

3次元カイラル d 波超伝導体の表面効果の理論

名古屋大学大学院工学研究科応用物理学専攻

奥村俊介

1994年に前野悦輝氏らにより Sr_2RuO_4 に関する興味深い発見がなされた。 Sr_2RuO_4 は転移温度が 1.5K であり、ペロブスカイト型構造を持った非従来型の超伝導体として知られている。NMR の実験結果から、 Sr_2RuO_4 はスピン三重項 p 波の超伝導体であると提唱された[1]。しかし、2020年に同氏らが再び行った NMR の実験結果から対称性についての再検討が必要であることがわかり、 Sr_2RuO_4 は単純なスピン三重項では理解できないのではないかと考えられるようになった[2]。この結果を受けて、新たなモデル理論の一つとして、3軌道の効果を取り入れた新しいペアが Agterberg らによって提案された[3]。このモデルでは軌道間でペアが形成され、また軌道について反対称になるという新奇な超伝導状態であるが、エネルギーの低いところに注目すると、3次元カイラル d 波のように見なせることが知られている。3次元カイラル d 波に関する計算によると、(001) 方向からトンネル効果の実験を行うと鋭いゼロバイアスコンダクタンスピークがみられることが予測される[4]。しかし、実験でそのようなピークはみられなかった。また、Agterberg のモデルの計算結果も実験の結果とは一致しなかった[5]。そこで、銅酸化物表面で d+is 波や d+ip 波が議論されたように、3次元カイラル d 波超伝導体の表面に s 波のペアが誘起されているという可能性を考えた。私は本研究で三次元 d 波超伝導体に s 波のペアが誘起されたときのコンダクタンスを計算し、その結果として表面の状態密度にゼロエネルギーピークが残るかどうかを明確にする。

[1]Y.Maeno, et al. Nat. Phys., Vol. 396, 658-660, 1998.

[2]K.Ishida, et al. JPSJ., Vol. 89, 034712, 2020.

[3]Daniel F. Agterberg. Nat. Phys., Vol. 17, 169-170, 2021.

[4]S. Kobayashi, et al. Phys. Rev. B, Vol. 92, 214514. 2015

[5]S.Ando, et al. Phys. Rev. B, Vol. 106, 214520. 2022.

Sr₂RuO₄における軌道間超伝導状態の表面状態

名大工

安藤観史、池谷聡、田村駿、田仲由喜夫、矢田圭司

Sr₂RuO₄のクーパー対対称性は p_x+ip_y 波と長らく信じられていたが、2019年のNMR実験[1]により、 p_x+ip_y 波超伝導状態の振る舞いと矛盾することがわかった。そこで新たに、異なる軌道間でクーパー対を組み E_g 既約表現に属する inter-orbital odd/spin-triplet/even-parity の対称性を持つペアポテンシャルが Sr₂RuO₄ における超伝導秩序変数として提案されている[2]。

表面アンドレーエフ束縛状態の特性を理解することは、トンネル分光などの実験結果を予測するのに重要である。そのため本研究では、提案された inter-orbital 超伝導状態の(001)表面におけるエネルギースペクトルの計算を、リカーシブグリーン関数法を用いておこなった。そして、提案された inter-orbital 超伝導体の(001)表面状態は同じ E_g 既約表現に属する $d_{xz}+id_{yz}$ 波超伝導状態[3]と類似し、LDOSはゼロエネルギー近傍にピーク構造を持つことを確かめた[4]。

一方で、このゼロエネルギー近傍のピークは厳密にはゼロエネルギー状態には存在しない。したがって、軌道基底で記述される軌道間ペアポテンシャルをバンド基底に摂動論を用いてユニタリー変換し、ゼロエネルギー近傍に現れる表面状態とその分裂の起源を明らかにした[4]。

[1] A. Pustogow et al., Nature **574**, 72 (2019).

[2] H. G. Suh et al., Phys. Rev. Research **2**, 032023 (2020).

[3] S. Kobayashi et al., Phys. Rev. B **92**, 214514 (2015).

[4] S. Ando et al., Phys. Rev. B **106**, 214520 (2022).

層状 LiVSe_2 におけるバナジウムジグザグ鎖秩序の発達名大院工^A, 慶応大理工^B, 千葉大院理^C小島慶太^A, 片山尚幸^A, 杉本高大^B, 太田幸則^C, 澤博^A

遷移金属化合物における電子的不安定性は、遷移金属原子同士の分子形成現象、量体化を引き起こすことがしばしばある[1]。こうした系では高温になるとレギュラーな格子へと回復し、量体化分子は消失すると考えられてきた。しかし、二体相関分布関数(PDF)を用いた最近の局所構造研究により、局所的には量体化が生じていることが複数の系で明らかになっている[2]。こうした量体化の短距離秩序状態は層状 LiVS_2 においても現れる。 LiVS_2 は 314K で金属-絶縁体転移を示し[3]、低温相ではバナジウムが正三角形の分子、三量体を形成する[4]。高温相ではバナジウムは三角格子を形成すると考えられていたが、PDF 解析による局所構造研究の結果、高温相ではバナジウムがジグザグ鎖分子を形成していることが明らかになった。さらに、面内の STEM 測定を実施したところ、ジグザグ鎖ドメインが秒程度のオーダーで時間・空間的に揺らいでいることが明らかになった[5]。

こうした中、我々は LiVS_2 に現れるジグザグ鎖状態と三量体秩序との関係性について調査するため、S を Se に置換した LiVSe_2 について構造研究を実施した。S-Se 置換により系の遍歴性が高まり、 LiVSe_2 は三量体転移を示さず全温度域で金属である[3]。構造研究の結果、 LiVSe_2 ではジグザグ鎖構造が平均構造として現れていることが明らかになった。このジグザグ鎖秩序は低温および圧力下でより発達し、このことは、 LiVX_2 ($X=\text{O}, \text{S}, \text{Se}$) 系の金属相でジグザグ鎖が広く表れていることを示し、ジグザグ鎖状態が単なる三量体の前駆現象ではないことを示している。

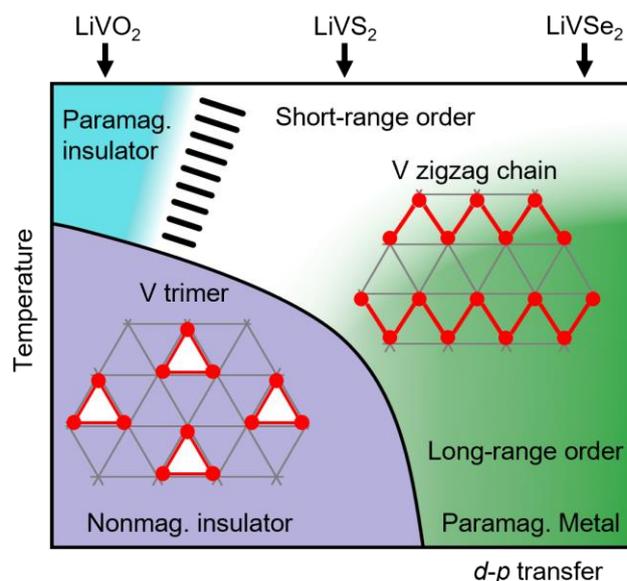


図 1 LiVX_2 ($X=\text{O}, \text{S}, \text{Se}$) における電子相図。先行研究[3]における相図にジグザグ鎖秩序の発達について追記した。

[1] D. I. Khomskii and S. V. Streltsov, Chem. Rev. **121**, 2992 (2021).

[2] E.S. Bozin *et al.*, Nat. Commun. **10**, 3638 (2019). 他

[3] N. Katayama *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 146405 (2009).

[4] K. Kojima *et al.*, Phys. Rev. B **100**, 235120 (2019).

[5] N. Katayama, K. Kojima *et al.*, npj Quantum Mater. **6**, 16 (2021).

P4 機械学習による2次元スピン模型の二次相転移および Berezinskii-Kosterlitz-Thouless 転移の検出

早大先進理工

宮島 悠輔, 望月 維人

ニューラルネットワークを用いた機械学習により、2次元スピン模型の二次相転移および Berezinskii-Kosterlitz-Thouless(BKT)転移の検出を行った。以前に我々は、2次元 q 状態クロック模型の BKT 転移の検出を行った[1]。2回の BKT 転移を、データの事前加工や転移温度、相の数という模型の性質に関する事前知識を要せずに、同時に検出できることを示した。

一方、本研究では連続スピンをもつ2次元古典 XXZ 模型を研究対象とした[2]。この模型は強磁性薄膜や超伝導薄膜を記述する模型として古くから精力的に研究されてきた。ハミルトニアンは以下のように与えられる。

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} (S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y + \Delta S_i^z S_j^z)$$

模型が示す相転移は S_z 方向の異方性の値 Δ で決まる。この模型は、 $\Delta > 1$ のとき1回の二次相転移、 $\Delta < 1$ のとき1回の BKT 転移を示す。本研究では、相転移の種類が切り替わる境界 $\Delta = 1$ 付近の値である $\Delta = 1.05$, $\Delta = 0.95$ のときの相転移の検出を行った。

自明な秩序変数を持たないため、BKT 転移は二次相転移と比較して、検出が困難である。連続スピン系で発現する BKT 転移には、秩序変数として **helicity modulus** が存在する。その表式は模型に依存し、モンテカルロ法を実行するには模型ごとに表式を導出する必要がある。しかし、複雑な相互作用をもつ模型では導出が困難であることから、**helicity modulus** は系統的な BKT 転移の検出とは相性が良くない。さらに、帯磁率は転移温度で発散を示し、原理的には相転移の検出に有効であるが、著しい有限サイズ効果のため信頼のできる結果を得るには膨大な数値計算コストを要する。そのような背景から近年、従来のモンテカルロ法を補う相転移検出手法として機械学習を用いる方法が提案されている。しかしその多くが、転移温度などの模型の相転移に関する事前知識を要するため、振る舞いのよくわからない模型への適用が難しいという、汎用性の面での問題を抱えている。

そこで本研究では、模型の性質に関する事前知識をできる限り前提としない2種類の方法で、XXZ 模型の相転移の検出を試みた。1つ目は、イジング模型のスピン配置や XY 模型の渦配置を学習したニューラルネットワークを XXZ 模型に適用する方法である。2つ目は、XXZ 模型のスピン配置や渦配置が生成された温度を正しく推定するように学習させたニューラルネットワークの最終隠れ層と出力層をつなぐ重み行列に着目する方法である。2つ目の方法では、我々が新たに考案した「重みの相関関数」や「重みの分散」という量を用いて重み行列の解析を行い、転移温度の決定を試みた。

[1] Y. Miyajima, Y. Murata, Y. Tanaka and M. Mochizuki, Phys. Rev. B **104**, 075114 (2021).

[2] Y. Miyajima and M. Mochizuki, Phys. Rev. B **107**, 134420 (2023).

4 重波数磁気ヘッジホッグ格子における ワイル・ノーダルラインマグノン

早稲田大学 大学院先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻
衛藤倫太郎, 望月維人

Topological magnons in the quadruple-Q magnetic hedgehog lattices
Department of Applied Physics, Waseda University
Rintaro ETO and Masahito MOCHIZUKI

磁性物質中の局在スピンの構成する仮想的な磁気単極子・反単極子が空間周期的に配列した磁気ヘッジホッグ格子と呼ばれる磁気構造が、マンガン化合物 $\text{MnSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ [1] やペロブスカイト型酸化物 SrFeO_3 [2] において実験的に発見されており、近接スピンの張る有限の立体角および磁気単極子・反単極子の対消滅に起因する大きなスピン揺らぎに由来した電荷・熱輸送[3,4]が大きな注目を集めている。その一方で、磁気ヘッジホッグ格子はトポロジカル磁気構造の一種であり、回転モードやブリッジングモード・ポリゴンモード等を持つスキルミオン結晶と同様に多彩なスピン波モードを持つことが期待される。こうしたスピン波モードを用いた高効率なマイクロ波ダイオード効果やマイクロ波電圧変換などが期待されており、その探索は非常に重要であるにもかかわらず、磁気ヘッジホッグ格子における磁気励起の性質はほとんど調べられていない。

本研究では、4つの磁気螺旋の重ね合わせで表現される4重波数磁気ヘッジホッグ格子を基底状態を持つスピン模型を構築し、[001]方向の磁場が印加された下での磁気励起の性質を、主に線形スピン波近似を用いて調べた。この模型は、我々が以前の研究で明らかにした、近藤格子模型中の4重波数磁気ヘッジホッグ格子におけるサブテラヘルツ領域の3つのスピン波モードの性質を良く再現する。解析の結果、L1モードと呼ばれる特定のスピン波モードのソフト化に付随して起こるバンド反転に伴って、「1対のType-IIワイルノードペア」と「量子化されたベリー位相 π によって保護されたType-IIノーダルリング」という2種類の異なるトポロジカルマグノンが共存する特異な励起構造が現れることを明らかにした。さらに、バルクエッジ対応の帰結として現れる表面状態を、有効 kp 模型の厳密な解析と数値計算による表面グリーン関数の繰り込みを相補的に用いて調べた結果、ワイルノードに付随して現れるヘリコイド型表面状態はバルクバンドの連続領域と部分的に分離することを見出した。一方このヘリコイド型表面状態とは対照的に、ノーダルリングに付随して現れるドラムヘッド型表面状態は、バルクバンドの連続領域内部に完全に埋もれてしまう。講演では、スピン波モードの詳細な磁場依存性、表面状態の実験での観測可能性、磁気構造の対称性・内部自由度との関連についても議論する。

[1] Y. Fujishiro *et al.*, Nat. Commun. **10**, 1059 (2019).

[2] S. Ishiwata *et al.*, Phys. Rev. B **101**, 134406 (2020).

[3] Y. Fujishiro *et al.*, Nat. Commun. **9**, 408 (2018).

[4] S. Aji *et al.*, arXiv:2305.01172.

時間反転対称なトポロジカル超伝導体と非ユニタリ超伝導体 におけるスピнкаロリトロニクス

京大基研^A, 阪大院基礎工^B, 東北大院工応物^C, ルイジアナ州立大^D
松下太樹^A, 水島健^B, 安藤慈英^B, 正木祐輔^C, 藤本聡^B, Ilya Vekhter^D

時間反転対称なトポロジカル超伝導体と非ユニタリ超伝導体において、クーパー対は特有のスピン構造を持つ。具体的には、

- 時間反転対称なトポロジカル超伝導体において、クーパー対はスピнкаイラリティ、
 - 非ユニタリ超伝導体において、クーパー対はスピン分極
- を持つ。しかし、これらのクーパー対のスピン構造を捉える物理現象は明らかにされておらず、そのことが、物質におけるトポロジカル超伝導や非ユニタリ超伝導の立証を妨げていた。

本発表では、時間反転対称なトポロジカル超伝導体と非ユニタリ超伝導体において、温度勾配により誘起されるスピン伝導を観測することにより、クーパー対のスピнкаイラリティやスピン分極を検出できることを示す。具体的には、

- 時間反転対称なトポロジカル超伝導体においては、クーパー対のスピнкаイラリティによりスピネルnst効果(温度勾配に垂直な方向のスピン伝導)[1]、
- 非ユニタリ超伝導体においては、クーパー対のスピン分極によりスピンゼーベック効果(温度勾配に沿ったスピン伝導)[2]

は引き起こされることを示す。

これらの温度勾配によるスピン伝導は、クーパー対のスピン構造により引き起こされるため、超伝導転移温度以下で増大する。そのため、スピネルnst伝導率やスピンゼーベック伝導率が超伝導転移温度以下で増大する振る舞いを観測することにより、クーパー対のスピнкаイラリティやスピン分極を立証することができる。

引用文献

[1] T. Matsushita, J. Ando, Y. Masaki, T. Mizushima, S. Fujimoto, and I. Vekhter

Phys. Rev. Lett. **128**, 097001(2022).

[2] T. Matsushita, T. Mizushima, Y. Masaki, S. Fujimoto, and I. Vekhter in preparation.

超伝導体に特有な非相反光学応答の理論

東大先端研^A, 京大理^B

渡邊 光^A, 大同 暁人^B, 田中 大登^B, 柳瀬 陽一^B

超伝導体について、ゼロ抵抗現象や低周波数領域の光学反射特性など超流動密度に由来した特徴的な電磁応答が様々に知られているが、更に近年非線形領域における光学特性に注目が集まっている。集団励起に伴う光学応答の増強や超伝導電流バイアスによる特性の変調などが報告されているほか、YBCO など非従来型超伝導では対称性の破れに由来した非線形光学応答が観測されるなど[2]、超伝導と非線形光学をキーワードとした研究は様々な広がりを見せている。線形光学応答や超伝導揺らぎに由来した非線形電磁応答に関しては多くの理論研究がなされている一方で、非線形光学応答について系統的に調べた研究は少ない。特に非線形光学特性は量子相対称性の決定において有用なプローブであるから、その基礎理論の構築は重要といえる。

本発表ではそのような超伝導体のもつ非線形光学応答、特に反転対称性の破れに由来した非線形光学現象（非相反光学応答）の理論的解析結果について議論する[3]。ボゴリユボフ・ドジャンハミルトニアンと摂動論に基づく非線形光学応答係数の計算を行い、光電流生成・二次高調波生成などの代表的な非線形光学応答に対する超伝導性の影響を解析的に調べた。従来研究では常伝導状態と同様の機構が提案されていたが[4]、本研究では更に超伝導性に由来した新奇な機構を明らかにした。この機構は超伝導状態の時空間対称性に応じて、低周波数領域の光学特性に特徴的な発散をもたらすため、エキゾチックな超伝導状態の特徴づけにおいて重要な役割を担うものと考えられる。

[1] R. Shimano and N. Tsuji, Higgs Mode in Superconductors, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **11**, 103 (2020).

[2] レビューとして、J. Orenstein et al., *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **12**, 247 (2021)

[3] HW, A. Daido, and Y. Yanase, *Phys. Rev. B* **105**, 024308 (2022); H. Tanaka, HW, and Y. Yanase, *Phys. Rev. B* **107**, 024513 (2023)

[4] T. Xu, T. Morimoto, and J. E. Moore, *Phys. Rev. B* **100**, 220501 (2019).

Multi-locational Majorana Zero Modes

名大工^A, Max Plank 研究所^B, 北大工^C, 名大高等研究院^D長江優太郎^A, Andreas. P. Schnyder^B, 田仲由喜夫^A, 浅野泰寛^C, 池谷聡^{A,D}

近年の凝縮系物理学において、トポロジカル超伝導体の表面状態として出現するマヨラナ束縛状態の探索は理論・実験の両面で中心的な関心を集めている。トポロジカル物質に関する研究の指導原理である「バルク境界対応」によれば、 d 次元 n 次トポロジカル超伝導体中出现するマヨラナ束縛状態は $(d - n)$ 次元の表面状態として現れることが予言される。このため、トポロジカル超伝導体に関する研究はバルク境界対応に基づく予言がうまく適用できるように物質の形状や表面・界面を設計して行われてきた。

本研究ではこのような制約を無くし、トポロジカル超伝導体の形状・境界条件を工夫することでバルク境界対応では予言できないようなマヨラナ束縛状態が現れることを明らかにした。具体的には図(a)に示したような3つの1次元トポロジカル超伝導体を1点で接合した三端子 Josephson 接合系の低エネルギー励起状態として、図(b)に示したような2つの異なる超伝導体のそれぞれの端に波動関数のピークを持つマヨラナ束縛状態が現れることを理論的に予言した。発表では我々が multi-locational Majorana zero modes と呼んでいるこの新奇準粒子状態が量子非局所性とマヨラナ粒子性を併せ持つことと、電気伝導特性に与える影響について説明する[1]。

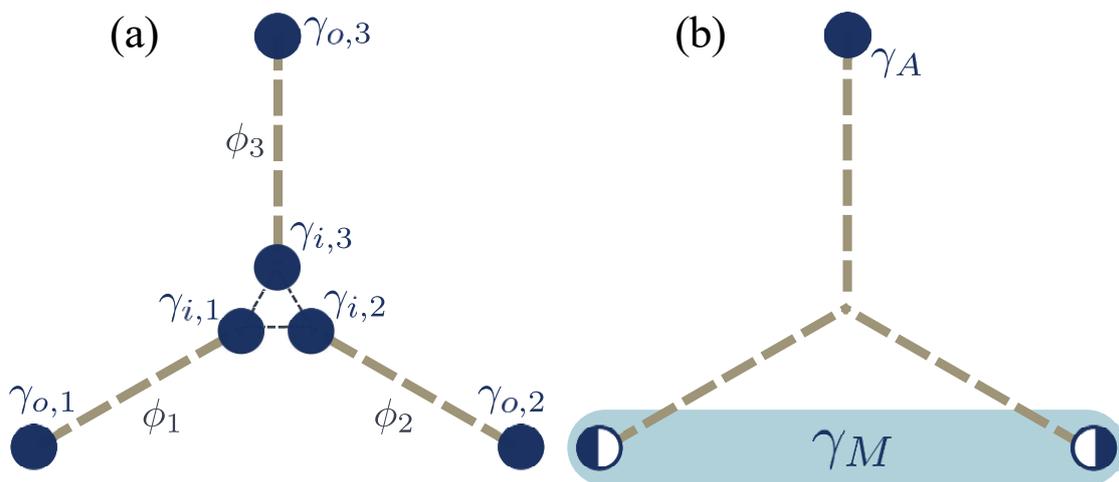


図 トポロジカル三端子 Josephson 接合系の模式図(a)と multi-locational Majorana zero mode の模式図(b)

[1] Y. Nagaе, A. P. Schnyder, Y. Tanaka, Y. Asano, and S. Ikegaya arxiv 2306.13291

テラヘルツ第三高調波発生を用いた鉄系超伝導体 FeSe の

低エネルギー集団励起モードの観測

東京大学理^A, 東京大学総合^B, 東京大学低セ^C松本陽行^A, 小林友輝^B, 小川浩生^B, 鍋島冬樹^B, 前田京剛^B, 島野亮^{A,C}

超伝導の集団励起モードとは超伝導秩序変数の揺らぎに対応する励起モードであるが、複数の超伝導秩序変数間の相対位相の揺らぎに対応する集団励起モード(Leggett モード)は時間反転対称性の破れた超伝導状態への転移点でソフト化すると理論 [1]が報告されているなど、超伝導の性質を反映して様々に変化することが知られている。超伝導の集団励起モードはテラヘルツ(THz)周波数領域の電磁波と非線形に結合することによって観測できる [2]ため、THz 周波数領域の非線形光学応答を用いて集団励起モードを調べることは超伝導の性質を明らかにする新しい手法となることが期待される。

鉄系超伝導体 FeSe は、非従来型超伝導を示し、複数のフェルミ面を持つなど、様々な特異な性質を持つ可能性のある物質として大きな注目を集めている [3]。特に、超伝導ギャップが複数の対称性成分を持つ可能性 [4]や時間反転対称性を破った超伝導状態になる可能性 [5]を示唆する実験結果が得られており、さらなる実験的な検証が求められている。そこで我々は超伝導の集団励起モードを通して超伝導状態の性質に関する情報を得ることを目的として FeSe の THz 周波数領域の非線形光学応答を調べた。

FeSe/CaF₂ 薄膜に対して中心周波数 0.1 THz (0.4 meV)から 0.5 THz (2.1 meV)の狭帯域 THz 波パルス照射したところ、超伝導転移温度以下で発達する第三高調波発生(THG)信号を観測した。この THG の温度依存性を測定したところ、0.2 THz (0.8 meV)以下の THz 波パルスを用いた時のみ位相差のシフトが観測されたが、これは観測された THG がおよそ 2×0.8 meV 以下の集団励起モードによる応答であることを示唆する。超伝導秩序変数の振幅揺らぎに対応する Higgs モードは 2Δ (または $2|\Delta|_{\max}$) のエネルギーを持つ [2,6]ことから、この振る舞いは Higgs モードによる応答である可能性は低いと考えられる。発表では温度依存性と励起パルス偏光方向依存性から観測された THG の起源と、それから示唆される FeSe の超伝導状態の性質について議論を行う。

- [1] S.-Z. Lin and X. Hu, Phys. Rev. Lett. **108**, 177005 (2012).
- [2] R. Shimano and N. Tsuji, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. **11**, 103 (2019).
- [3] T. Shibauchi, T. Hanaguri, and Y. Matsuda, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 102002 (2020).
- [4] F. Kretschmar *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 1 (2013).
- [5] K. Matsuura *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. **120**, e2208276120 (2023).
- [6] L. Schwarz and D. Manske, Phys. Rev. B **101**, (2020).

三段階プロセスによる $\text{Nd}_2\text{NiO}_3\text{F}$ の作製とその物性

名古屋大学 大学院工学研究科
齋藤 雄大, 浦田 隆広, 生田 博志

2019年に、 NdNiO_2 薄膜に Sr を一部置換した試料において、ニッケル酸化物では初となる超伝導転移が観測され、大きな関心が寄せられている[1]。この母物質の Ni の形式価数は +1 であり、銅酸化物高温超伝導体の Cu^{2+} イオンと同じ電子配置 ($3d^9$) が実現している。このことから、 Ni^{1+} 状態がニッケル酸化物超伝導発現の鍵とされている。そこで、Ni の形式価数が等しい関連物質にも関心が集まっている。本研究では $R_2\text{NiO}_4$ ($R = \text{La}, \text{Nd}, \text{Pr}, \dots$) に着目した。この系では、Ni の形式価数は Ni^{2+} となり、超伝導を担うと考えられている Ni^{1+} とは異なっているが、近年これを母物質とした三段階プロセスによって Ni^{1+} 状態を持つ $\text{La}_2\text{NiO}_3\text{F}$ が合成可能であることが報告された[2]。しかし、この報告では試料内部の副生成物の影響で詳細な物性測定は行われていない。本研究では、このプロセスを改良することで試料内部に副生成物を含まない単相の $\text{Nd}_2\text{NiO}_3\text{F}$ バルク多結晶体の作製を目的とした。

母物質の Nd_2NiO_4 は固相反応法により作製した。この母物質に対して、フッ化剤及び還元剤を用いた topotactic 反応により $\text{Nd}_2\text{NiO}_3\text{F}$ を作製した。図 1 にこのプロセスの過程で起こると予想される構造変化を示す。作製した試料に対して粉末 XRD 測定、電気抵抗率測定、及び磁化率測定を行った。

図 2 に得られた試料の粉末 XRD 測定結果を示す。出発物質の直方晶 Nd_2NiO_4 では下三角で示した 020/200 ピークが分裂しているが、 $\text{Nd}_2\text{NiO}_3\text{F}_2$ に変化することでピーク間隔が増大し、 $\text{Nd}_2\text{NiO}_3\text{F}$ では 1 つ (110 ピーク) になっていることが分かる。これは Nd_2NiO_4 をフッ素化することによって直方歪みが増大し、還元により正方晶へと構造が変化したことを意味しており、予想されたプロセスが進行したと言える。また、すべての試料で不純物相は確認されなかったため、単相の $\text{Nd}_2\text{NiO}_3\text{F}$ が得られたことが分かる。本講演では基礎物性についても合わせて報告する。

[1] D. Li *et al.*, *Nature* **572**, 624 (2019).

[2] K. Wissel *et al.*, *Chem. Mater.* **32** 3160 (2020).

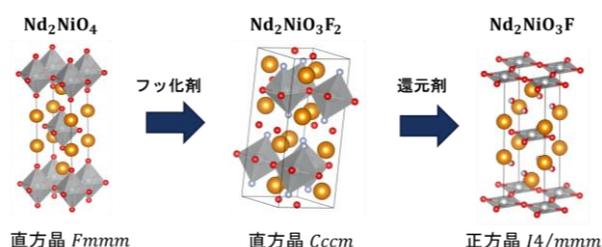


図 1. プロセスの過程で予測される構造変化

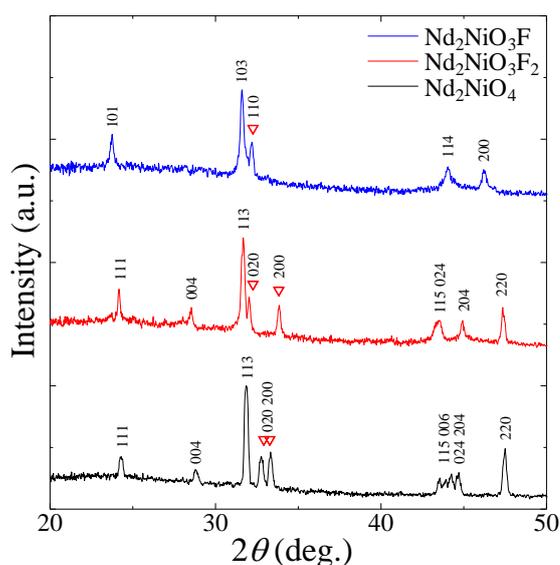


図 2. 得られた試料の粉末 XRD 測定結果

沖縄科技大^A藤澤唯太^A, A. Krishnadas^A, 中村友謙^A, 岡田佳憲^A

擬ギャップ状態やネマティック状態などの異常金属状態は銅酸化物・鉄系超伝導の発現と密接に関わっているため、現在も精力的に研究されている。これらの異常金属状態は、 $q=0$ あるいは $q \neq 0$ の秩序化ベクトルをもち、それに伴ってバンドギャップ、レプリカバンドの出現、バンドの分裂などが実験的に観測されている。これらの現象は、二次元正方格子を有する銅酸化物・鉄系超伝導体のみならず、近年盛んに研究されている金属間化合物である擬二次元カゴメ超伝導体(AV_3Sb_5)においてもみられる。一方で、イオン結合性の強い遷移金属酸化物におけるフラストレート格子上での超伝導、および異常金属状態に興味もたれる。しかしながら、分光研究に適した試料作製が困難であることから、実験的には未開拓な領域であった。

LiTi_2O_4 (LTO)はフラストレート格子をもつスピネル化合物の中で最も高い超伝導転移温度(~ 13 K)を有する超伝導体である(Fig. 1a)。近年の薄膜作製技術の向上に伴い量子多体効果に由来した様々な興味深い性質が明らかになりつつある。我々は、主に分光イメージングによってこの物質の物性解明に取り組んでいる。本講演では、ある特徴的な温度以下で急激に発達するフェルミエネルギー近傍のキंक構造を紹介する(Fig. 1b)。キंक構造の詳細な温度依存性を測定した結果から (Fig. 1c), 150 K 以下で対称性の低下を伴わない新しい量子相が実現している可能性を議論する。この量子相は、幾何学的フラストレーションが対称性の低下を伴った相転移を抑制した結果現れるエントロピーの高い状態であると推測される。さらには、磁場印加によって電子系の回転対称性が破れ、エントロピーが解放される可能性を議論する。

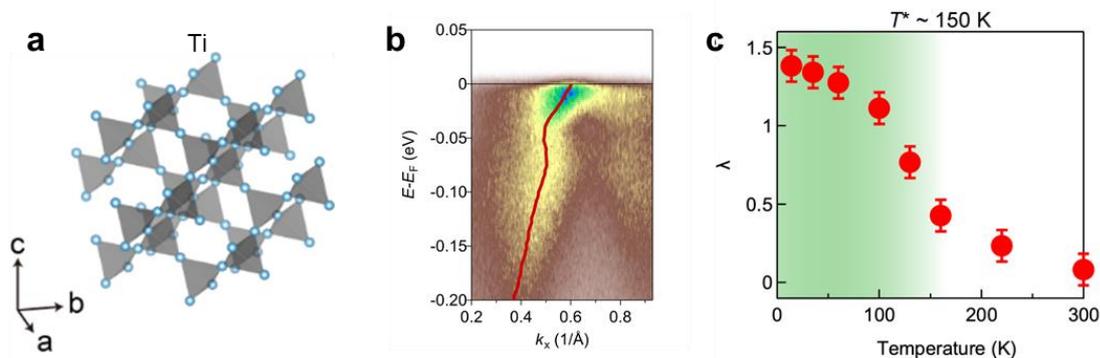


Fig.1 (a) LiTi_2O_4 における Ti サイトによって構成されたパイロクロア格子. (b) ARPES による Γ M 方向のバンド分散. -50 meV 付近に特徴的なキंक構造が現れる. (c) キंकから得られる結合定数の温度依存性. 150 K 以下で急激な増大が見られる.

[1] Y. Fujisawa *et al.*, arXiv 2306. 06708 (2023).

[2] Y. Fujisawa *et al.*, arXiv 2306. 06711 (2023).

スピン軌道結合金属 $\text{Pb}_2\text{Re}_2\text{O}_{7-\delta}$ における

電気トロイダル四極子転移

名古屋大工^A, 高エネ機構物構研^B

中山祐樹^A, 平井大悟郎^A, 佐賀山基^B, 小島慶太^A,
片山尚幸^A, 竹中康司^A

スピン軌道相互作用 (SOI) が強く、空間反転対称性を有する金属においてスピン軌道結合金属 (SOCM) という概念が提案された[1]。SOCM では強い SOI によるフェルミ液体不安定性により、自発的な空間反転対称性の破れを伴った構造相転移が生じる。反転対称性の破れによってフェルミ面がスピン分裂を生じて、非従来型の多極子秩序やエキゾチックな超伝導の舞台として期待されている[2]。しかし、SOCM の候補物質は $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ 、 LiOsO_3 と数が限られており、共通する物理の構築のために更なる物質開拓が求められている。

そこで、我々は $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ と同じくパイロクロア型酸化物である $\text{Pb}_2\text{Re}_2\text{O}_{7-\delta}$ に注目した。 $\text{Pb}_2\text{Re}_2\text{O}_{7-\delta}$ は先行研究により 300 K 付近で空間反転対称性の破れを伴った構造相転移が報告されている[3, 4]。しかし、低温相の結晶構造に対して異なる空間群が提案されており、どちらが正しいか検証されていなかった[3, 4]。そのため、我々は $\text{Pb}_2\text{Re}_2\text{O}_{7-\delta}$ の単結晶試料を合成し、物性測定、放射光 X 線回折測定を行い、相転移の詳細を調べた。図に放射光 X 線回折測定による回折パターンの温度変化を示す。高温立方晶相の(2000)反射が 300 K 以下で正方晶への転移を示すピーク分裂を示し、禁制反射である(1800)反射付近では超格子反射が現れた。これらの結果をもとに群-部分群の関係から低温相の空間群は $I4_122$ であると考察した。この空間群は G_u 型の電気トロイダル四極子秩序によって誘起される構造である[5]。当日は $\text{Pb}_2\text{Re}_2\text{O}_{7-\delta}$ 単結晶試料の物性測定と放射光 X 線回折測定の詳細について報告する。

[1] L. Fu, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 026401 (2015).

[2] V. Kozii and L. Fu, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 207002 (2015).

[3] K. Ohgushi *et al.*, *Phys. Rev. B* **83**, 125103 (2011).

[4] C. Michioka *et al.*, *J. Phys.:Condens. Matter* **23**, 445602 (2011).

[5] L. Hayami *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 147602 (2019).

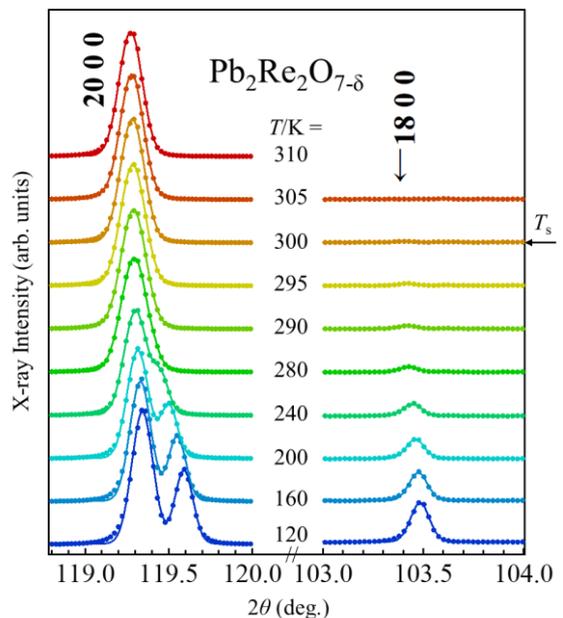


図. $\text{Pb}_2\text{Re}_2\text{O}_{7-\delta}$ 単結晶試料の高温相の(2000)、(1800)反射付近における X 線回折パターンの温度変化

ラシュバ・ハバードモデルにおけるワイル点と強相関効果

原子力機構先端研
久保勝規

ヘテロ構造の界面など、反転対称性の破れた2次元電子系においては、ラシュバ・スピン軌道相互作用と呼ばれる、運動量に依存したスピン軌道相互作用が現れる[1]。これまで、スピントランジスタの提案[2]など、ラシュバ・スピン軌道相互作用を利用した現象について多くの研究がなされてきた。しかし、それらの研究は主に1電子状態を考慮したものであり、電子間のクーロン相互作用の影響についてはあまり研究がされていない。

そこで、本研究ではラシュバ・スピン軌道相互作用のある系の電子相関効果を調べる。この目的のために考えられる最も簡単なモデルは、正方格子上のハバードモデルにラシュバ・スピン軌道相互作用を取り入れたものである。これはラシュバ・ハバードモデルと呼ばれる。ハミルトニアンは $H = H_{\text{kin}} + H_{\text{R}} + H_{\text{int}}$ で与えられ、運動エネルギー項 H_{kin} では最近接のホッピング、相互作用項 H_{int} ではオンサイトのクーロン相互作用を通常ハバードモデルと同様に考える。ラシュバ・スピン軌道相互作用項 H_{R} では最近接サイト間のラシュバ・スピン軌道相互作用を考える[3]。ラシュバ・スピン軌道相互作用がないときは、バンドは2重縮退しているが、ラシュバ・スピン軌道相互作用によりその縮退は解ける。ただし、時間反転不変な運動量 $\mathbf{k} = (0,0), (\pi,0), (0,\pi), (\pi,\pi)$ では縮退は解けず、これらの周りでエネルギー分散は線形となる。これらの点はワイル点と呼ばれる。

我々は、変分モンテカルロ法を用いて、このモデルの強相関効果を調べた[4]。その結果、先行研究[5]と同様に、ラシュバ・スピン軌道相互作用が小さい領域では、ラシュバ・スピン軌道相互作用は金属状態を安定化することを確認した。それに加えて、ラシュバ・スピン軌道相互作用が大きい領域では、電子相関によってワイル点がフェルミ準位近傍に移動し、ワイル半金属状態が安定化することを見出した。

[1] Y. A. Bychkov and E. I. Rashba, JETP Lett. **39**, 78 (1984).

[2] S. Datta and B. Das, Appl. Phys. Lett. **56**, 665 (1990).

[3] F. Mireles and G. Kirczenow, Phys. Rev. B **64**, 024426 (2001).

[4] K. Kubo, arXiv:2307.04307.

[5] V. Brosco and M. Capone, Phys. Rev. B **101**, 235149 (2020).

名古屋大学 工学研究科
阪倉 研斗、浦田 隆広、生田 博志

近年、スピントロニクス技術を利用した新規デバイスの開発が盛んに行われている。その中でもマクロな磁化を持たない反強磁性体を用いたデバイスは高集積化、高速・安定動作の点で注目されている。反強磁性体のスピンを制御する方法の一つとして、空間反転対称性が破れた系に電流を印加することで生じるエデルシュタイン効果を用いることが検討されており、2016年に CuMnAs においてはじめて実証された[1]。本研究では反強磁性体 PrMnSb_2 に注目した。この物質は室温以下で、磁性元素である Pr と Mn に起因する反強磁性秩序を示す[2, 3]。これらの磁性元素はそれぞれがエデルシュタイン効果を示す条件を満たし、2つの磁性元素を同時に操作できれば2倍の情報を蓄積することができる。そこで本研究では PrMnSb_2 の磁気秩序状態に対する電流印加の影響を明らかにすることを目的にした。

まず、 PrMnSb_2 単結晶試料を flux 法で作製した。反強磁性体のスピン方向制御には電流密度が高い必要があると考えられるため、単結晶試料を集束イオンビームで微細加工した。加工した試料に電流パルスを印加し、抵抗変化を測定した。

図2に4.2 Kにおける電流パルス印加測定結果を示す。破線は電流パルス印加したタイミングを表す。低磁場では大きな抵抗変化は見られなかったが、2.5 Tの磁場下で、10 mAと20 mAの電流パルスで1%以上の抵抗変化が観測された。 PrMnSb_2 の磁気相図[3]と合わせて考えると、この抵抗変化は、電流パルス印加で発生したジュール熱による加熱とその後の冷却で、準安定状態として高温相が出現したことに起因すると推測される。

そのため、今後は接触抵抗を減らすために、デバイス作製方法を工夫する必要があると考えられる。発表当日は、上記の結果の詳細に加え、デバイス作製の取り組みについても報告する。

参考文献

- [1] P. Wadley *et al.*, *Science* **351**, 587 (2016).
 [2] S. K. Malik *et al.*, *J. Appl. Phys.* **91**, 7842 (2002).
 [3] Y. Takahashi, T. Urata and H. Ikuta, *Phys. Rev. B* **104**, 054408 (2021)

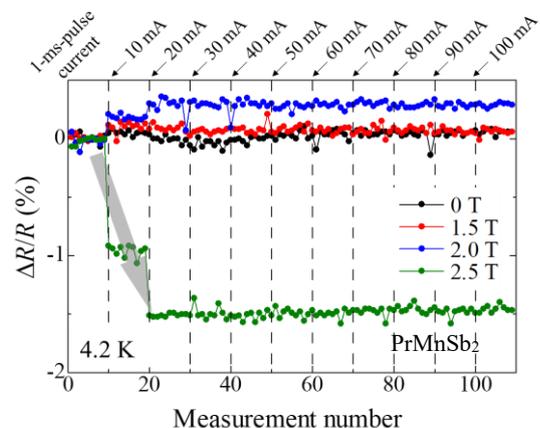


図1 4.2 Kにおける電流パルス印加測定。縦軸は測定前からの抵抗変化率、横軸は測定回数を表す。

ハイエントロピーアンチモン化物における超伝導

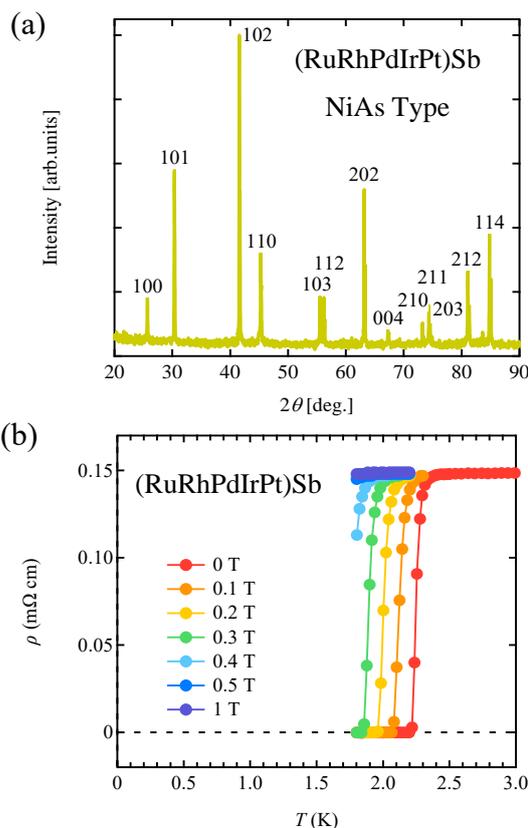
名大院工, 名大院理^A, 名大未来研^B

植松直斗, 平井大悟郎, 出口和彦^A, 齋藤晃^B, 竹中康司

ハイエントロピー物質は、高い無秩序度、すなわち高い配置のエントロピーによって安定化された物質である[1]。この物質群では、高い機械的特性が報告され[2]、盛んに研究が行われている。また、強い化学的無秩序性に由来する更なるユニークな物性の出現が期待されている[3]。我々は、超伝導や高い熱電特性など多様な電子物性を持つ遷移金属アンチモン化物に注目し、ハイエントロピー物質の合成を行った。

本発表では新規ハイエントロピーアンチモン化物 (RuRhPdIrPt)Sbの合成に成功し、超伝導を発見したことを報告する。合成は固相反応法で行い、高温からの急冷で合成に成功した。(RuRhPdIrPt)Sbは、1つの遷移金属サイトを5種類の元素が等モルで占有し、図aの粉末X線回折パターンに示すようにNiAs型構造をとる。図bに示す電気抵抗率の温度依存性では、2.3 K以下で急激に電気抵抗率が減少し、2.2 Kでゼロ抵抗を示した。また、磁場印加によって電気抵抗率の急激な減少は抑制され、超伝導転移が確認された。さらに、磁化率の温度依存性に大きな反磁性が観測されたこと、比熱の温度依存性に超伝導転移に対応するピークが現れたことから、バルク超伝導であることが明らかになった。 T_c は本系のPtSbが持つ最大 $T_c = 2.1$ K[4]より若干高くなっている。当日は、(RuRhPdIrPt)Sbの超伝導特性や物性の詳細について議論する。

- [1] C. M. Rost *et al.*, Nat. Commun. **6**, 8485(2015).
- [2] B. Gludovatz *et al.*, Science **345**, 1153 (2014).
- [3] L. Sun *et al.*, Phys. Rev. Mater. **3**, 090301 (2019).
- [4] B. T. Matthias *et al.*, Phys. Rev. **90**, 487(1953).



図(a) (RuRhPdIrPt)Sbの粉末X線回折パターンと(b)電気抵抗率の温度依存性

周期外力下の CDW ダイナミクスにおけるフラクタル現象

阪大理^A

舟見優^A, 青山和司^A

フラクタルは海岸線や雲の輪郭などの自然界によく現れる図形で、自己相似性で特徴付けられる。特に興味深いのは、周期駆動された電荷密度波(Charge Density Wave : CDW)のダイナミクスに現れるフラクタル現象である。CDW とは電荷密度の空間的な周期構造であり、通常は不純物や格子欠陥などに固定(ピン止め)されて動かない[1]。しかし、CDW は電子凝縮体であるため電場によって駆動することが可能であり、ピン止めを外す大きさの直流電場を印加すると CDW は集団的に並進運動(スライディング)を行うことが知られている。直流電場に加えて交流電場を印加すると、スライディングによって運ばれる CDW 電流が交流電場の周波数の分数倍に同期し、結果として電流-電場特性中にシャピロステップと呼ばれる多数の階段構造が現れる。この階段構造は一部を拡大して全体と相似している自己相似性を持ち、全体の構造を見ると代表的なフラクタルの一種である「悪魔の階段」を示す(図 1 参照)。

最近では CDW 物質である擬一次元導体 NbSe₃ のスライディング現象に対して、基板に表面弾性波を印加した実験が行われるようになってきた[2]。そこでは交流電場なしでも表面弾性波によるシャピロステップの出現が観測されており、理論研究も進められつつある[3,4]。我々は CDW スライディングの標準理論である Fukuyama-Lee-Rice モデルを拡張し、表面弾性波の効果について理論解析を行った。

その結果、表面弾性波がシャピロステップを誘起する同期メカニズムは交流電場の場合と異なり、この違いを反映して交流電場と表面弾性波誘起の悪魔の階段はそれぞれ異なるフラクタル性を持つことがわかってきた[4]。講演ではこれらの詳細、特に従来の交流電場と新しいタイプの周期外力である表面弾性波が誘起するフラクタル現象について議論する。また、対応する摂動計算[5]についても議論する予定である。

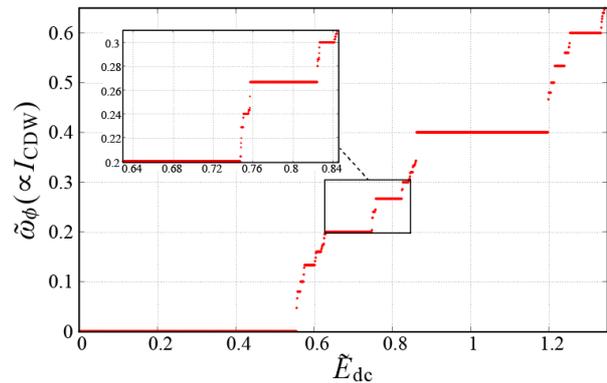


図 1 : FLR モデルで得られた悪魔の階段

[1] G. Grüner, Rev. Mod. Phys. **60**, 1129 (1988).

[2] K. Fujiwara, Y. Niimi *et al.*, private communication.

[3] M. Mori and S. Maekawa, Appl. Phys. Lett. **122**, 042202 (2023).

[4] Y. Funami and K. Aoyama, arXiv:2305.08314.

[5] H. Matsukawa and H. Takayama, J. Phys. Soc. Jpn. **56**, 1507 (1987).

フィボナッチ準結晶を用いた超伝導接合におけるトンネルコンダクタンス

名大理^A, 東京理大理^B
水野航希^A, 堀真弘^B

近年、準結晶において実現するトポロジカル超伝導状態が見出され、注目を集めている[1]。準結晶が通常の結晶では許されない回転対称性を持つこと、並進対称性が存在せず長距離秩序のみが存在することに起因して、上述のトポロジカル状態は通常の結晶では見られない特異な性質を獲得する。その一例として、スピン軌道相互作用が存在する2次元準結晶のコーナーにおいて、回転対称性に対応した分数電荷の存在が理論的に示された[2]。また、この分数電荷が存在する状況で、近接相互作用を導入することによりマヨラナ粒子が創発することも指摘されている。これらの事項は準結晶が高次元空間からの射影により生成されることから、フーリエ空間における高次元からの射影を考えることで、擬ブリルアンゾーンの原点近傍における有効モデルを作成する新しい手法を用いて示されている。

本研究では、この手法に着目し、フィボナッチ準結晶を接合した場合のトンネルコンダクタンスに焦点を当て解析を行った。まず、準周期性を持つキタエフ鎖においては、準周期のパターンに依存するマヨラナエッジモードの存在が示されている[3]。そこで、我々は、ラシュバ型のスピン軌道相互作用が存在するフィボナッチ準結晶に磁場を印加し、s波の近接相互作用を加えた系が、有効的にp波超伝導と等価であることを示した。

本発表では、実空間における再帰グリーン関数を用いた解析により、トンネルコンダクタンスに対する準周期性の寄与を議論する。

[1] R. Ghadimi *et al.*, Phys. Rev. B **104**, 144511 (2021).

[2] C. Wang *et al.*, Phys. Rev. B **129**, 056403 (2022).

[3] J. Jeon *et al.*, Phys. Rev. B **105**, 064502 (2022).

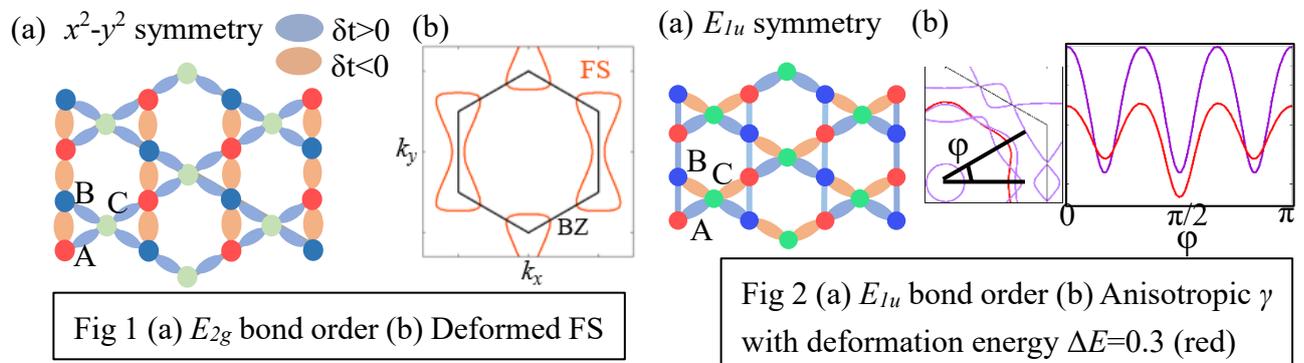
Emergence of Even- and Odd-Parity Intra-Unit-Cell Bond-Order and Nematicity in Kagome Metals

Department of Physics, Nagoya University ^A, YITP, Kyoto University ^B
Jianxin Huang ^A, Rina Tazai ^B, Youichi Yamakawa ^A, Seiichiro Onari ^A and
 Hiroshi Kontani ^A

As a strong correlation system with geometric frustration and quantum interference, kagome metal is a hot topic and being enthusiastically studied. Various exotic phases like charge loop current order and nematicity have been observed in AV_3Sb_5 ($A=K,Rb,Cs$), but the mechanisms of them haven't been revealed thoroughly yet. Besides, the recently discovered Ti-based kagome metal demonstrates novel phenomena, which is worth to be studied.

Enormous research has been conducted on kagome metal AV_3Sb_5 , but they mainly focus on the pure-type band[1], whose van-Hove singularity (vHS) is composed of a single sublattice. However, the mix-type band, in which vHS consists of two sublattices, has not been studied seriously yet. Therefore we research the mix-type band. The two-dimensional (E_{2g} -symmetry) XY-type nematicity is revealed at $q=0$ driven by the vertex corrections of this band[3]. The nematicity is shown in fig 1, the even-parity nematic bond order (a) and deformed Fermi surface (b).

Besides, the recently found kagome metal $CsTi_3Bi_5$ exhibits a nematic state rather than the charge order[2], which is a novel phenomenon and worth to be researched. In our another study on $CsTi_3Sb_5$, we predict a novel “odd-parity” (E_{1u} symmetry) intra-unit-cell bond order (Fig 2(a)) based on the paramagnon interference, breaking mirror symmetry, totally different from V-based kagome metal[4]. To clarify the mechanism, we have a further study on the nematic physical quantities: the inelastic quasiparticle damping γ and the quasiparticle interference, while the latter has been detected by STM in experiment. Fig 2(b) shows the relation between γ on the FS and the corresponding FS angle, which displays the anisotropy.



- [1] R.Tazai et al., arXiv:2207.08068 [2]H. Li et al., arXiv 2211.16477
 [3] J. Huang et al., arXiv 2305.18087 [4] J.Huang et al., arXiv 2305.18093

ノードルライン半金属候補物質 IrO_2 の電子状態の解明名大院工^A, 物材機構^B丸山 寛太^A, 平井 大悟郎^A, 中村 優斗^A, 岸田 英夫^A,
竹端 寛治^B, 今中 康貴^B, 竹中 康司^A

トポロジカル半金属は、Fermi エネルギー(E_F)近傍において直線的な伝導バンドと価電子バンドが点や線で交差し、超高移動度や超巨大磁気抵抗などの特異な輸送特性を示す物質である。しかしそのバンドの交差点は、スピン軌道相互作用などの影響によりエネルギーギャップが生じてしまうことが多く、現時点で実験的にこのような特異な物性が観測される物質は数少ない。ノードルライン半金属 ZrSiS は、理論と実験の両方によってその性質が明らかになっている物質の 1 つであり、分光実験においては光子エネルギー範囲 0.03 ~ 0.3 eV の広い領域で光学伝導度がエネルギーに依存せず一定値となる振舞いが観測されている[1]。この特異な光学特性は、 E_F 近傍に存在するディラックバンドのバンド間遷移に起因するものと考えられており、ノードルラインの存在を示す実験的根拠となっている。また、金属ルチル酸化物 RO_2 も最近ノードルライン半金属の候補として注目されている。その中でも IrO_2 はバンド構造で E_F 近傍にディラックノードルライン(DNL)の存在が予想され、実験的に観測された大きなスピンホール効果が DNL の寄与によることが議論されている[2-4]。

これらの研究結果を受けて、我々は化学気相輸送法により IrO_2 の極めて純良かつ大型な単結晶を育成し、詳細な物性測定を行った。

その結果、偏光光学測定では室温、0.04 ~ 4 eV の範囲について c 軸, a 軸に対して平行な二偏光の反射率スペクトルを得た (図)。発表では、反射率と光学伝導度の周波数依存性や電気抵抗・磁気抵抗などの輸送特性の詳細を示し、主に光学特性から見えるこの物質のノードルラインの存在とその影響について議論する。

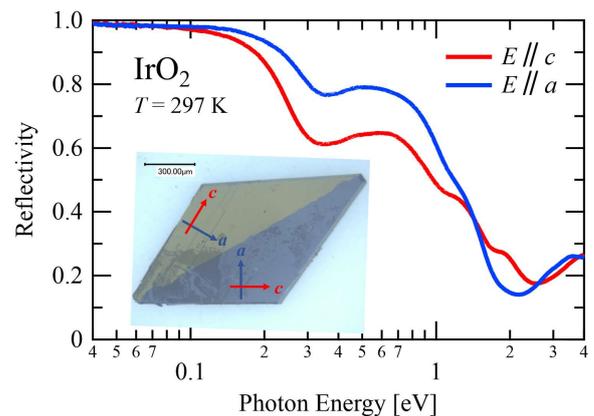


図 : IrO_2 の光反射率の光子エネルギー依存性

[1] M. B. Schilling *et al.*,

Phys. Rev. Lett. **119**, 187401 (2017).

[2] K. Fujiwara *et al.*, Nat. Commun. **4**, 2893 (2013).

[3] Y. Sun *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 146403 (2016).

[4] Y. Sun *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 235104 (2017).

キャリアドーピングされたキタエフハニカム模型における 電子相関効果: スピン軌道相互作用が与える影響

Electron correlation effects in carrier-doped Kitaev honeycomb model: The influence of spin-orbit interaction

名大院理 橋本敬宏, 山川洋一, 大成誠一郎, 紺谷浩

Dept. of Phys., Nagoya Univ. T. Hashimoto, Y. Yamakawa, S. Onari, H. Kontani

α -RuCl₃ は強い電子相関によるモット絶縁体であり、遍歴マヨラナ準粒子が出現するキタエフスピ系として注目を集めている。 α -RuCl₃ の Cl を他のハロゲン元素 X に置換した物質 RuX₃ の金属化を試みる先行研究は盛んに行われており、Cl を I で置換した RuI₃ では半金属化が観測されている [1]。また、グラフェンと α -RuCl₃ からなるヘテロ構造において、グラフェンからキャリアがドーピングされることが理論的に明らかになっている [2]。このように金属化 RuX₃ に関する重要な理論・実験研究が報告されつつある一方、多体金属状態や超伝導状態に関する理論研究はまだ不十分である。

本研究では、キタエフ模型の有力候補である α -RuCl₃ の多体金属状態を調べることを目的として解析を行った。前回の学会発表では、Ru の強いスピン軌道相互作用を無視した理論解析を行い、波数依存性のゆるやかなスピン揺らぎが発達し、シングレット超伝導とトリプレット超伝導が競合することが明らかになった。

今回の発表では、Ru の強いスピン軌道相互作用 ($\lambda = 0.136\text{eV}$) を考慮した計算について報告する。この時、スピン軌道相互作用 ($\lambda = 0.136\text{eV}$) により絶縁化するが (図 1,2)、キャリアを導入することで金属化する。スピン軌道相互作用を考慮した多軌道 RPA を実行し、スピン軌道相互作用の下でのスピン感受率 $\chi^{\mathcal{S}\mu\mathcal{S}\mu}$ ($\mu = x, y, z$) を計算した。その計算結果から、キタエフ模型で発現するイジング異方性を議論する。

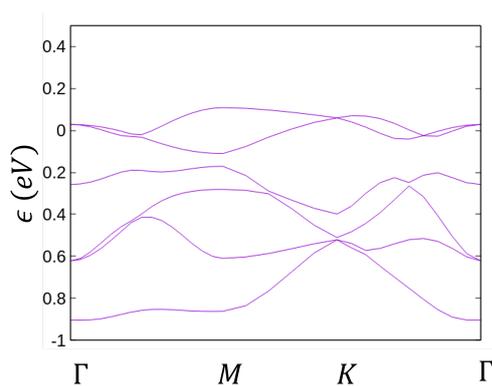


図 1: スピン軌道相互作用がない場合でのバンド構造

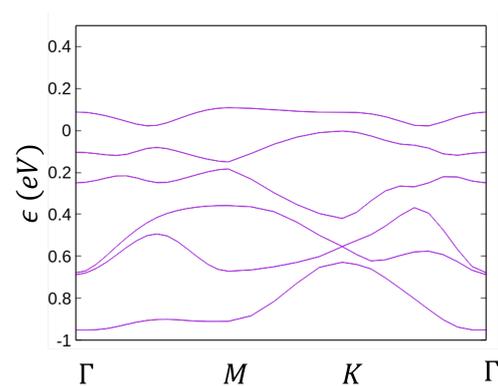


図 2: スピン軌道相互作用がある場合でのバンド構造

- [1] K. Nawa, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 123703 (2021).
- [2] S. Biswas, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **123**, 237201 (2019).

無限層ニッケル酸化物 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_2$ の

非フェルミ流体的輸送現象

名大理

平上 信一, 紺谷 浩, 大成 誠一郎

**Theoretical analysis of non-Fermi liquid transport phenomena
in infinite-layer nickelate $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_2$** *Dept. of Phys. Nagoya Univ.***S. Hiragami, H. Kontani, and S. Onari**

近年、無限層ニッケル酸化物 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_2$ において高温で超伝導($x=0.2$ で $T_c \sim 15\text{K}$)が出現することが報告された[1]。 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_2$ の電子状態としては Ni の dx^2-y^2 軌道がフェルミ面を構成し、 d^9 での電子配置が同じであるなど、銅酸化物に似た構造を持つ。しかし、3次元構造を持ち Nd の d 軌道からなるフェルミ面も現れるため銅酸化物と異なる点も多い。また $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_2$ ($x < 0.1$)において約3倍周期の CDW が現れることが報告された[2]。さらに、CDW の量子臨界点近傍 ($x=0.15$ のホールドーブ)で、非フェルミ流体的輸送現象(電気抵抗 $\rho \propto T$)が観測されている[3]。

本研究では、 NdNiO_2 の第1原理計算に基づいてモデルを作成し、 $x=0.15$ での物理量計算を行った。揺らぎはスピン揺らぎと不純物効果の2種類を取り入れた。FLEX 近似により自己エネルギーを解析し、それに T 行列[4]による不純物効果を加えた。そこから様々な不純物ポテンシャルの値での抵抗率や熱起電力の温度依存性を計算した。その結果、抵抗率は温度に対し線形のような形をとり、非フェルミ流体的な振る舞いを示すことが分かった。また熱起電力も温度に対し線形のような形をとることが分かった。このとき Nd の不純物ポテンシャルの値を高くするほど、熱起電力、抵抗率ともに線形な領域が増えた。また DFT+DMFT の結果[5]に対応する、フェルミ面を小さくしたバンドでの計算も行い、定性的な振る舞いが変わらないことを確認した。

[1] D. Li *et al.*, Nature **572**, 624 (2019).

[2] M. Rossi *et al.*, Nat. Phys. **18**, 869 (2022).

[3] K. Lee *et al.*, arXiv:2203.02580.

[4] S. Onari, H. Kontani, arXiv:0906.2269

[5] M. Kitatani *et al.*, npj Quantum Materials **5**, 59 (2020)

反強磁性体 $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{MnSb}_2$ の磁気及び輸送特性

名古屋大学 大学院工学研究科^A、
名古屋大学 シンクロトロン光研究センター^B

篠田 北斗^A、浦田 隆広^A、田淵 雅夫^{A,B}、生田 博志^A

Dirac半金属は、有効質量がゼロと見なせる高易動度の伝導電子を持つことから、高速電子デバイスなどへの応用が期待されている。さらに近年では、Dirac半金属状態に磁性を付与することで、新奇なスピントロニクス材料として利用する研究も盛んに行われている。その中でも、反強磁性体 AMnX_2 系 (A: 希土類元素, X: Sb, Bi)は、MnやAサイトの希土類の磁性とDirac電子が共存することから注目されている[1]。近年では、 EuMnBi_2 において、Euモーメントのスピントロニック転移に起因し、Dirac電子由来の量子ホール効果が観測されたことから[2]、 AMnX_2 系のDirac電子が、Aサイトの磁性と深い関係を持つことが示唆された。しかし、 AMnX_2 のAサイトがEu以外の磁性元素であるDirac電子系は見いだされておらず、Aサイトの磁性とDirac電子の関係の理解は進んでいない。本研究では、Aサイトの磁性とDirac電子の相互作用から生じる物性の理解を目指し、 SmMnSb_2 の物性探索を行った。その結果、類似系のDirac半金属と比較して、キャリア密度が大きく、易動度は低いことが分かった。そこでX線吸収分光測定により価数評価を行った結果、Smは3価に近い中間価数になっていることが分かった。これは AMnX_2 系のDirac電子系で実現している A^{2+} 状態とは異なっており、本系では電子が過剰な状態になっていることが示唆される。

そこで、ホールドープを目的として、 $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{MnSb}_2$ 単結晶の育成及び基礎物性の測定を行った。面直XRD測定で得られたピーク位置からc軸長を算出した結果、Yb置換に対する系統的な増加が観測された。またEDXの結果から組成が、化学量論比に近い値であることが確認され、 $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{MnSb}_2$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$)の単結晶試料が得られたことが分かる。

得られた試料について磁化の温度依存性を測定し、反強磁性(AFM)転移温度を見積もった。図1に、その転移点をまとめた相図を示す。 $x = 0$ においては、2つの温度で転移が観測され、それぞれMnとSmの反強磁性転移温度であると考えられる。これら二つの転移温度はYb置換によって減少し、高濃度では消失することが分かった。

本講演では、これらの結果の詳細と、Ybの置換量をさらに増やした試料も合わせて、磁場中輸送特性から電子状態について考察した結果について報告する。

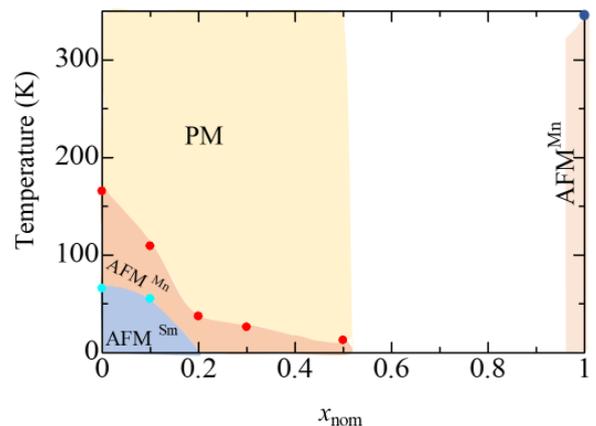


図 1 : 磁化率の温度依存性から作成した $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{MnSb}_2$ の磁気相図($x=1$ の転移温度は参考文献[3]より引用).

【参考文献】

- [1] J. Park *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 126402 (2011).
 [2] H. Masuda *et al.*, Sci. Adv. **2**, e1501117 (2016).
 [3] J. Soh *et al.*, Phys. Rev. B **104**, L161103 (2021).

超伝導体/絶縁体/超伝導体接合のジョセフソン電流

名大工

伊藤寛之, 田仲由喜夫

1962年にB. D. Josephsonが超伝導体を接合することで、散逸なしの電流が流れることを予言してから[1], この電流を計算するのに様々な研究が行われてきた。1963年にV. Ambegaokar, A. Baratoffらによってs波超伝導体同士の透過率がほとんど0の時のジョセフソン電流が, 1978年にI. O. Kulik, A. N. Omelyanchukらによって透過率が1の時のジョセフソン電流が計算された[2, 4]。これらを1991年に古崎, 塚田らがアンドレーエフ反射係数を用いて計算できる公式を導出したことで統一した[5]。その後古崎・塚田公式を拡張することでジョセフソン電流を計算できるようにしてきた。1996年には異方的超伝導に適用され[6], さらに2001年にはスピンも考慮した古崎・塚田公式が作られた[7]。

そのような公式が作られる一方で、接合する超伝導体を変える毎に、境界条件からアンドレーエフ反射係数を計算し直さなければならないという問題があった。そこで、常伝導状態でスピン縮退があり、超伝導体の間はデルタ型の絶縁体障壁がある時を考え、境界条件から計算することなく、超伝導体を特徴付けるペアポテンシャルのみによって、ジョセフソン電流を計算できる式を導出した。

[1] B. D. Josephson. Phys lett., Vol. 1, p. 251-253, 1962

[2] V. Ambegaokar and A. Baratoff. Phys. Rev. Lett., Vol. 10, p. 486, 1963

[3] P. G. de Gennes. superconductivity of Metals and Alloys, Benjamin, New York, 1969

[4] I. O. Kulik and A. N. Omel' Yanchuk. Sov. J. Low Temp. Phys., Vol. 4, 1978

[5] A. Furusaki and M. Tsukada. Solid state communications., Vol. 78, p. 299-302, 1991

[6] Y. Tanaka and S. Kashiwaya. Phys. Rev. B., Vol. 53, p. R11957, 1996

[7] Y. Tanaka and S. Kashiwaya. Phys. Rev. B., Vol. 56, p. 892, 1997

歪んだルチル型酸化物 WO_2 における巨大磁気抵抗効果

名大院工

村松佑都, 平井大悟郎, 竹中康司

外部磁場印加時、電気抵抗が大きく変化する現象を巨大磁気抵抗効果という。巨大磁気抵抗効果は磁性薄膜でよく知られた現象であるが、近年、 WTe_2 や NbP のような非磁性の金属、半金属においても巨大磁気抵抗効果を示すことが報告されている[1][2]。非磁性物質の巨大磁気抵抗効果の起源はトポロジカルな電子構造に由来した機構や電子とホールの補償機構などが考えられている。最近、単純な酸化物 $\beta\text{-ReO}_2$ において巨大磁気抵抗効果 (22000% 2 K, 10 T) が報告された[3]。 $\beta\text{-ReO}_2$ における巨大磁気抵抗効果は補償機構で説明できず、「ディラックループ鎖」というトポロジカルな電子構造に由来する可能性が議論されている。スピン軌道相互作用は一般にディラック点にギャップを開けるが、スピン軌道相互作用の大きな $5d$ 電子系でも結晶の対称性によってはトポロジカル物質が実現できることを示している。

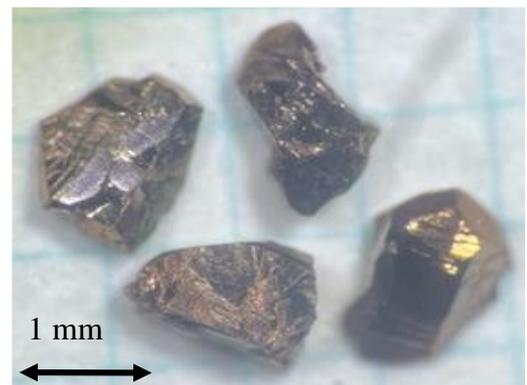
今回、我々は $5d$ 遷移金属酸化物 WO_2 に着目し、化学気相輸送法で育成した高純度単結晶 (Fig.1a) を用いて輸送特性を評価した。 WO_2 は W 原子がダイマーを組み、歪んだルチル型の構造をとる。残留抵抗比が 700 を超える単結晶において測定した磁気抵抗 (MR) の磁場依存性を (Fig.1b) に示す。MR は磁場の増加とともに増大し、2 K, 9 T において 13000% を超える巨大磁気抵抗効果を観測した。当日はホール測定をはじめとした、詳細な輸送特性について紹介し、トポロジカルな電子構造の可能性について議論する。

[1] M. N. Ali *et al.*, Nature **514**, 205 (2014).

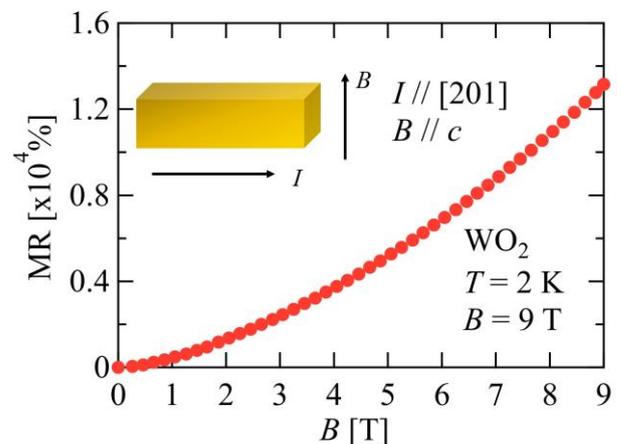
[2] C. Shekhar *et al.*, Nat. Phys. **11**, 645 (2015).

[3] D. Hirai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 094708 (2021).

(a)



(b)

Fig.1(a) WO_2 の単結晶(b) WO_2 の磁気抵抗の磁場依存性

T'-Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO₄におけるアニール効果の検証

千葉大院理^A, 千葉大院融合^B, 上智大理工^C, 東北大工^D, 東電大シスデザ工^E
深澤英人^A, Lee Yongsun^B, 田村昂磨^B, 長谷川佳紀^B, 大濱哲夫^A,
小堀洋^A, 永久保侑祐^C, 田島一輝^C, 川端公貴^C,
高橋晶^D, 川股隆行^E, 足立匡^C, 小池洋二^D

電子ドーピング型銅酸化物高温超伝導体 T'-Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO₄ は、育成したままの試料では超伝導を示さないが、適切なアニールを行なうことで超伝導が発現する [1,]。我々はこの試料のプロテクトアニール（育成したままの単結晶をアニール時に同じ組成の多結晶で覆いアニールを行なう方法）した試料に対して、NMR を行ない、超伝導対称性が d 波であること、ホールドーピング型と同様に NMR の観点からも擬ギャップを示してきた [2, 3]。また、同様の傾向が T'-La_{1.8}Eu_{0.2}CuO_{4-y}F_y でも観測されることを示してきた [4, 5]。電子ドーピング型銅酸化物高温超伝導体の母物質がホールドーピング型と同様にモット絶縁体であるかについては、いまだに決着がついていないが、T'-La_{1.8}Eu_{0.2}CuO_{4-y}F_y では $y = 0$ で超伝導が発現するにもかかわらず、T'-Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO₄ では $x = 0$ でもそもそも超伝導が発現しないという事実がある。しかし、最近になって、足立らによって提唱されたダイナミックアニールという手法により [6]、 $x = 0.05$ の試料では超伝導を示すことがわかってきた [6]。アニールによって、Nd₂CuO₄ 構造（いわゆる T'構造）特有の Cu の上下の頂点酸素だけでなく、CuO₂ 面内の酸素も除去してしまう可能性が考えられる。本講演では、ダイナミックアニールによる単結晶試料に対する影響について、NMR の観点から報告する。具体的には Ce の仕込み組成が多い試料ほど、ダイナミックアニールの効果が大きい結果が得られた。

参考文献

- [1] T. Adachi, T. Kawamata, and Y. Koike, *Condens. Matter* **2**, 23 (2017).
- [2] M. Yamamoto et al., *JPSJ* **85**, 024504 (2016).
- [3] Y. Lee et al. : *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 073709 (2020).
- [4] H. Fukazawa et al., *Physica C* **541**, 30 (2017).
- [5] M. Watai et al., *JPSJ* **90**, 023704 (2021).
- [6] C. Lin et al., *Phys. Rev. Res.* **3**, 013180 (2021).

X線磁気円偏光発光における多重電子-正孔対励起の効果

兵庫県立大学^A, 量子科学技術研究開発機構^B小林 弘樹^{A,B}, 野村 拓司^{A,B}

X線磁気円偏光発光 (XMCPE : X-ray Magnetic Circularly Polarized Emission) は X線領域の磁気光学効果であり, 磁性体から放出される特性 X線が円偏極するという現象である[1]. XMCPE を用いるとバルク磁性体の磁化方向を観測することができ, これを応用した X線磁気顕微鏡の開発が進んでいる[2]. 我々は以前の研究で, XMCPE スペクトルの計算方法を開発し, 図 1 のように Fe の実験スペクトルを再現した[3]. その研究では, 2p 内殻電子と 3d 伝導電子間の相互作用による多体効果を最低次の補正で取り入れた. つまり, 一つの放出 X線光子が 3d バンド上で生じる一組の電子-正孔対励起によってエネルギーロスする過程を考慮した. その結果, 実験スペクトルのピーク構造の低エネルギー側に現れるテイル構造が再現された. また, 最近の研究で Co と Ni に対する予言的な計算も行い, XMCPE が物質依存性を持つことを示した[4].

ここで図 1 の 6400 eV 付近を見ると, 実験と計算の一致が十分ではない. これは最低次の補正しか計算に取り入れていないためであると考えられる. そこで本研究では, 高次の補正を取り入れ, XMCPE スペクトル計算方法の改善を試みる. 高次の補正, つまり多重の電子-正孔対励起を考慮すれば, 特性 X線のエネルギーロスが増加してテイル構造がより低エネルギー側に広がることが見込まれる.

本研究では高次の補正を取り入れるために 2p Green 関数と自己エネルギーを自己無撞着に計算した. ただし, 非平衡 2p Green 関数を直接計算するのは困難であるため, 初めに遅延および先進 2p Green 関数を計算し, その後, 平衡および非平衡 Green 関数間にある関係から非平衡 2p Green 関数を計算する.

結果として, Co および Ni, ならびに図 2 の Fe の XMCPE スペクトルが得られた. 図 2 を図 1 と比較すると, テイル構造が低エネルギー側に伸びることで, 6400 eV 付近の実験と計算の一致が改善している. このことから, XMCPE 過程において, 多重電子-正孔対励起が重要であることがわかる.

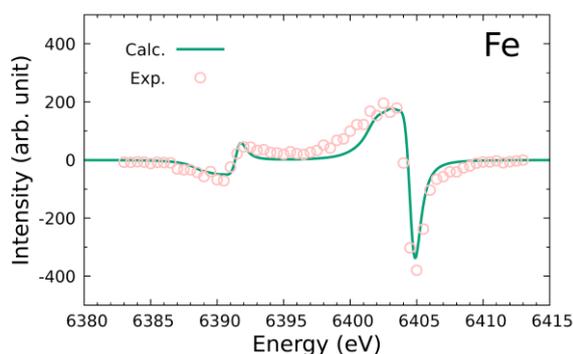


図 1 : 点は実験スペクトル[2]. 曲線は以前の方法で計算したスペクトル.

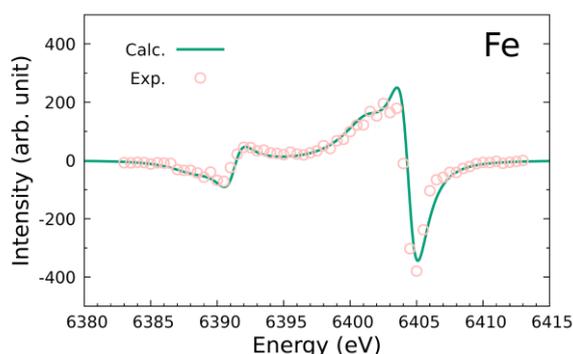


図 2 : 点は実験スペクトル[2]. 曲線は本研究で計算したスペクトル.

[1] T. Inami, Phys. Rev. Lett. **119**, 1337203 (2017).

[2] K. Sugawara et al, J. Appl. Phys. **130**, 113901 (2021).

[3] A. Koide, T. Nomura, and T. Inami, Phys. Rev. B. **102**, 224425 (2020).

[4] H. Kobayashi, A. Koide, T. Nomura, and T. Inami, EPL **140**, 36002 (2022).

5dダブルペロブスカイト $\text{Ba}_2\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{ReO}_6$ における

多極子物性の変化

名大院工^A澁谷 輝規^A, 平井 大悟郎^A, 竹中 康司^A

強いスピン軌道相互作用により、電子のスピンと軌道の自由度が結合した電子を有する化合物において多極子秩序を形成する場合がある。多極子秩序は、これまで4f電子系を中心に研究されてきたが、近年、軌道角運動量がクエンチすると考えられてきたd電子化合物 $\text{Ba}_2\text{MgReO}_6$ において、5d電子による多極子秩序が観測された[1]。5d電子は4f電子に比べて局在性が弱く空間的に大きく広がっているため、4f電子系と異なる多極子物性が期待されている。

5d電子による多極子秩序は、 Ba_2BReO_6 の組成で表されるダブルペロブスカイト化合物において研究されてきた。この化合物は、5d電子を1つ有するReイオン同士が離れており、周りの酸素が正八面体配位しているため、多極子秩序が実現可能な電子状態が形成される。そのうち、 $\text{Ba}_2\text{CdReO}_6$ では四極子秩序と強磁性秩序が[2]、 $\text{Ba}_2\text{CaReO}_6$ では反強磁性秩序が現れ[3]、同じ2価のCaとCdイオンのイオン半径の違いによる化学圧力の効果で電子相が変化している事が示唆される。そこで、我々は現れる電子相が異なる $\text{Ba}_2\text{CdReO}_6$ と $\text{Ba}_2\text{CaReO}_6$ の固溶体 $\text{Ba}_2\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{ReO}_6$ を $x = 0.25, 0.5, 0.75$ の組成で合成し、電子相の変化について調査した。その結果、四極子転移は組成のCaの割合が多くなる程、相転移温度が低くなった。また、磁気転移は $x = 0.25$ では強磁性的、 $x = 0.5, 0.75$ では反強磁性的な振る舞いを示し、Bサイトのイオン半径の変化による磁気基底状態の変化が観測された。本発表では、実験結果から得た図1の電子相図と平均場理論により得られた電子相図を比較する事で、 Ba_2BReO_6 の5d¹電子状態とBサイトのイオン半径の関係について考察する。

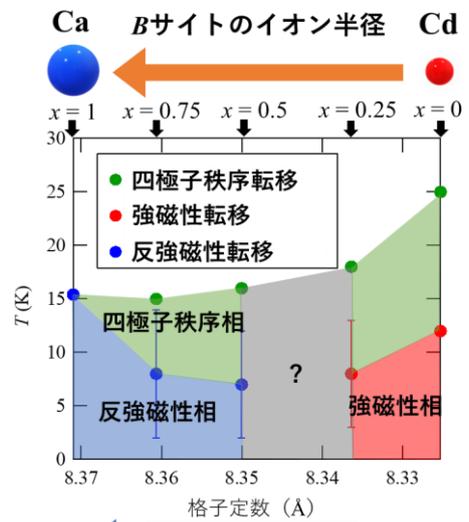


図1 $\text{Ba}_2\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{ReO}_6$ における格子定数と転移温度の電子相図

- [1] D. Hirai, H. Sagayama, S. Gao, H. Ohsumi, G. Chen, T. H. Arima and Z. Hiroi, *Phys. Rev. Res.* **2**, 022063 (2020).
 [2] D. Hirai and Z. Hiroi, *J. Phys: Condens. Matter.* **33**, 135603 (2021).
 [3] H. Ishikawa, D. Hirai, A. Ikeda, M. Gen, T. Yajima, A. Matsuo, Y. H. Matsuda, Z. Hiroi and K. Kindo, *Phys. Rev. B* **104**, 174422 (2021).

d 波超伝導体接合における Doppler shift の形状効果

名古屋大学工^A, 産総研^B

酒森 貴史^A, 松岡 顕輝^A, 姜 東彦^A, 馬渡 康德^B,
矢田 圭司^A, 田仲 由喜夫^A, 柏谷 聡^A

銅酸化物超伝導体は d 波対称性を有しており、Normal/Insulator/Superconductor (NIS) 接合の(110)面におけるトンネルコンダクタンスには、Andreev Bound States に由来する Zero Bias Conductance Peak (ZBCP)が観測される[1,2]。この NIS 接合に磁場を印可すると、マイスナー効果によって、超伝導体表面に遮蔽電流が流れる。NIS 接合のトンネル電流と遮蔽電流との相互作用によって、トンネルコンダクタンスは Doppler shift と呼ばれる $\Delta E = \pm e\mathbf{v}_F \cdot \mathbf{A}$ のエネルギーシフトを起こし、ZBCP が分裂する[3]。現在までに $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 等を用いて Doppler shift の実験が行われてきているが[4-6]、それぞれの実験における Doppler shift による ZBCP の分裂幅は大きく異なっており、系統性のある結果は得られていないことが問題となってきた。

そこで本研究では、実験における磁場応答のばらつきの起源は、磁場印可時のベクトルポテンシャルのサンプルの形状に対する依存性と考え、図のような薄膜状の形状の超伝導体に、 c 軸に平行に磁場をかけた場合の磁場応答のシミュレーションを行った。有限要素法により各接合面におけるベクトルポテンシャルの場所依存性を求め、磁場下のコンダクタンスの計算を行った。その結果、超伝導体の端の D の位置では、A の位置と比較して、ZBCP の分裂がほとんど見られなかったなど、強い場所依存性が得られた。発表では、ZBCP の Doppler shift の接合形状依存性の影響について詳しく議論する。

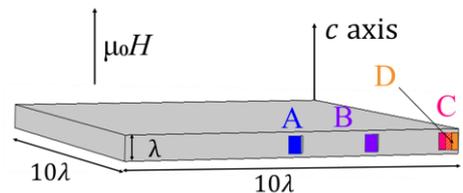


図 計算に用いた超伝導体接合形状、A~D に接合面を形成しているとした。

- [1] Y. Tanaka and S. Kashiwaya, Phys. Rev. Lett. 74, 3451 (1995).
- [2] S. Kashiwaya and Y. Tanaka, Rep. Prog. Phys. 63, 1641 (2000).
- [3] M. Fogelström, et al., Phys. Rev. Lett. 79, 281 (1997).
- [4] M. Covington, et al., Phys. Rev. Lett. 79, 277 (1997).
- [5] H. Kashiwaya et al., Phys. Rev. B. 70, 094501 (2004).
- [6] O. Millo and G. Koren, Phil. Trans. R. Soc. A. 376 20140143 (2018).

カゴメ金属のループカレント相における実空間電流分布

名大理^A, 京大基研^B志村昂輝^A, 山川洋一^A, 田財里奈^B, 大成誠一郎^A, 紺谷浩^A

Real-space current distribution in kagome metals in charge loop current phase

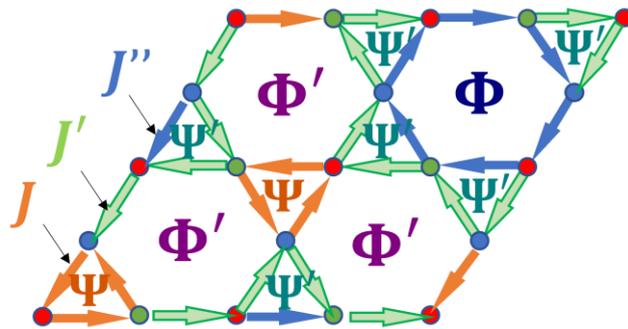
Dept. of Phys. Nagoya Univ.^A*Yukawa Institute for Theoretical Phys. Kyoto Univ.*^BK. Shimura^A, Y. Yamakawa^A, R. Tazai^B, S. Onari^A, and H. Kontani^A

カゴメ格子系は、隣接サイト間でスピンや電荷の安定した配置を一意に定められない幾何学的フラストレーションを持つため、現れる秩序相には未解明のものも多い。近年超伝導相の他に、飛び移り積分に変調が現れるボンド秩序(BO)や時間反転対称性の破れた(TRSB)相、回転対称性の破れたネマティック相などが報告されている。

特に長距離磁性秩序を伴わないにも関わらず TRSB が生じることについて、近年活発な議論が交わされている。TRSB の有力な起源として、格子間に閉じた電流がループ状に流れるループカレント(cLC)が提唱されている。実験的には、巨大異常ホール効果の観測や、 μ SR による局所磁化の検出[1]により、cLC の存在を示唆する証拠がいくつか提出されている。理論的にも cLC の秩序変数のサイト間分布が示されている[2]。

本研究では 3Q-cLC 下でのカゴメ金属内部の実空間電流分布構造を研究した。対称性の破れとして、3方向に等しい大きさの cLC 秩序変数を導入した2次元強束縛モデルを作成し、グリーン関数から電流を計算した。その結果、大きさの異なる 3 種類の電流が生じ、vHS 周辺で電流が極大になることが分かった。

更に cLC 相における電流が作り出す磁束について計算した結果、ループ状電流によって作られた局所磁場が、巨視的に打ち消さないことも示唆された。得られた結果と、カゴメ金属における軌道磁化計算[3]との対応も議論したい。



図：カゴメ金属内部の電流分布と、対応する磁束。

[1] C.Mielke et al., Nature, vol.602, 245(2022) [2]R. Tazai et. al, arxiv :2207.08068(2022) [3] R. Tazai et al., arXiv: 2303.00623(2022)

奇周波数電子対の物理

名古屋大大学院工学研究科^A 田仲 由喜夫^A

超伝導現象の発見以来、電子対の対称性を解明することは、重要な研究課題であった。通常は、スピン1重項偶パリティ（s波やd波）、スピン3重項奇パリティ（p波やf波）の対称性に分類されている、同時刻に電子対を形成しないという自由度まで許せば、スピン1重項奇パリティ、スピン3重項偶パリティといった電子対対称性が可能となる [1]。奇周波数電子対は最初超流動ヘリウム3の対称性として提案され[2]、様々な強相関係のモデルでの提案が行われたが[3]、バルクの一様な超伝導状態を記述するのは容易ではない[4]。他方、接合系や磁束系といった空間的に不均一な系では奇周波数電子対の振幅は局所的には零ではなくなり、特にトポロジカル超伝導と呼ばれる表面にエッジ状態（表面アンドレーエフ束縛状態）を有する超伝導体では、奇周波数電子対が表面で顕著に現れることが明らかになった[5-6]。また生成と消滅の区別できない特別な表面アンドレーエフ束縛状態であるマヨラナ準粒子は、必ず奇周波数ペアを伴うことも示されて、スペクトルバルク対応という関係も示された[7]。奇周波数電子対は様々な量子効果を引き起こし、異常近接効果[8]、パラマグネティックマイスナー効果[9]などが知られ、実験的にも観測されている[10,11]。これらの成果をまとめて発表する。

一方で、遍歴電子系と局在電子系の結合した系で、遍歴電子系の異常自己エネルギーとして、奇周波数電子対がペア密度波の形で現れることが明らかになっている。発表では、最近 Coleman Tsvelik らがスピン液体と遍歴電子系の結合した系で提案している奇周波数電子対と関連する話題も紹介する[12]。

[1]超伝導接合の物理 田仲由喜夫 名古屋大学出版会(2021年)

[2]V. L. Berezinskii. *JETP Lett.*, Vol. 20, 287, 1974.

[3]A. Balatsky and E. Abrahams. *Phys. Rev. B*, Vol. 45, 13125, 1992.

[4]Ya. V. Fominov, et al, *Phys. Rev. B*, Vol. 91, 144514, 2015.

[5]Y. Tanaka, Y. Tanuma, and A. A. Golubov. *Phys. Rev. B*, Vol. 76, 054522, 2007.

[6]Y. Tanaka, M. Sato, and N. Nagaosa. *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 81, 011013, 2012.

[7]S. Tamura, S. Hoshino, and Y. Tanaka. *Phys. Rev. B*, Vol. 99, p. 184512, 2019.

[8]Y. Tanaka and S. Kashiwaya. *Phys. Rev. B*, Vol. 70, 012507, 2004.

[9]S-I. Suzuki and Y. Asano. *Phys. Rev. B*, Vol. 89, 184508, 2014.

[10]J. A. Krieger, et al, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 125, 026802, 2020.

[11]S-P. Chiu et al, *Science Advances* Vol. 7, eabg6569, 2021.

[12]P. Coleman, A. Panigrahi, and A. Tsvelik, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 129 177601 (2022).

多層ペンローズ準結晶におけるワイル超伝導

サスカチュワン大 quanTA^A , 東理大理 B , 東理大先進工 C

堀真弘 A, B , 奥川亮 B, C , K. Tanaka A , 遠山貴巳 B, C

本発表では、二次元準結晶の典型例であるペンローズ準結晶(図 1 (a))が層状に積み上がった系(図 1 (b))におけるワイル超伝導に関して報告する。準結晶とは、周期性が無いにも関わらずブラッグピークを示し、長距離秩序の有る準周期構造を持つ物質群である。近年、ファンデルワールス力によって二次元準結晶が層状に積み上がった物質である Ta-Te 系二次元ファンデルワールス準結晶におけるバルクの超伝導が報告された[1]。このような準結晶が示す量子現象において、周期的な結晶との差異を明確に示すことは喫緊の課題である。

一方、近年の超伝導研究においては、系のトポロジーが非自明な場合についての考察に注目が集まっている。これまでに筆頭著者らは、二次元ペンローズ準結晶におけるトポロジカル超伝導を数値的に実証した[2,3]。先述の多層準結晶における超伝導の報告を受け、我々は多層ペンローズ準結晶(図 1 (b))におけるトポロジカル超伝導を考察することで、結晶との差異を明確に示すことができると考えた。具体的には、多層ペンローズ準結晶において s 波超伝導を仮定し、さらに外部磁場とスピン軌道相互作用、そして層間の電子ホッピングがある場合を考察した。

その結果、準周期系であるにも関わらず、ギャップレス超伝導の実現が確認された。さらに、積層方向の波数空間においてギャップレス点の間で系がトポロジカルに非自明となることが分かった。系がトポロジカルな場合には、系の表面にマヨラナ準粒子と呼ばれる特別な準粒子が現れることも確認した。なお、マヨラナ準粒子は自分自身が反粒子になっている準粒子であり、量子コンピュータへの応用が期待されている。加えて我々は、結晶で見られない準結晶特有の性質を明らかにするために、このマヨラナモードについてスペクトル関数を計算した。その結果、積層方向の波数空間に沿って、フェルミアークのようなものが無数に走ることが明らかとなった。このアークは、準結晶面内方向の波数に関して、準結晶を特徴付ける無理数を稠密に埋め尽くしていることが確認された。

本研究の成果は、結晶におけるワイル超伝導の対応物を準結晶において発見し、そこに準結晶特有の性質を明確に見出したという点で重要である。

[1] Y. Tokumoto *et al.*, 27th Quasicrystals meeting, March 2023.

[2] M. Hori, R. Ghadimi, T. Sugimoto, T. Tohyama,
and K. Tanaka, JPS Conf. Proc. **38**, 011065 (2023).

[3] M. Hori, R. Ghadimi, T. Sugimoto, T. Tohyama,
and K. Tanaka, JPS Conf. Proc. **38**, 011062 (2023).

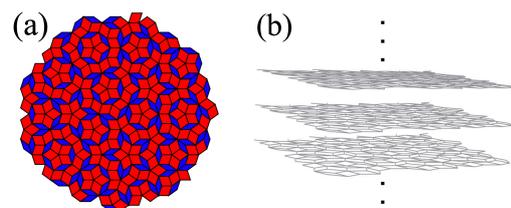


図 1 :

(a) ペンローズ準結晶

(b) 多層ペンローズ準結晶

空間反転対称性の破れた超伝導体に特有な光学活性の性質

京大理

品田 晃希, Robert Peters

超伝導体における光学応答を用いた研究は古くから行われており、Glover と Tinkham 等による遠赤外光を用いた超伝導ギャップの観測まで遡る[1]。光学応答を測定することで、超伝導ギャップの大きさに限らず、超流動密度や磁場侵入長の見積もりにも使うことができ、比較的大きな超伝導ギャップを持つ高温超伝導体を中心に計測が行われてきた。近年ではより低周波数のテラヘルツ帯での観測が可能になったこともあり、超伝導体における光学応答の研究はその裾野を広げ、第三次高調波発生による Higgs モードの観測[2]や、空間反転対称性の破れた系で現れる非線形応答の研究[3]などが行われている。

本発表では、光学応答の中でも空間反転対称性の欠如した系で現れる光学活性に注目する。光学活性は物質の対称性に応じて光の旋光や二色性をもたらす。また光学活性は時間反転対称性(TRS)の有無に応じて2種類存在する。反強磁性体などの TRS を破った系では光学磁気電気効果(OME)による方向二色性などが起こり得て[4]、最近では電気マグノン由来の OME の観測や反強磁性ドメインのイメージングなどと研究が進んでいる。一方 TRS がある場合は、円二色性や旋光性といった自然光学活性が起こり得て、古くからはカイラル物質の鏡像異性体の判別などに使われている[5]。

我々は、このような光学活性に対して超伝導体を舞台に基本的な性質の考察を行った[6]。本発表では特に、光学活性の総和則及び空間反転対称性の破れた超伝導での特有な性質について議論する。また、総和則の帰結として光学活性のスペクトルから超伝導エーデルシュタイン効果(SEE)を厳密に見積もることができることを議論する。SEE は提唱以来[7]、実験的に観測された報告は未だない。我々の結果は光学活性を用いた厳密な見積もりにより SEE 観測の代替手法を提供することを意味する。

[1] R. E. Glover and M. Tinkham, *Phys. Rev.* **104**, 844 (1956)

[2] R. Shimano and N. Tsuji, *Annual Review of Condensed Matter Physics* **11**, 103–124 (2020)

[3] H. Watanabe, A. Daido and Y. Yanase, *Phys. Rev. B* **105**, 024308 (2022)

[4] T. Arima, *Journal of Physics: Condensed Matter* **20**, 434211 (2008)

[5] J.-i. Kishine, H. Kusunose, and H. M. Yamamoto, *Israel Journal of Chemistry* **62**, e202200049 (2022)

[6] K. Shinada and R. Peters, in preparation

[7] V. M. Edelstein, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 2004 (1995)

Majorana fermions and odd frequency pairing in Floquet superconductors

Nagoya University, Japan^A, Uppsala University, Sweden^B
 E. Ahmed^A, S. Tamura^A, Y. Tanaka^A, J. Cayao^B

Time-periodic (Floquet) Hamiltonians offer a unique and tunable way to engineer topological systems with intriguing edge modes. In particular, Floquet superconductors can possess multi-Majorana edge modes at zero and pi energies.

It is well-established that there is a direct relationship between odd-frequency Cooper pairing amplitudes and the topological invariants in the static superconductors. In our study, we discuss this relationship in the time-periodic regime.

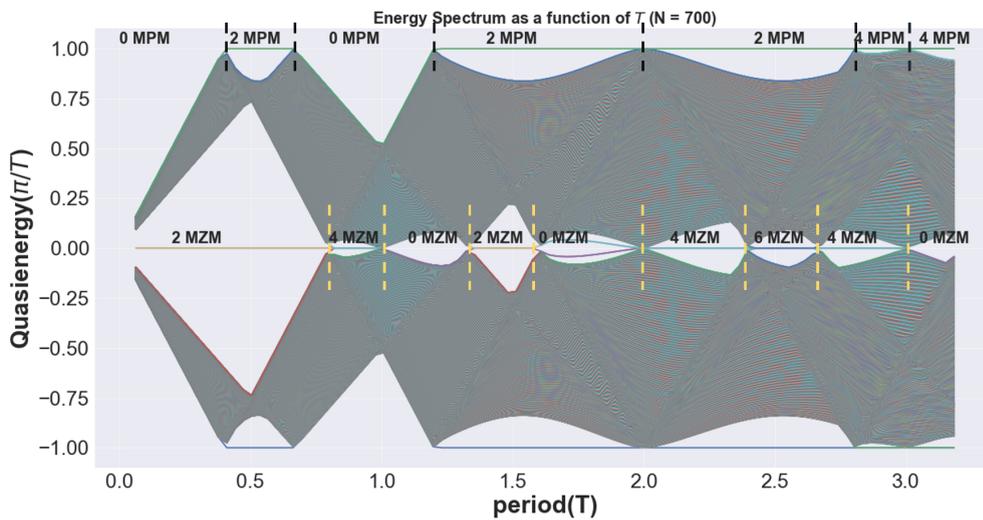


Figure 1: quasienergy spectrum of the time-periodic Kitaev chain

We consider a Kitaev chain alternating in time between two different values for chemical potential. By tuning the time-periodicity of the alternating chemical potential, we show that the chain admits multiple zero and pi energy Majorana modes at the edge of the chain (Fig 1). Furthermore, We show that odd-frequency Cooper pairing amplitude at the surface of the chain is correlated to the presence of Zero and pi Majorana modes(Fig 2).

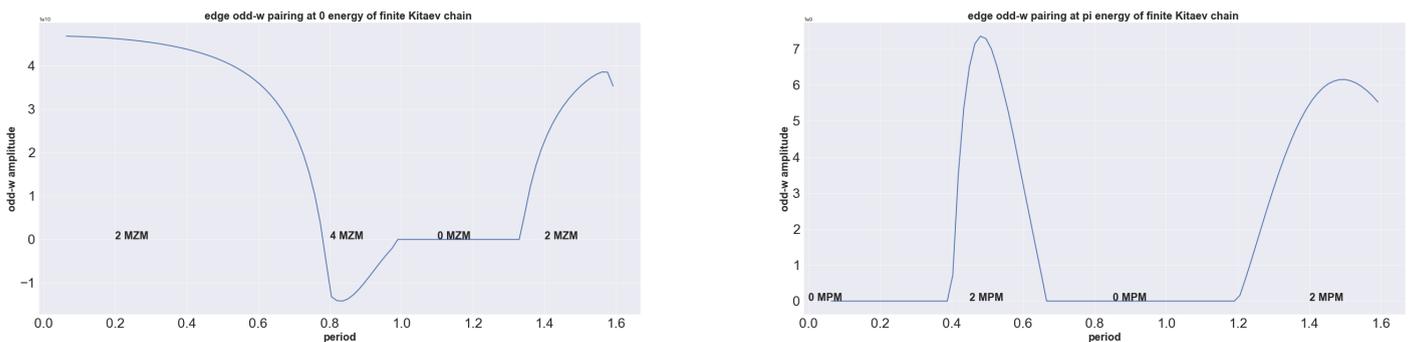


Figure 2: Odd frequency pairing amplitude at energy = 0, pi as a function of period

ランダウ準位分光による LaTe_3 のバンド構造の観測

沖縄科学技術大学院大学

中村友謙、友田七海、T. J. Hasiweder、藤澤唯太、岡田佳憲

ランタノイド三テルル化物 LnTe_3 は同じ対称性の結晶構造を持ち、240-650 K という高い温度領域で電荷密度波(CDW)転移する層状物質である。加えて、ランタノイドの中でも原子番号の大きいランタノイドの三テルル化物では、より低温で新たな CDW 転移を起こすことが知られている[1-4]。しかし、この二つ目の CDW 転移が原子番号の小さいランタノイドでなぜ起こらないかはよく理解されておらず、原子番号の小さい LaTe_3 のバンド構造に関する研究は少ない。

そこで我々は二つ目の CDW 転移を示さない LaTe_3 のうち、磁性を持たない LaTe_3 に着目し、エネルギーバンドの構造を調べた。走査トンネル顕微鏡を用いた強磁場下でのランダウ準位分光により、フェルミ準位近傍で異なる磁場依存性をもつ二種類のランダウ準位が観察された。磁場依存性が互いに逆向きであることから、二種類のランダウ準位は電子的なバンドとホール的なバンドに由来し、 LaTe_3 は同程度の大きさの電子的なフェルミ面とホール的なフェルミ面を持つことが明らかになった。また、観測されたランダウ準位からエネルギーバンドを再構成したところ、電子的なエネルギーバンドにおいて、フェルミ準位から ± 10 meV 程度のエネルギーにキック構造が見いだされた。これらは、今まで LaTe_3 では見出されてこなかった、新しいネスティングによる新たなフェルミ面不安定性の証拠である。

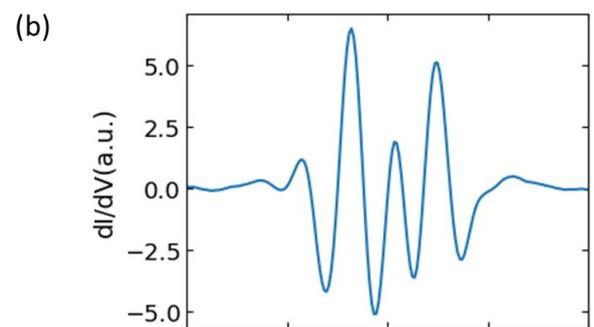
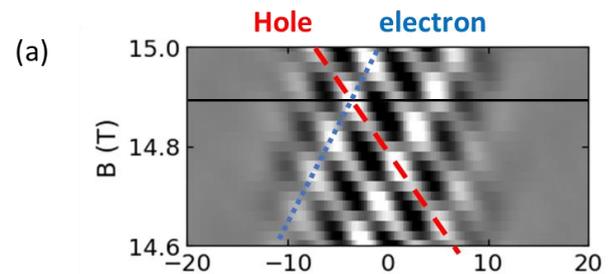
講演ではフェルミ面の大きさや、有効質量などについても議論する。

[1] C. D. Malliakas and M. G. Kanatzidis, *J. Am. Chem. Soc.* **128**, 12612–12613 (2006).

[2] N. Ru, *et al.*, *Phys. Rev. B* **77**, 035114 (2008).

[3] B. F. Hu, *et al.*, *Phys. Rev. B* **90**, 085105 (2014).

[4] A. Kogar, *et al.*, *Nat. Phys.* **16.2**, 159-163 (2020).



(a) 各磁場における dI/dV スペクトルを $E - E_F$ (meV) 二階微分の二次元プロット

(b) Fig.1(a)の黒線($B = 14.9$ T)における dI/dV スペクトルの二階微分

多端子常伝導-超伝導接合系におけるスピン3重項超伝導体の電流

ノイズの理論的研究

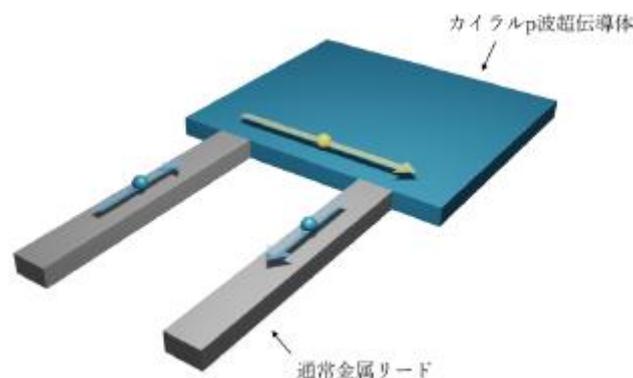
名古屋大学工

片山 怜央, 池谷 聡, 田仲 由喜夫

スピン3重項超伝導体にはその秩序変数の対称性に応じてカイラル型、ヘリカル型、フラット型など多様な Majorana 表面束縛状態が存在する。これまで磁場やスピン流、熱流などを用いてこれらの秩序変数の対称性を同定する試みがなされてきた。本研究では、物性物理の分野で多くの研究がなされてきた電気伝導特性のみを用いて Majorana 表面束縛状態の形態を同定する手法を提案する。

はじめに、Majorana表面束縛状態をもつトポロジカル超伝導体では、通常の常伝導/超伝導接合系に見られる Andreev 反射とは異なる、特殊な散乱過程が存在することを示す。より具体的には、金属側から入射された電子が界面で Majorana 準粒子に変換され超伝導体側に侵入するような散乱過程（電子 - Majorana 準粒子トンネル）が、接合界面の透過率が低い極限で支配的になり得ることを明らかにする。

次に、超伝導体に2つの通常金属導線を接合した系において、金属導線間の非局所的な電気伝導特性を測定することにより Majorana 表面束縛状態の形態を同定する。2つの金属導線間を流れる非局所電流は、電子-Majorana 準粒子トンネルを介して流れる。そのためトポロジカル超伝導体に存在する Majorana 表面束縛状態が、散乱過程に劇的な影響を与える。特に、非局所電流ノイズに着目することで、Majorana 表面束縛状態の形態を決定的に同定することが可能であることを示す。



強相関 BEDT-TTF 塩の引張歪による物性探索

名大院工^A, 分子研^B

伊東裕^A, 田中文也^A, 馬場勇佑^A, 竹延大志^A, 山本浩史^B

剥片状結晶を貼り付けた基板を湾曲させる図1のような歪み導入法が、原子層材料や有機導体の対称性やバンド構造の制御技術として注目されている。この手法では、静水圧やエポキシ樹脂による一軸性圧縮下では困難であった引張歪下の測定が簡単にできる利点がある。加えて、トランジスタによるキャリアドーピングなどとの併用が可能であり、有機導体の新しい実験プラットフォームとして有効である[1]。本研究では、超伝導転移温度 T_c が低く、モット絶縁体 κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Cl の压力下測定を元に作られた相図 (図2) の高圧側に位置するとされてきた有機超伝導体 β -(BEDT-TTF)₂I₃ および κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂ に本手法を導入し、歪印加の検証と相図上の位置関係の解明を試みた。

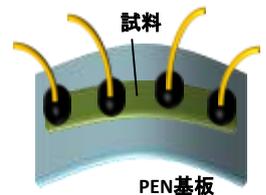
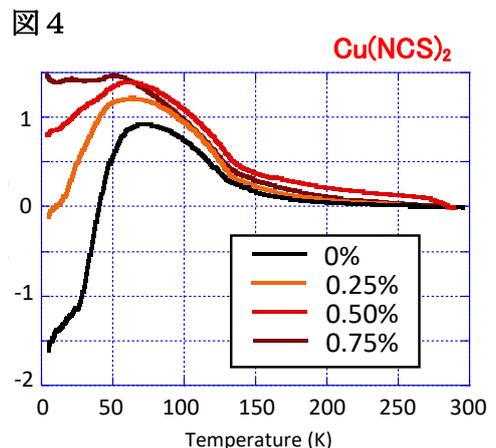
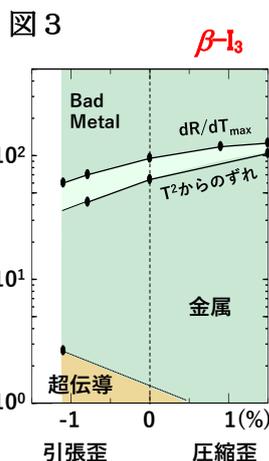
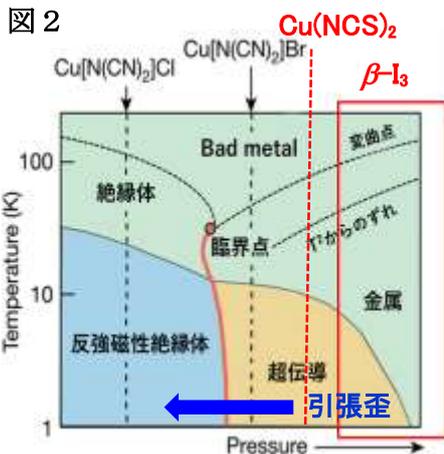


図1

まず β -(BEDT-TTF)₂I₃ について、試料を貼り付けたポリエチレンナフタレート (PEN) 基板を凹面に (圧縮歪)、あるいは凸面に (引張歪) 湾曲させ試料に歪みを印加した。基板上で試料が滑ることなく歪が加わっているかを I₃ イオンの伸縮振動ラマンモードの変化により検証した。室温で a+b 軸方向に 1% 程度歪を印加した状態で電気抵抗の温度変化 $R(T)$ を測定した結果、図3に示すよう Bad metal 相へのクロスオーバーを示す dR/dT の極大と $R(T)$ が T^2 からずれ始める温度が圧縮歪では高温側に、引張歪では低温側にシフトする振る舞いを観測した。これらは図2の相図の高圧側につながる振る舞いを示していると理解できる。

次に、 β -(BEDT-TTF)₂I₃ より絶縁相に近いと考えられてきた κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂ を取り上げ、b 軸方向に引張歪を加えた状態で $R(T)$ を測定した。図4に示すように、0.75% の引張歪の印加で 90K 以下の金属的な伝導が抑えられ、 κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂ のように常圧では絶縁相が見られない物質においても、引張歪の印加により金属絶縁体転移の境界領域にアクセスできることがわかった。

[1] M. Suda, H. M. Yamamoto, Phys. Chem. Chem. Phys. 20 (2018) 1321.



カイラルフォノンによる軌道間相互作用の変調

東京大学大学院工学系研究科物理工^A
大村 哲士^A, 北村 想太^A, 森本 高裕^A

固体中の原子変位を時間平均したとき、その正味の角運動量は磁場と結合し、そのような変位のダイナミクスはカイラルフォノンと呼ばれる。磁気モーメントへの寄与は、古典的なバーネット効果に相当するものだけでなく、断熱近似を通じて電子バンドのトポロジカルな性質にも由来することが知られている。その顕著な例として、ヒ化カドミウムにテラヘルツ帯の円偏光を照射することで、磁気回転比が原子質量から計算されるその数千倍にもなることが計算・実証されている^[1,2]。

一方、 LaMnO_3 等の物質における電子間にはスピンと軌道の両方に依存した相互作用が働き、その基底状態については多くの知見が蓄えられている。ここで、軌道自由度はヤーン・テラー効果を通じて格子変形と結合するが、外部磁場とは結合しない。しかし、カイラルフォノンと組み合わせることで、軌道間相互作用の結合定数が外部磁場に依存したり、既存のものとは異なる対称性を持つ相互作用が出現したりすることが考えられる。このような円偏光等を用いて誘起されると期待される新たなスピン軌道状態について、現状の計算結果を報告する。

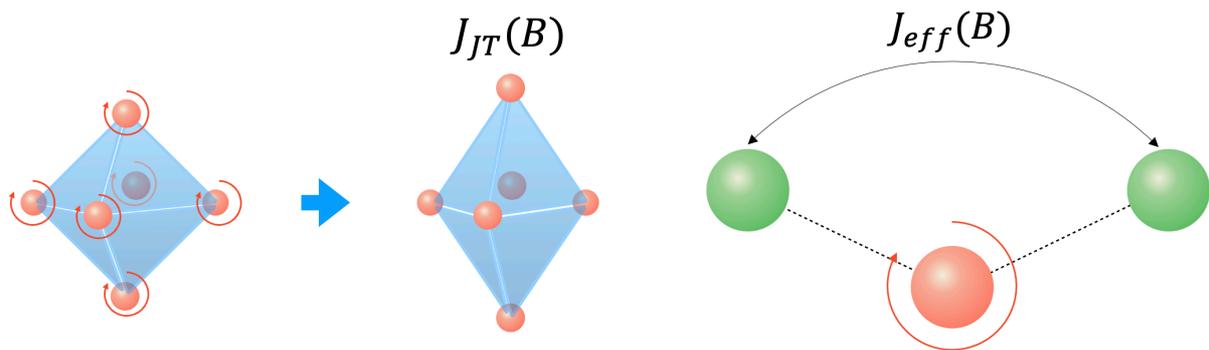


図: カイラルフォノンによる (左) ヤーンテラー効果の変更と、(右) 超交換相互作用の変更を表す模式絵。

参考文献:

- [1] Y. Ren *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 186403 (2021).
- [2] B. Cheng *et al.*, Nano Lett. **20**, 5991 (2020).

磁場下における超伝導非線形光学応答

京大理^A, 東大先端研^B
田中大登^A, 渡邊光^B, 柳瀬陽一^A

空間反転対称性のない系での物理現象について精力的に研究が進められているが、その中でも非相反応答現象は中心的な研究分野の一つである。電気伝導特性に方向性が現れる整流効果などはその代表的な応答である[1]。空間反転対称性を持たない超伝導体では、超伝導性に関連した特異な電磁気学的性質により多彩な非相反応答が引き起こされる。例えば、超伝導揺らぎ[2]や量子渦の運動[3]が引き起こす巨大な磁気カイラル異方性や、臨界電流に方向性が現れる超伝導ダイオード効果[4]などの非相反現象が報告されている。

整流効果や磁気カイラル異方性など非相反応答においては非線形伝導度が鍵となる。近年 Bogoliubov-de Gennes ハミルトニアンに基づく超伝導体の2次の非線形伝導度の定式化がされた[5]。更に時間反転対称性のある標準的なモデルについて、超伝導秩序に由来した2次の非線形応答とその発現条件が明らかにされている[6]。

空間反転対称性の破れはしばしば時間反転対称性の破れと協働して、時間反転対称性を持つ系のそれとは定性的に異なる現象を誘起する。これは非線形伝導度においても同様に期待できるものの、時間反転対称性を持たない系、特に磁場下にある超伝導体の非線形応答は明らかにされていない。

本研究では、Bogoliubov-de Gennes ハミルトニアンでの定式化の下、磁場下における2次元超伝導体の2次の非線形光学伝導度を調べた。ここでは磁場をゼーマン効果として取り入れた。標準的なs波超伝導において磁場の効果により超伝導非線形応答が有限になることを示す。また、非線形伝導度の磁場依存性、化学ポテンシャル依存性を示す。我々が同定したある成分が低キャリア領域において超伝導非線形応答に主要な寄与を与え、また特徴的な磁場依存性を示すことを報告する。

- [1] T. Ideue *et al.*, *Nat. Phys.* **13**, 578 (2017).
- [2] R. Wakatsuki *et al.*, *Sci. Adv.* **3**, e1602390 (2017).
- [3] T. Ideue *et al.*, *Phys. Rev. Res.* **2**, 042046(R) (2020).
- [4] F. Ando *et al.*, *Nature* **584**, 373 (2020).
- [5] H. Watanabe *et al.*, *Phys. Rev. B* **105**, 024308 (2022).
- [6] H. Tanaka *et al.*, *Phys. Rev. B* **107**, 024513 (2023).