonal exchange interactions on the Kitaev spin-liquid state of $\alpha\text{-RuCl}_3$ ", D. Takikawa, S. Fujimoto, *Physical Review B* **99**, 224409-1-8 (Jun. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.99.224409

[3] "Effects of phase coherence on local density of states in superconducting proximity structures", S.-I. Suzuki, A. A. Golubov, Y. Asano, Y. Tanaka, *Physical Review B* **100**, 024511-1-11 (Jul. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.100.024511

[4] "Tuning the Distance to a Possible Ferromagnetic Quantum Critical Point in $\text{A}_2\text{Cr}_3\text{As}_3$ ", J. Luo, J. Yang, R. Zhou, Q. G. Mu, T. Liu, Zhi-an Ren, C. J. Yi, Y. G. Shi, G.-q. Zheng, *Physical Review Letters* **123**, 047001-1-9 (Jul. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.047001

[5] "Observation of superconducting gap spectra of long-range proximity effect in $\text{Au/SrTiO}_3/\text{SrRuO}_3/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ tunnel junctions", M. S. Anwar, M. Kunieda, R. Ishiguro, S. R. Lee, L. A. B. Olde Olthof, J. W. A. Robinson, S. Yonezawa, T. W. Noh, Y. Maeno, *Physical Review B* **100**, 024516-1-6 (Jul. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.100.024516

[6] "Ordering of hidden multipoles in spin-orbit entangled $5d^1$ Ta chlorides", H. Ishikawa, T. Takayama, R. K. Kremer, J. Nuss, R. Dinnebier, K. Kitagawa, K. Ishii, and H. Takagi, *Phys. Rev. B* **100**, 045142 (Jul. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.100.045142

[7] "Coupling between heavy fermion superconductor CeCoIn_5 and antiferromagnetic metal CeIn_3 through the atomic interface", M. Naritsuka, S. Nakamura, Y. Kasahara, T. Terashima, R. Peters, Y. Matsuda, *Physical Review B* **100**, 024507-1-9 (Jul. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.100.024507

[8] "Unconventional thermal metallic state of charge-neutral fermions in an insulator", 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, **Y. Matsuda**, *Nature Physics* **15**, 954-959 (Jul. 2019). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0552-2>
- [9] "Diagonal nematicity in the pseudogap phase of $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ ", H. Murayama, Y. Sato, R. Kurihara, S. Kasahara, Y. Mizukami, **Y. Kasahara**, H. Uchiyama, A. Yamamoto, E.-G. Moon, J. Cai, J. Freyermuth, M. Greven, T. Shibauchi, **Y. Matsuda**, *Nature Communications* **10**, 3282-1-7 (Jul. 2019). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11200-1>
- [10] "Time-reversal invariant superconductivity of Sr_2RuO_4 revealed by Josephson effects", **S. Kashiwaya**, K. Saitoh, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, **M. Sato**, K. Yada, **Y. Tanaka**, **Y. Maeno**, *Physical Review B* **100**, 094530-1-9 (Sep. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevB.100.094530](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.094530)
- [11] "Proximity effect in a ferromagnetic semiconductor with spin-orbit interactions", T. Yamashita, J. Lee, **T. Habe**, **Y. Asano**, *Physical Review B* **100**, 094501-1-11 (Sep. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevB.100.094501](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.094501)
- [12] "Coexistence of orbital and quantum critical magnetoresistance in $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ ", S. Licciardello, N. Maksimovic, J. Ayres, J. Buhot, M. Ćulo, B. Bryant, S. Kasahara, **Y. Matsuda**, T. Shibauchi, V. Nagarajan, J. G. Analytis, N. E. Hussey, *Physical Review Research* **1**, 023011-1-10 (Sep. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevResearch.1.023011](https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.1.023011)
- [13] "Pseudospin triplet superconductivity in 2H-type transition-metal dichalcogenide monolayers", **T. Habe**, *Physical Review B* **100**, 165431-1-9 (Oct. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevB.100.165431](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.165431)
- [14] "Anomalous Nonlocal Conductance as a Fingerprint of Chiral Majorana Edge States", S. Ikegaya, **Y. Asano**, D. Manske, *Physical Review Letters* **123**, 207002-1-6 (Nov. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevLett.123.207002](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.207002)
- [15] "Anomalous anisotropic behaviour of spin-triplet proximity effect in $\text{Au}/\text{SrRuO}_3/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ junctions", **M. S. Anwar**, M. Kunieda, R. Ishiguro, S. R. Lee, C. Sow, J. W. A. Robinson, **S. Yonezawa**, T. W. Noh, **Y. Maeno**, *Scientific Reports* **9**, 15827-1-8 (Nov. 2019). DOI: [10.1038/s41598-019-52003-0](https://doi.org/10.1038/s41598-019-52003-0)
- [16] "Negative ionic states of tin in the oxide superconductor $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ revealed by Mössbauer spectroscopy", A. Ikeda, S. Koibuchi, S. Kitao, M. Oudah, **S. Yonezawa**, M. Seto, **Y. Maeno**, *Physical Review B* **100**, 245145-1-9 (Dec. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevB.100.245145](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.245145)
- [17] "Dynamical conductivity in the multiply degenerate point-nodal semimetal CoSi ", **T. Habe**, *Physical Review B* **100**, 245131 (Dec. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevB.100.245131](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.245131)
- [18] "Chiral Higgs Mode in Nematic Superconductors", H. Uematsu, **T. Mizushima**, A. Tsuruta, **S. Fujimoto**, J. A. Sauls, *Physical Review Letters* **123**, 237001 (Dec. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevLett.123.237001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.237001)
- [19] "Disorder-induced exceptional and hybrid point rings in Weyl/Dirac semimetals", T. Matsushita, **Y. Nagai**, **S. Fujimoto**, *Physical Review B* **100**, 245205-1-9 (Dec. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevB.100.245205](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.245205)
- [20] "Measuring Magnetic Field Texture in Correlated Electron Systems under Extreme Conditions", Y. Yip, K. O. Ho, K. Y. Yu, Y. Chen, W. Zhang, S. Kasahara, Y. Mizukami, T. Shibauchi, **Y. Matsuda**, S. K. Goh, S. Yang, *Science* **366**, 1355-1359 (Dec. 2019). DOI: [10.1126/science.aaw4278](https://doi.org/10.1126/science.aaw4278)
- [21] "Reduction of the ^{17}O Knight shift in the Superconducting State and the Heat-up Effect by NMR Pulses on Sr_2RuO_4 ", K. Ishida, M. Manago, K. Kinjo, and **Y. Maeno**. arXiv:1907.12236 (July, 2019), to be published in *J. Phys. Soc. Jpn.* (2020).
- [22] "Uniaxial-strain Control of Nematic Superconductivity in $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ", I. Kostylev, **S. Yonezawa**, Z. Wang, Y. Ando, **Y. Maeno**, arXiv:1910.03252 (Oct. 2019).
- [23] "Split superconducting and time-reversal symmetry-breaking transitions, and magnetic order in Sr_2RuO_4 under uniaxial stress", V. Grinenko, S. Ghosh, R. Sarkar, J.-C. Orain, A. Nikitin, M. Elender, D. Das, Z. Guguchia, F. Brückner, M. E. Barber, J. Park, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, J. S. Bobowski, T. Miyoshi, **Y. Maeno**, A. P. Mackenzie, H. Luetkens, C. W. Hicks, H. Klauss, arXiv:2001.08152 (Jan. 2020).
- [24] "Half-integer quantized anomalous thermal Hall effect in the Kitaev material $\alpha\text{-RuCl}_3$ ", T. Yokoi, S. Ma, Y. Kasahara, **S. Kasahara**, T. Shibauchi, N. Kurita, H. Tanaka, **J. Nasu**, Y. Motome, C. Hickey, S. Trebst, **Y. Matsuda**, arXiv:2001.01899 (Jan. 2020).
- [25] "Reduction of the spin susceptibility in the superconducting state of Sr_2RuO_4 observed by polarized neutron scattering", A.N. Petsch, M. Zhu, M. Enderle, Z. Q. Mao, **Y. Maeno**, and S.M. Hayden, arXiv:2002.02856 (Feb. 2020).