

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いきます。

研究テーマは、対象物質の性質によって、主にトポロジカル超伝導体、トポロジカル半金属、トポロジカル磁性体（絶縁体）の3つに分類できます（図1）。以下では、今年度の主な成果をテーマごとに紹介します。なお、文末の引用文献リストで、[a]はH28(2016)年度2月以降、[1]-[34]はH29(2017)年度の研究項目A01の発表論文を発表順に並べたものです。

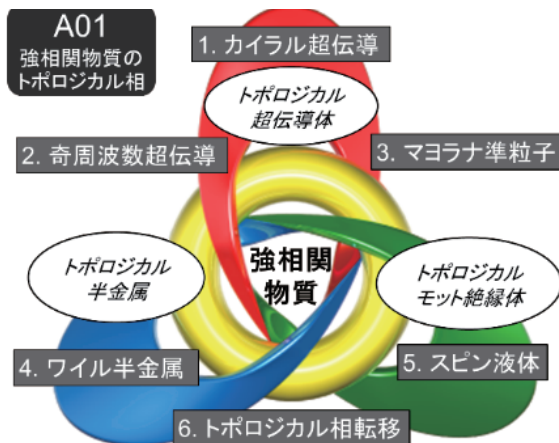


図1: 計画研究 A01 で扱う主な物質と物性。

【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が挙がってきました。

(1-1) ルテニウム酸化物のスピントリプル超伝導

トポロジカルな超伝導である時間反転対称性を破る

スピントリプル超伝導体として有力な Sr_2RuO_4 についての研究をさらに進めました。非弾性中性子回折から、反強磁性的揺らぎによる超伝導に特徴的な共鳴現象が生じていないことが明らかになり、スピントリプル超伝導を支持する結果となりました [1]。

Anwar(A01 元 PD)・米澤 (A01)・前野 (A01) らは、共晶析出した Ru 金属片に近接効果で誘起した s 波超伝導と Sr_2RuO_4 の超伝導との競合を調べ、 Sr_2RuO_4 固有の 1.5-K 超伝導相では顕著に雑音の大きな接合特性が観測され、多成分秩序変数が示唆される一方で、1.5 K 以上のいわゆる 3-K 超伝導相は s 波超伝導との競合効果を示さないことを明らかにしました [5]。この結果は、一軸圧力効果で T_c の上昇した超伝導相に対する昨年度の成果と符合するものです。 Sr_2RuO_4 の超伝導に対するこれら最近の情報をレビューする論文も発表しました [8]。

(1-2) 接合系でのスピントリプル超伝導現象

浅野 (A01) は田仲 (B01)・柏谷 (B01) らと、 Sr_2RuO_4 と s 波超伝導体とのジョセフソン接合を用いて、時間反転対称性の破れの有無を正確に判定する方法を提案しました [3]。

高嶋・横山 (D02 公募)・藤本 (A01) は、図2のようなスピントリプル超伝導体-磁性体接合系において、スピントリプルクーパ対に特有の新しいスピントルクの存在を理論的に解明しました [14]。正常電流と異なり、スピントリプル超伝導電流によるスピントルクでは、駆動に必要な閾値電流が 0 で、かつ、振動的挙動が抑制されるため、従来のメカニズムより効率的に磁壁を駆動できることを示しました。

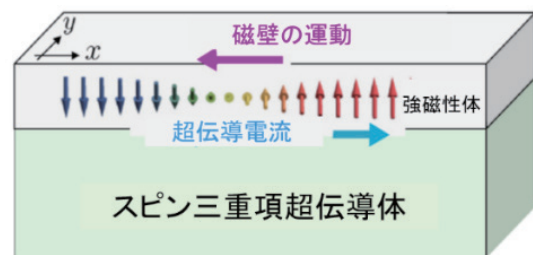


図2: 強磁性体へのスピントリプル超伝導近接効果を利用した磁壁駆動の概念図。

(1-3) 微細構造や薄膜でのトポロジカル超伝導

安井・Anwar・寺嶋 (A01)・米澤・前野らは、ライデン大学との共同研究で、 Sr_2RuO_4 のマイクロリングの磁気抵抗の量子振動から、単結晶では初めて Little-Parks 振動を観測しました (図 3)[23]。さらに、リング面に平行な磁場の追加で、半整数フラクソイド状態を示唆する量子振動モードの分裂も観測しました [23]。

前野・柏谷 (B01) らの共同研究では、析出した Ru 金属片 1 個を取り巻く Sr_2RuO_4 微小結晶で、Ru 金属の超伝導転移 (0.5 K) 温度以下での、超伝導競合効果を明らかにしました [16]。この他、打田 (A01 公募) らは、MBE 法 Sr_2RuO_4 薄膜で超伝導を実現しました [17]。

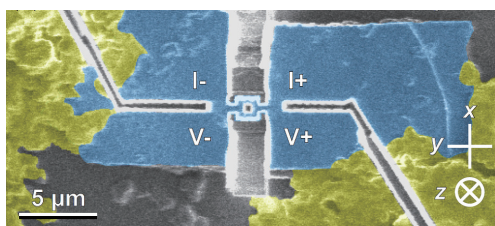


図 3: Sr_2RuO_4 のマイクロリング。リトル・パークス振動に加え、半整数フラクソイド状態を示唆する量子振動分裂も観測されました [23]。

浅野らは時間反転対称性を破るトポロジカル超伝導状態のエッジモードに伴うカイラル電流に対する、マイスナー遮蔽効果と表面ラフネスの効果を理論的に調べました。その結果、カイラル p 波超伝導のエッジ電流は、表面ラフネスにあまり影響されず、それが作る磁化も十分観測可能な大きな振幅を持つことを明らかにしました [10]。浅野らはまた、量子異常ホール絶縁体を利用したジョセフソン接合で、接合位相差を制御する方法を理論的に提案しました [28]。

(1-4) ラインノードをもつトポロジカル超伝導

銅酸化物高温超伝導体などこれまでよく知られた準 2 次元ラインノード超伝導体に対しては、1 次元巻付き数が定義でき、広い意味でトポロジカル超伝導体としての分類が可能です [*]。特定方向の接合でみられるゼロバイアスコンダクタンスピークは、トポロジカルエッジ状態によるものです。浅野らはラインノード超伝導エッジ状態が表面散乱のもとでも維持されることを理論的に示しました [4]。また、このクラスの超伝導に関連して、笠原 (A01)・松田 (A01) らは、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の常伝導相の擬ギャップ状態において電子ネマティック状態への相転移が起きていることを明らかにしました [9]。最初に発見された重い電子系超伝導体である CeCu_2Si_2 に関して、笠原・松田らは、比熱とイオン照射効果から、こ

れまでの定説と異なり、格子欠陥に強いフルギャップの超伝導が生じていることを明らかにしました [7, 11]。

(1-5) アンチペロブスカイト酸化物の超伝導

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持つトポロジカル結晶絶縁体の候補です。昨年度、オーダ・池田・前野・米澤・佐藤昌 (D01) らはキャリアドープした $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ でアンチペロブスカイト酸化物では初めての超伝導を発見し、トポロジカル超伝導の出現可能性を指摘しました。今年度は、試料合成法の改良により超伝導転移温度と Sr 欠損量との関係を明らかにしました (論文投稿中)。また、Sr 欠損の秩序化による長周期構造とドーピングによる電子状態の変化を調べるためのバンド計算を行いました。実際の試料による高分解能 X 線回折では、長周期構造は観測できませんでした [24]。

(1-6) ネマティック状態と超伝導

松田・笠原らは、鉄セレン超伝導体の硫黄置換効果を調べ、常伝導相から出現する電子ネマティック状態が硫黄置換と共に消失するネマティック量子臨界点近傍で超伝導ギャップ構造が大きく変化することを明らかにしました [18, 19, 33]。

(1-7) その他のトポロジカル超伝導

寺嶋・松田・笠原らは、世界に類を見ない薄膜作製技術で重い電子系の人工超格子によるトポロジカル量子相の研究を展開しています。空間反転対称性の破れた 2 次元超伝導体では様々なトポロジカル超伝導状態が期待されています。そこで、グローバルな空間反転対称性の破れた “ABCABC...” のトリコロール積層での超伝導状態を調べたところ、上部臨界磁場が低温で上昇する特異な振舞を観測しました (図 4)。これから、理論的にも予言されていた新奇高磁場超伝導相の可能性が示唆されます [22]。

トポロジカル物質の母体から生じる超伝導がトポロジカル超伝導性を持つことは、保証されているわけではありません。俣野 (A01)・鄭 (A01)、安藤 (B01) らは、トポロジカル結晶絶縁体 SnTe に In でキャリアドープした超伝導体の核磁気共鳴 (NMR) から、その超伝導はスピナー重項で、またギャップにノードがないことも明らかにしました [13]。

藤本らは、ワイル超伝導における格子歪み由来の擬似的磁場によるワイル準粒子のランダウ量子化とそれ

TOPICS

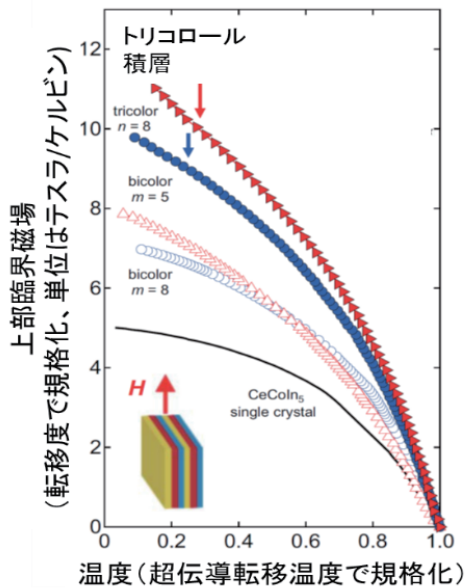


図4: 重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 を2種類の類縁常伝導体で挟んだトリコロール積層薄膜での上部臨界磁場 [22]。矢印は異常を示す。

による熱伝導率の量子振動を議論しました [29]。従来、超伝導体では反磁性電流がランダウ準位を壊します。これに対して格子歪みによる擬似的な磁場はマイスナー効果を誘起しないため、ランダウ量子化が起こり得ます。これをモデル計算で実証しました。なお、本研究は M. Franz 氏 (UBC) の学生である Tianyu Liu 氏が Topo-Q の JREP プログラムにて、阪大基礎工に滞在中に開始した共同研究の成果です。

[2. トポロジカル半金属等]

(2-1) ディラック半金属

強相関電子系を制御して新たなトポロジカル状態を創り出す一般的な方法を開発できれば、トポロジカル物質科学にとって強力なアプローチとなります。Sow(A01-PD)・米澤・前野らは、エネルギーギャップの小さなモット絶縁体に定常電流を強制的に流すと、導電性が増して半金属状態になり、常伝導体では最大の巨大反磁性を示すことを発見しました [20]。これは非平衡定常状態 (Non-Equilibrium Steady State: NESS) での強相関電子系に特有の現象と考えられます。理論的には二つの軌道に基づく上部ハバードバンドと下部ハバードバンドがそれぞれホール・電子ポケットとなる「モット半金属」のモデルで説明できます。軌道反磁性をにやうのは、ディラック電子に類似の有効質量の軽い準粒子です。この方法は、今後のトポロジカル物質開発の新指針になると期待できます。

打田・永長 (B01) らは、ディラック半金属 Cd_3As_2 の高品質の薄膜化に成功し、量子ホール効果を観測しました [26]。

(2-2) ワイル半金属

スピンの方向が一定ではないノンコリニアな反強磁性体である Mn_3Sn は、スピнкаイラリティによって、室温でも巨大な異常ホール効果を示します。近藤 (A01 公募) らはこの物質に対し、磁気ワイル半金属の特徴で仮想磁場の源と見なせるワイル点を角度分解光電子分光 (ARPES) 等で明らかにし、また、カイラル異常に伴う負の磁気抵抗も観測しました [15]。

[3. トポロジカル磁性体]

(3-1) パイロクロア格子酸化物等

打田・塚崎 (B01) らは、パイロクロア酸化物 $\text{Tb}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の薄膜で磁気ドメイン構造を可視化し [27]、磁気ワイル半金属の性質をもつとされるドメイン壁の外部磁場制御機構を明らかにしました [32]。また、宇田川 (A01) らはカゴメ格子上 $J_1J_2J_3$ 模型の解析を通じて、トポロジカル磁性体特有の分数励起の間に働く相互作用の効果を考察し、新しい古典スピン液体状態の形成を見出すと共に、 ZnFe_2O_4 などのスピネル化合物で観測されるクラスター型磁気励起の起源を議論しました [12]。

(3-2) キタエフ・ハニカム格子でのスピン液体

マヨラナ・フェルミオンが実現しうる系として、キタエフ量子スピン液体の実現に向けた研究が盛んになっています。強いスピン軌道相互作用に起因する有効磁気モーメント $J_{\text{eff}}=1/2$ のイオンが、ハニカム (ハチの巣) 格子上にある場合、キタエフ・ハイゼンベルグ模型に必要な異方的相互作用 (キタエフ型相互作用) が主要になると考えられています。理論の美しさと、現実物質で実現できる可能性のため、非常に魅力的なテーマです。 $(\text{Li,Na})_2\text{IrO}_3$ や $\alpha\text{-RuCl}_3$ などが有力な候補物質ですが、いずれも低温で磁気秩序化してしまいます。

北川・高木 (A01) らは、イリジウム酸化物で低温まで磁気転移しない物質 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ を開発して、スピン液体性の研究を進展させています。また、笠原・松田らは、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ の単結晶を用いて、磁場中での熱ホール効果の研究からの実証を進めています [34]。次号では、これらの研究成果を詳しくお伝えできる予定です。ご期待ください。

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、トポロジカル超流動など相補的テーマを含む公募研究 A01 (4 件)・D02 (4 件) との連携、他の研究項目との間での共同研究も本格的に軌道に乗せて進めています。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の発信を目指しています。

- [*] "Topology of Andreev bound states with flat dispersion",
M. Sato, Y. Takana, K. Yada, T. Yokoyama,
Physical Review B **83**, 224511 (Jun. 2011).
- H28(2016) 年度 2 月以降の計画研究 A01 発表論文
- [a] "Zero-gap semiconductor to excitonic insulator transition in Ta_2NiSe_5 ",
Y.F. Lu, H. Kono, T.I. Larkin, A.W. Rost, T. Takayama, A.V. Boris, B. Keimer, H. Takagi,
Nature Communications **8**, 14408-1-7 (Feb. 2017).
- H29(2017) 年度の計画研究 A01 発表論文 (発表順)
- [1] "Absence of a Large Superconductivity-Induced Gap in Magnetic Fluctuations of Sr_2RuO_4 ", S. Kunkemöller,
Y. Maeno, M. Braden *et al.*,
Physical Review Letters **118**, 147002-1-5 (Apr. 2017).
- [2] "Quasiparticle interference and strong electron-mode coupling in the quasi-one-dimensional bands of Sr_2RuO_4 ",
Z. Wang, Y. Maeno, V. Madhavan *et al.*,
Nature Physics **13**, 799–805 (May 2017).
- [3] "Josephson effect in a multiorbital model for Sr_2RuO_4 "
K. Kawai, K.Yada, Y. Tanaka, Y. Asano, A.A. Golubov, S. Kashiwaya *et al.*,
Physical Review B **95**, 174518-1-11 (May 2017); with publisher's note: Phys. Rev. B **95**, 219902(E) (Jun. 2017).
- [4] "Stability of flat zero-energy states at the dirty surface of a nodal superconductor",
S. Ikegaya, Y. Asano,
Physical Review B **95**, 214503-1-11 (Jun. 2017).
- [5] "Multicomponent order parameter superconductivity of Sr_2RuO_4 revealed by topological junctions",
M.S. Anwar, R. Ishiguro, S. Yonezawa, Y. Maeno *et al.*,
Physical Review B **95**, 224509-1-9 (Jun. 2017).
- [6] "Flat bands and Dirac cones in breathing lattices"
K. Essafi, L.D.C. Jaubert, M. Udagawa,
J. Phys: Condens. Mat. **29**, 315802-1-8 (Jun. 2017).
- [7] "Fully gapped superconductivity with no sign change in the prototypical heavy-fermion $CeCu_2Si_2$ ",
T. Yamashita, Y. Kasahara, S. Kittaka, T. Sakakibara, C. Geibel, H. Ikeda, T. Shibauchi, Y. Matsuda *et al.*,
Science Advances **3**, e1601667-1-8 (Jun. 2017).
- [8] "Even odder after twenty-three years: the superconducting order parameter puzzle of Sr_2RuO_4 ",
A.P. Mackenzie, T. Scaffidi, C.W. Hicks, Y. Maeno,
npj Quantum Materials **2**, 40-1-9 (Jul. 2017).
- [9] "Thermodynamic evidence for a nematic phase transition at the onset of the pseudogap in $YBa_2Cu_3O_y$ "
Y. Sato, S. Kasahara, Y. Kasahara, B. Keimer, T. Shibauchi, Y. Matsuda *et al.*,
Nature Physics **13**, 1074–1078 (Jul. 2017).
- [10] "Weakening of the diamagnetic shielding in $FeSe_{1-x}S_x$ at high pressures",
K.Y. Yip, S. Kasahara, Y. Matsuda, T. Shibauchi, S. K. Goh *et al.*,
Physical Review B **96**, 020502(R)-1-5 (Jul. 2017).
- [11] "Full-Gap Superconductivity Robust against Disorder in Heavy-Fermion $CeCu_2Si_2$ ",
T. Takenaka, Y. Mizukami, C. Geibel, Y. Kasahara, C. Putzke, Y. Matsuda, A. Carrington, T. Shibauchi *et al.*,
Physical Review Letters **119**, 077001-1-5 (Aug. 2017).
- [12] "Clustering of Topological Charges in a Kagome Classical Spin Liquid",
T. Mizoguchi, L.D.C. Jaubert, M. Udagawa,
Physical Review Letters **119**, 077207-1-6 (Aug. 2017).
- [13] "Spin-singlet superconductivity in the doped topological crystalline insulator $Sn_{0.96}In_{0.04}Te$ ",
S. Maeda, K. Matano, Y. Ando, G-Q. Zheng *et al.*,
Physical Review B **96**, 104502-1-5 (Sep. 2017).
- [14] "Adiabatic and nonadiabatic spin torques induced by a spin-triplet supercurrent",
R. Takashima, S. Fujimoto, T. Yokoyama,
Physical Review B **96**, 121203(R)-1-5 (Sep. 2017).
- [15] "Evidence for magnetic Weyl fermions in a correlated metal",
K. Kuroda, S. Shin, T. Kondo, S. Nakatsuji *et al.*,
Nature Materials **16**, 1090–1095 (Sep. 2017).
- [16] "Investigation of the Vortex States of Sr_2RuO_4 -Ru Eutectic Microplates Using DC-SQUIDS",
D. Sakuma, Y. Nago, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, Y. Maeno, H. Takayanagi,
J. Phys. Soc. Japan **86**, 114708-1-6 (Oct. 2017).

TOPICS

- [17] "Molecular beam epitaxy growth of superconducting Sr_2RuO_4 films",
M. Uchida, Y. Tokura, M. Kawasaki *et al.*,
APL Materials **5**, 106108-1-6 (Oct. 2017).
- [18] "Abrupt change of the superconducting gap structure at the nematic critical point in $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ "
Y. Sato, S. Kasahara, Y. Kasahara, H. Kontani, T. Shibauchi, Y. Matsuda *et al.*,
Proc. Nat. Acad. Sci.(USA) **2018**, 1717331115-1-5 (Oct. 2017).
- [19] "Maximizing T_c by tuning nematicity and magnetism in $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ superconductors"
K. Matsuura, Z. Hiroi, S. Kasahara, S. K. Goh, Y. Matsuda, Y. Uwatoko, T. Shibauchi *et al.*,
Nature Communications **8**, 1143-1-6 (Oct. 2017).
- [20] "Current-induced strong diamagnetism in the Mott insulator Ca_2RuO_4 ",
C. Sow, S. Yonezawa, S. Kitamura, T. Oka, K. Kuroki, F. Nakamura, Y. Maeno,
Science **358**, 1084-1087 (Nov. 2017).
- [21] "Anisotropy and multiband superconductivity in Sr_2RuO_4 determined by small-angle neutron scattering studies of the vortex lattice",
S.J. Kuhn, Y. Maeno, M. R. Eskildsen *et al.*,
Physical Review B **96**, 174507-1-13 (Nov. 2017).
- [22] "Emergent exotic superconductivity in artificially engineered tricolor Kondo superlattices"
M. Naritsuka, M. Shimozawa, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Y. Kasahara *et al.*,
Physical Review B **96**, 174512-1-10 (Nov. 2017).
- [23] "Little-Parks oscillations with half-quantum fluxoid features in Sr_2RuO_4 microrings",
Y. Yasui, K. Lahabi, M.S. Anwar, S. Yonezawa, T. Terashima, J. Aarts, Y. Maeno *et al.*,
Physical Review B **96**, 180507(R)-1-6 (Nov. 2017),
- [24] "Theoretical band structure of the superconducting antiperovskite oxide $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ ",
A. Ikeda, T. Fukumoto, M. Oudah, J. N. Hausmann, S. Yonezawa, S. Kobayashi, M. Sato, H. Takatsu, H. Kageyama, Y. Maeno *et al.*,
Physica B: Condensed Matter **XX**, 1-5 (Nov. 2017).
- [25] "Observation of Bogoliubov Band Hybridization in the Optimally Doped Trilayer $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ ",
S. Kunisada, T. Sasagawa, S. Shin, T. Kondo *et al.*,
Physical Review Letters **119**, 217001-1-5 (Nov. 2017).
- [26] "Quantum Hall states observed in thin films of Dirac semimetal Cd_3As_2 ",
M. Uchida, Y. Taguchi, N. Nagaosa, Y. Tokura, M. Kawasaki *et al.*,
Nature Communications **8**, 2274-1-7 (Dec. 2017).
- [27] "Visualizing ferroic domains in an all-in-all-out antiferromagnet thin film",
Y. Kozuka, M. Uchida, T. Nojima, A. Tsukazaki, J. Matsuno, T. Arima, M. Kawasaki *et al.*,
Physical Review B **96**, 224417-1-5 (Dec. 2017).
- [28] "Tunable- ϕ Josephson junction with a quantum anomalous Hall insulator",
K. Sakurai, S. Ikegaya, Y. Asano,
Physical Review B **96**, 224514-1-9 (Dec. 2017).
- [29] "Quantum oscillations and Dirac-Landau levels in Weyl superconductors"
T. Liu, M. Franz, S. Fujimoto,
Physical Review B **96**, 224518-1-14 (Dec. 2017).
- [30] "Visualizing the evolution of surface localization in the topological state of Bi_2Se_3 by circular dichroism in laser-based angle-resolved photoemission spectroscopy"
T. Kondo, Y. Taguchi, Y. Tokura, S. Shin *et al.*,
Physical Review B **96**, 241413(R)-1-5 (Dec. 2017).
- [31] "Crossover from impurity-controlled to granular superconductivity in $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ ",
S. Yonezawa, K. Bechgaard, D. Jérôme *et al.*,
Physical Review B **97**, 014521-1-12 (Jan. 2018).
- [32] "All-in-all-out magnetic domain inversion in $\text{Tb}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ with molecular fields antiparallel to external fields"
T.C. Fujita, M. Uchida, A. Tsukazaki, M. Kawasaki *et al.*,
Physical Rev. Materials **2**, 011402(R)-1-5 (Jan. 2018).
- [33] "Superconducting gap anisotropy sensitive to nematic domains in FeSe "
T. Hashimoto, S. Kasahara, Y. Matsuda, T. Shibauchi, S. Shin *et al.*,
Nature Communications **9**, 282-1-7 (Jan. 2018).
- [34] "Unusual thermal Hall effect in a Kitaev spin liquid candidate $\alpha\text{-RuCl}_3$ ",
Y. Kasahara, H. Tanaka, J. Nasu, Y. Matsuda *et al.*,
arXiv:1709.10286 (Sep. 2017).