

量子液晶の物性科学

News Letter Vol.10

2024 年 2 月 発行

目次

1. 巻頭言 ~5 年を振り返って~	芝内孝禎 1
2. 研究ハイライト	
●A01 量子液晶物質の開発	
蜂の巣格子系 $\text{Ru}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ における金属絶縁体転移	大串研也 2
アンチペロブスカイト型遷移金属ニクタイトにおける新超伝導体探索	永崎洋 3
新しい d 電子系超伝導体の開拓	岡本佳比古 4
フェロアキシャル物質の開拓	木村剛 5
原子のネットワークに着目した新超伝導体の開発	工藤一貴 6
電荷転移に起因する巨大熱量効果の発見	島川祐一 7
フォノンを通して観るパイ電子集団の電荷/スピン自由度	佐々木孝彦 8
スピン軌道相互作用に由来するスピン液晶相の物性解明と物質開発	平井大悟郎 9
Towards spiral magnetism in two-dimensional metals	Max Hirschberger 10
高品質 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 薄膜の作製と磁気基底状態の制御	打田正輝 11
液晶を用いたナノシート合成	内田幸明 12
界面に誘起されるトポロジカル磁気構造の微視的機構解明	松野丈夫 13
固体中の核生成-核成長によるスローダイナミクス	勝藤拓郎 14
●B01 量子液晶の精密制御	
分光イメージング走査型トンネル顕微鏡で見た量子液晶	花栗哲郎 15
精密バルク物性測定による量子液晶の探索と今後の展望	笠原成 16
中性子散乱による量子液晶探索	佐藤卓 17
鉄系超伝導体における量子液晶ゆらぎによる電子対形成	芝内孝禎 18
未知の素粒子を生み出す量子物質の探索	清水康弘 19
高強度テラヘルツ分光技術が拓く非平衡量子系の物質科学	廣理英基 20
時間分解 X 線測定の開発と量子液晶のダイナミクス観測への応用	和達大樹 21
NMR 測定を用いたカゴメ遍歴磁性体 $\text{Sc}_3\text{Mn}_3\text{Al}_7\text{Si}_5$ の基底電子状態の解明	井原慶彦 22
FeSe 超伝導体における非相反伝導現象	塩見雄毅 23
n 電子の量子液晶を求めて	今城周作 24
分子自由度をもつ量子磁性体の強磁場誘起相の開拓	石川孟 25

量子液晶の示す対称性破れ現象を光技術でとらえることができるか?	米澤進吾 26
量子スピン液体における回転対称性の破れとトポロジカル相転移	末次祥大 27
3色超格子における超伝導ダイオード効果の探索	浅場智也 28
電子ネマティック状態のドメイン構造の観測：異方性から生まれた縞模様	中島正道 29
スピン三重項超伝導状態における電子対液晶状態の磁場による制御	鄭国慶 30
希土類化合物における量子液晶の発現と「悪魔の階段」へ導く機能性の解明	黒田健太 31
磁場中での鉄系超伝導体の層間抵抗測定	寺嶋太一 32
●C01 量子液晶の理論構築	
電荷液晶の発現機構と外場制御の理論	紺谷浩 33
異なる非一様電子分布間の相転移の発見	有田亮太郎 34
スピン由来の電気分極と電子カイラリティ	池田浩章 35
非平衡現象を介したスピン液晶・スピン液体・巨視的秩序の高速操作と特徴検出	佐藤正寛 36
強相関電子系におけるスピン流	遠山貴巳 37
From quantum liquid crystals to gravitational waves	Nic Shannon 38
スピン液晶研究：Kitaev と Skyrme のはざままで	求幸年 39
時間・空間反転およびゲージ対称性の破れを伴う電子液晶相の研究	速水賢 40
スピン 1 量子磁性体におけるスピン液晶(一般化磁気)スキルミオンの開拓	赤城裕 41
キラル古典異方粒子系におけるトポロジカル相の制御	川崎猛史 42
空間反転対称性の破れた超伝導体のエキゾチック超伝導と非相反応答	大同暁人 43
光渦で探る超伝導ヒッグスモード	水島健 44
●D01 量子液晶の制御と機能	
超伝導量子渦の広視野イメージング	小林研介 45
複数変調ベクトルで記載される磁気配列	有馬孝尚 46
パルス電流を印可した磁性体のナノスケール磁気イメージング	石坂香子 47
量子液晶物質の光による物性制御に向けて	岡崎浩三 48
カイラル磁性研究	戸川欣彦 49
トポロジカル光波を用いた電荷液晶制御に向けて	戸田泰則 50
金属らせん磁性体におけるキラリティの制御・検出	小野瀬佳文 51
トポロジカルスピン液晶の創発的磁気光学応答	岡村嘉大 52
三角格子反強磁性体 Ag_2CrO_2 における巨大異常ホール効果	新見康洋 53
3. その他	
International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023) 開催報告	戸田泰則 54
The 14th APCTP Workshop on Multiferroics 開催報告	木村剛 61
「第 17 回物性科学領域横断研究会」開催報告	芝内孝禎 65
令和 5 年度領域研究会報告	木村剛 66
●若手海外派遣報告	
国際学会 Quantum Magnetism and Topology 2023 での講演	石川孟 69
バンクーバー滞在報告	六本木雅生、劉 蘇鵬 70
イタリア・フランス出張報告	石原滉大 71

●人事異動	72
●開催報告	75
●支援プログラムの紹介	77
●今後の予定	77
●編集後記	77



新学術領域研究 令和元年度～5年度

量子液晶の物性科学

Quantum Liquid Crystals

巻頭言 ～5 年を振り返って～

領域代表 芝内 孝禎 (東京大学大学院新領域創成科学研究科)

早いもので本新学術領域研究「量子液晶 Quantum Liquid Crystals (QLC)」は、今年度で 5 年間の研究期間を終了します。A01「量子液晶物質の開発」、B01「量子液晶の精密計測」、C01「量子液晶の理論構築」、D01「量子液晶の制御と機能」の研究手法別の 4 班構成で、計画研究 26 名、第 1 期公募研究 17 名、第 2 期公募研究 26 名、計 9 名の PD・特任研究員の参画により様々な研究成果が得られました。本ニュースレター Vol.10 では、現在の計画・公募研究のメンバーが、それぞれのグループにおける研究成果のハイライトをわかりやすく解説していただいております。対象物質は多岐にわたっており、様々な系で量子液晶に関連する多様な物理が生み出されております。これも関係者の皆さまの多大なご尽力によるものであり、心より感謝を申し上げます。これらは、今後の研究展開のシーズになるものもたくさん含んでおり、本研究分野の更なる発展を期待しております。

この 5 年を振り返ると、2020 年より始まった未曾有のパンデミックにより、多くの研究会が中止やオンライン化を余儀なくされましたが、リモートでの議論を容易にする様々なツールが導入されたことは大きなメリットと捉えることもできます。研究打ち合わせのための会合もオンライン化できたため移動時間等の節約が進んだことは、特に基礎研究をメインとしている本領域において、メンバーの独自の研究を遂行する時間の確保につながったと思います。これは、科学研究費が研究者の自由な発想に基づく研究を推進するためのものであることに鑑み、プラスとなった点だと考えます。

また、本領域では特に若手研究者の育成と国際化に重きを置いて総括班の運営を行ってまいりましたが、若手研究者の海外渡航が制限されたことは少し残念でありました。これを少しでも挽回するために、若手研究者支援として QLC 若手コロキウムという発表の場を半定期的に企画し、現在までに 36 名の若手研究者に講演していただいております。また、動画サイト「QLC チャンネル」<https://www.youtube.com/channel/UCT4ychc-2b0hflUtJPLIYNQ>では、積極的に若手研究者による解説ビデオを作成いただきました。この QLC チャンネルでは、現在までに 4 本の英語動画を含む計 43 本の動画を公開しており、視聴回数は合計 21,000 回を超えております。

さらに本 QLC 領域は、2022 年に Rutgers 大学の Piers Coleman らにより組織された国際スーパーネットワーク Quantum Materials Accelnet (QMAC) に参画しております (図 1 参照)。このプログラムは、Institute for Complex Adaptive Matter (ICAM) により運営されており、北米、ヨーロッパ、日本で行われている量子物質科学に関する 10 件のネットワーク研究を国際的に結び付け、国際交流を促進するもので、国際短期交流、ポスドク研究員の長期滞在などを支援するものです。実際に、この枠組みを用いた本領域関係者と海外研究グループとの共同研究がいくつかスタートしております。関係者の皆様におかれましては、本新学術領域研究期間終了後もこのようなプログラムを活用していただければと存じます。

最後に、本領域研究を推進するにあたり、事務局を務めていただいた東京大学工学系研究科の木村剛教授および秘書業務を担当していただいた東京大学新領域創成科学研究科の兼子芳枝特任専門職員には、大変お世話になりました。この場を借りて御礼申し上げます。量子液晶の物性科学研究はこれから花咲くものと信じております。関係者の皆様には、引き続き活発な議論をお願いできれば幸いです。



図 1: 本「量子液晶」領域が参加している、量子物質研究に関する国際スーパーネットワーク Quantum Materials Accelnet (QMAC)。詳細は ICAM の HP <https://www.icam-i2cam.org/accelnet> を参照してください。本領域 HP トップページにも図のパナーで示したリンクがございます。

領域 HP: <http://qlc.jp/>

蜂の巣格子系 $\text{Ru}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ における金属絶縁体転移

A01 班 大串 研也

金属絶縁体転移は、量子物質で普遍的に生じる現象です。電子は運動エネルギーとクーロン相互作用が拮抗した状況におかれており、その結果、わずかなパラメータの変化により金属と絶縁体の間で相転移が生じることになります。金属絶縁体転移の量子臨界性を微視的に理解することは、量子多体系分野の最重要課題に位置付けられて言うても良いでしょう。歴史的には銅酸化物超伝導体の発見以降、正方格子上の単一軌道ハバード模型が理論的に調べられてきました。しかしながら、金属絶縁体転移は本質的に一次転移的な性格を有することも指摘され、量子臨界性について統一的な見解が得られたとは言えない状況にありました。一方で、近年の大規模数値計算は、蜂の巣格子上の単一軌道ハバード模型において、金属絶縁体転移が二次で生じることを明らかにしました [1]。相転移が連続的に生じるため、量子臨界性をスケーリング理論に基づき正確に議論することが可能です。興味深いことに、量子臨界性は Gross-Neveu ユニバーサリティーに属し、金属相において絶縁体相に向けて繰り込み因子（電子のコヒーレンスの目安）が減少することが明らかにされました。しかしながら、理論との比較に適う物質は知られていませんでした。

私たちは、高圧合成法を駆使することで、蜂の巣格子をもつ新物質を開発してきました（高圧合成法の詳細については、QLC channel の動画をご覧ください [2]）。その過程で、キタエフスピン液体候補物質 RuCl_3 のアニオン置換系である、 RuBr_3 および RuI_3 の発見に成功しました [3]。これらの物質においては、いわゆる $J_{\text{eff}} = 1/2$ 状態が実現しており、電子状態は単一軌道ハバード模型で良く記述されるものと考えられます。興味深いことに、 RuBr_3 は絶縁体である一方で RuI_3 は金属であることが分かりました。従って、両者の混晶系 $\text{Ru}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ は、蜂の巣格子における金属絶縁体転移を調べる格好の系であると言えます [4]。

私たちの得た $\text{Ru}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ の電子相図（図 b）によると、絶縁体相には二つの反強磁性相（AFM-I と AFM-II）が存在する一方で、金属相には反強磁性相は存在しません。後者は、単一軌道ハバード模型に対する大規模数値計算の結果と合致します。また、金属相において Brinkman-Rice 型の有効質量増大が観測されており（図 d）、これは Gross-Neveu ユニバーサリティーにおける繰り込み因子の減少を捉えている可能性があることも分かりました。一方で、金属絶縁体転移は一次で生じており、理論との不整合も見られます。今後、私たちの開発した新物質を対象に様々な測定がなされることで、金属絶縁体転移の理解が進むことを期待しています。

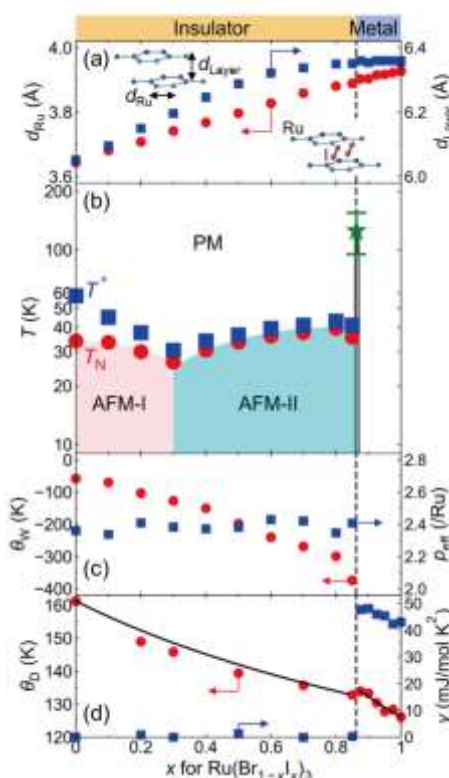


図: $\text{Ru}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ の、(a)格子定数、(b)電子相図、(c)磁気的性質、(d)比熱。

参考文献

- [1] Y. Otsuka, S. Yunoki, and S. Sorella, *Phys. Rev. X* **6**, 011029 (2016). H. Tang *et al.*, *Science* **361**, 570 (2018).
 [2] <https://www.youtube.com/watch?v=e11Wkjfp2qc>
 [3] K. Nawa, K. Ohgushi *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 123703 (2021). Y. Imai, K. Ohgushi *et al.*, *Phys. Rev. B* **105**, L041112 (2022).
 [4] F. Sato, K. Ohgushi *et al.*, *Phys. Rev. B*, **109**, 035154 (2024).

研究室 HP: <https://web.tohoku.ac.jp/mqp/>

アンチペロブスカイト型遷移金属ニクタイトにおける新超伝導体探索

A01 班 永崎 洋

遷移金属ニクタイトは鉄系化合物やカゴメ格子化合物などの新奇な超伝導体が存在する興味深い物質群であり、これまで量子液晶研究のためのプラットフォームを提供してきました。我々は、これまでに多様な結晶構造と構成元素の組合せが可能なアンチペロブスカイト AM_3X に着目して物質探索を行い、その結果、 $M = Pd$ の新規アンチペロブスカイト群 AM_3X ($A = La, Ca, Sr, Ba, Eu, X = P, As$) が存在することを発見しました。さらに、同物質を固溶体化すること、あるいは元素置換をすることで超伝導が出現することを明らかにしました[1-5]。

代表例として、 $CaPd_3P$ と $SrPd_3P$ の固溶体に関する結果を紹介します。図 1(a)に示すように、 $CaPd_3P$ と $SrPd_3P$ は両者とも非中心対称構造(NCS)の結晶構造を有していますが、その構造は異なっています。その固溶体となる $(Ca_{1-x}Sr_x)Pd_3P$ を合成したところ、中間組成領域で中心対称構造(CS)が現れ、同時に超伝導転移温度($T_c = 3.5$ K)が増強されることがわかりました [1,2]。バンド計算からは、この T_c 増強は、構造相転移に伴うフェルミエネルギーにおける状態密度の増大に起因することが示唆されました[3]。一方、 A サイトを La が占める $LaPd_3P$ は、やはり NCS 立方晶系の結晶構造 (図 1(b)) を有しますが、その $T_c (= 0.38$ K)は、バンド計算から導かれる $T_c (> 4$ K)よりも大幅に低いことがわかりました。この結果は、本物質が空間反転対称性の欠如に起因した非従来型超伝導体である可能性を示唆するものと考えています[5]。

これらアンチペロブスカイトにおける構造バリエーションは、 $Pd_6P(As)$ 八面体の歪みと $P(As)$ 原子の変位によるものであり、アンチペロブスカイトが結晶構造と超伝導性を制御するのに適した物質系である事を改めて示すものです。アンチペロブスカイト遷移金属ニクタイトには、まだ未知超伝導物質が残されていると期待されます。今後、より広範囲な物質探索とともに、より詳細な物性評価が望まれます。

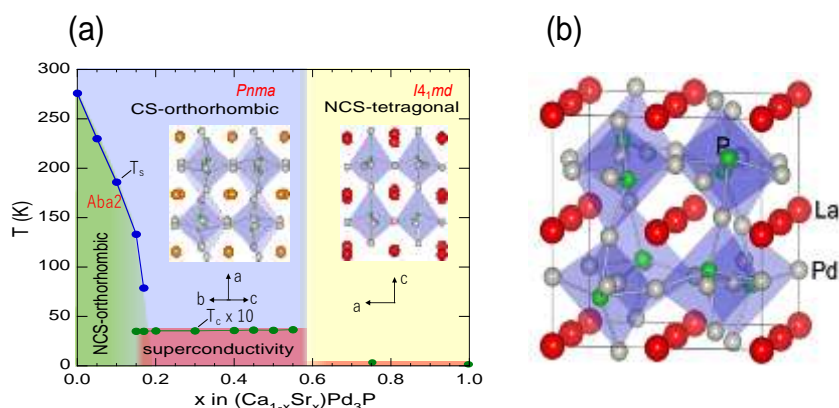


図 1 (a) $(Ca_{1-x}Sr_x)Pd_3P$ の相図. (b) $LaPd_3P$ の結晶構造($I-43m$).

参考文献

- [1] A. Iyo *et al*, *Inorg. Chem.*, **59**, 12397 (2020).
- [2] A. Iyo *et al*, *Inorg. Chem.*, **60**, 18017 (2021).
- [3] I. Hase *et al*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1975**, 012004 (2021).
- [4] A. Iyo *et al*, *Inorg. Chem.*, **61**, 12149 (2022).
- [5] A. Iyo *et al*, *Phys. Rev. Materials* **3**, 124802 (2019).

研究室 HP: <https://unit.aist.go.jp/riaep/super-el/index.html>

新しい d 電子系超伝導体の開拓

A01 班 岡本 佳比古

本新学術領域において、私の役割は量子液晶の解明に繋がるような新しい候補物質を開拓することでした。本領域の目的は、磁性、強相関、超伝導といったさまざまな電子の性質が液晶的にふるまう状態を量子液晶として統一的に解釈することにより新しい物理を拓くことと理解しており、それに資するような幅広い量子液晶候補物質の開拓を目指したのですが、自身の 5 年間の成果は少し超伝導に偏りすぎたとも感じています。それでも、磁性や強相関の源泉でもある d 電子が活躍し、ユニークな特徴をもつ新超伝導体群を見出すことができましたので、以下に紹介します。

ある物体の電気抵抗が低温で完全にゼロになる超伝導と、物質の磁石としての性質である磁性には一筋縄ではいかない関係があります。一般に、強い磁性が働くと超伝導は壊されるため、鉄やコバルトといった磁性元素を含む物質において超伝導が現れることは多くありません。しかし、そのような磁性元素を含む物質ではごくまれに、通常の物質では決して現れない高温における超伝導や、既存の理論では説明できない変わった性質をもつ超伝導が現れることがあり、その背後では電子が形成する液晶的な状態が重要な役割を担っていることが明らかになってきました。このような超伝導と磁性の複雑な関係を解明することは、例えば室温超伝導の実現にとっても重要と思われませんが、未だに達成されていません。これまでにない特徴をもつ新超伝導体の発見が、その解明にとって必要不可欠と考えられます。

我々は、スカンジウム (Sc)、テルル (Te) と、ある磁性元素 (M と記す) からなる物質 Sc_6MTe_2 が、さまざまな磁性元素の場合に超伝導を示すことを発見しました[1]。この新超伝導体ファミリーの特徴は、鉄、コバルト、ニッケルといった 7 種類もの磁性元素 M の場合に超伝導となることにあります。磁性元素の種類によって超伝導の性質は変化し、鉄の場合に最も高い超伝導転移温度 $T_c = 4.7 \text{ K}$ で超伝導を示しました。同じ結晶構造をもつ親戚の物質でありながら、このようにさまざまな磁性元素をもつ物質において超伝導が現れる例は過去にほとんど知られていません。また、下図に示した結晶構造から見てとれるように、紙面の奥に向かって一直線に並んだ磁性元素 M が Sc 原子に取り囲まれ、さらに Te 原子に取り囲まれた、いわば細巻きのような三層構造の原子配列をとっていることも Sc_6MTe_2 の特徴です。現状では上図に示したような多結晶試料を用いた研究に留まっていますが、今後純良な単結晶試料を合成し、超伝導の性質をより正確に明らかにすることが期待されます。また、 Zr_6MTe_2 など、関連する物質系においても新超伝導体が見つかりつつあります[2]。今後、この物質系から思いもよらない新しい d 電子系超伝導体が発見されることも期待しています。

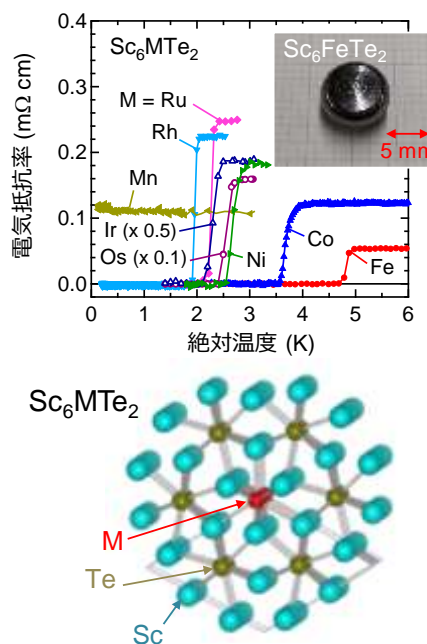


図. 上: Sc_6MTe_2 多結晶試料の電気抵抗率.
下: Sc_6MTe_2 の結晶構造

参考文献

- [1] Y. Shinoda, Y. Okamoto, Y. Yamakawa, H. Matsumoto, D. Hirai, and K. Takenaka, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 103701 (2023). [DOI: 10.7566/JPSJ.92.103701]
[2] H. Matsumoto, Y. Yamakawa, R. Okuma, D. Nishio-Hamane, and Y. Okamoto, submitted.

研究室 HP: <https://yokamoto.issp.u-tokyo.ac.jp/index.html>

岡本佳比古 (東京大学・物性研究所・教授)

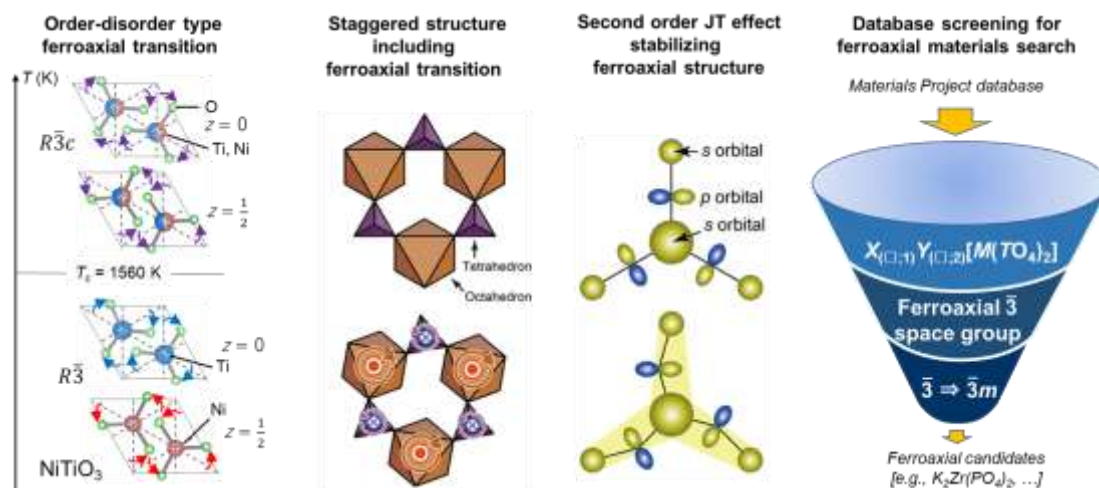
フェロアキシャル物質の開拓

A01 班 木村 剛

「フェロアキシャル秩序(ferroaxial order)」と呼ばれる軸性ベクトル対称性を伴う回転構造の歪みに特徴づけられた秩序状態が、近年注目を集め始めています。本研究開始当初は、この用語はほとんど知られていませんでしたが、ここ数年の間に強弾性、強誘電性、強磁性など従来から知られたフェロイック秩序に加わる新たなフェロイック秩序としての興味や、電場誘起キラリティおよび外場に対する横応答などの特異な物性現象の発現が期待できることから、新たな物性・機能の舞台として関心が高まっています。我々のグループでは、フェロアキシャル秩序を有する物質の探索およびフェロアキシャル秩序に特有な物性現象の開拓を図ってきました。研究開始当初、非フェロアキシャル相からフェロアキシャル相への転移（いわゆるフェロアキシャル転移）を示す物質は数えるほどしか報告されておらず、フェロアキシャル物質の探索に関する体系的な研究はほとんど行われていませんでした。

そこで我々は、以下に記すいくつかのアプローチによりフェロアキシャル物質を探索するための方策を提示し、実際にこれらの方策を適用することで新たなフェロアキシャル物質の開拓を進めてきました。(i) イルメナイト構造を有する NiTiO_3 が秩序-無秩序型のフェロアキシャル転移を示すことを提案し、強誘電秩序と同様にフェロアキシャル秩序においても変位型に加えて秩序-無秩序型の相転移を示す物質もあることを明らかにしました[1]。(ii) フェロアキシャル秩序を実現するためのガイドラインとして、staggered 構造を内包する結晶構造の必要性および電子バンド構造に拡張された二次の Jahn-Teller 効果(SOJT)の重要性について提案し、例として Na 超イオン伝導体である $\text{NaM}_2(\text{PO}_4)_3$ および $(\text{Na,K})_2\text{Hf}(\text{BO}_3)_2$ に適用し、バンド計算により SOJT 活性な物質でのみフェロアキシャル転移が発現することを明らかにしました[2,3]。(iii)フェロアキシャル物質探索にデータベーススクリーニングとフォノン計算のアプローチを適用しました。その結果、スクリーニングにより化学式が $X_{(\square;1)}Y_{(\square;2)}[M(\text{TO}_4)_2]$ で表される glaserite 型化合物がフェロアキシャル物質の有力な候補となりうることを提示し、そのうち $\text{K}_2\text{Zr}(\text{PO}_4)_2$ がフォノン計算および実験によりフェロアキシャル転移を示すことを実証しました[4]。

以上のとおり、本研究により新規物性・機能の舞台として期待されるフェロアキシャル物質に関するいくつかの物質設計・探索指針を提示し、新たなフェロアキシャル物質の実現に至りました。



参考文献

- [1] T. Hayashida *et al.* *Nat. Commun.* **11**, 4582 (2020) [<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18408-6>].
 [2] T. Nagai *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **145**, 8090 (2023) [<https://doi.org/10.1021/jacs.3c00797>].
 [3] S. Yamagishi *et al.*, *Chem. Mater.* **35**, 747 (2023) [<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.2c03540>].
 [4] T. Nagai and T. Kimura, *Chem. Mater.* **35**, 4109 (2023) [<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c00624>].

研究室 HP: <http://crystal.k.u-tokyo.ac.jp/hp/>

原子のネットワークに着目した新超伝導体の開発

A01 班 工藤 一貴

超伝導状態では、電子が2つずつペアを作ります。その際、1つの電子に対してもう1つの電子がどこにいるかによって、色々な超伝導状態を考えることができます。したがって、超伝導は、物質中の原子の並び方に依存して様々な姿を見せることになり、例えば、原子が正方形のネットワークを組む場合と、三角形のネットワークを組む場合では、異なる超伝導電子ペアを期待することが可能です。有名な銅酸化物超伝導体や鉄系超伝導体は、正方形のネットワークを持っています。私たちは、新たな超伝導状態を探索する舞台を見つけるために、三角形、ハニカム、カゴメネットワーク (図 1) を持つ物質の開発を進めました。その結果、以下のような興味深い研究の舞台を発見することができました。

Pt の三角形ネットワークを持つ新超伝導体 $Pt_{1-x}Bi_x$ [1] と $Pt(Bi_{1-x}Ch_x)_2$ ($Ch = Se, Te$) [2] を見つけました。 これらの化合物は、化学組成を変化させることで、上下に区別がある極性構造と上下に区別がない非極性構造の間を行き来します。その間で、超伝導転移温度 T_c が 0.6 K から 2.4 K に上昇することが分かりました。そこから、今後、 T_c を高める因子を抽出できる可能性があります。

Pt と As/Sb から成るハニカムネットワークを持つ超伝導体 BaPtAs、BaPtSb において、非従来型超伝導の発現を示唆する実験結果を得ました[3]。 BaPt($As_{1-x}Sb_x$)は、As と Sb の割合を変えると T_c が非単調に変化します。そのとき、電子比熱係数とデバイ温度はほとんど変化しません。これらは、この系の超伝導が電子-フォノン相互作用に基づく従来型のメカニズムでは説明できないことを示しています[3]。BaPtSb では、さらに、時間反転対称性を破るカイラル超伝導の発現を示唆する実験結果を得ました[4]。

Ir のカゴメネットワークを持つ新超伝導体 Mg_2Ir_3Si [5] と $Mg_2Ir_{2.5}Ge_{1.7}$ [6] を見つけました。 前者では、Mg サイトの化学置換によって Ir と Si の位置が入れ替わり、超伝導特性が著しく向上します。今後、それらの位置を制御するパラメータを見つけることができれば、新たな超伝導体の探索につながります。

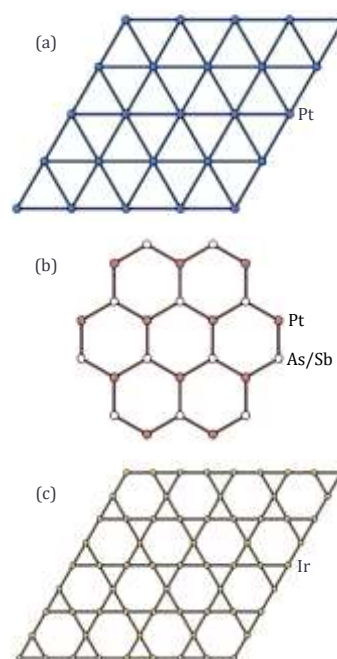


図 1: (a) 三角形、(b) ハニカム、(c) カゴメネットワーク。

参考文献

- [1] K. Kudo, H. Y. Nguyen, C.-g. Oh, K. Takaki, and M. Nohara, *Journal of the Physical Society of Japan* **90**, 063706 (2021) [https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.063706].
- [2] K. Takaki, M. Yamamoto, M. Nakajima, T. Takeuchi, H. Y. Nguyen, M. Nohara, Y. Kishioji, T. Fujii, K. Yoshino, S. Miyasaka, and K. Kudo, *Journal of the Physical Society of Japan* **91**, 034703 (2022) [https://doi.org/10.7566/JPSJ.91.034703].
- [3] T. Ogawa, K. Manabe, T. Takeuchi, T. Kida, H. Kuroe, M. Hagiwara, J. Goryo, T. Adachi, and K. Kudo, *Journal of the Physical Society of Japan* **91**, 123702 (2022) [https://doi.org/10.7566/JPSJ.91.123702].
- [4] T. Adachi, K. Kudo *et al.*, in preparation.
- [5] K. Kudo, H. Hiiragi, T. Honda, K. Fujimura, H. Idei, and M. Nohara, *Journal of the Physical Society of Japan* **89**, 013701 (2020) [https://doi.org/10.7566/JPSJ.89.013701].
- [6] K. Kudo, T. Honda, H. Hiiragi, H. Ota, and M. Nohara, *Journal of the Physical Society of Japan* **89**, 123701 (2020) [https://doi.org/10.7566/JPSJ.89.123701].

研究室 HP: <http://qm.phys.sci.osaka-u.ac.jp>

工藤一貴 (大阪大学・大学院理学研究科・教授)

電荷転移に起因する巨大熱量効果の発見

A01 班 島川 祐一

「量子液晶物質の開発」課題の中で我々の研究グループでは、特に特異な合成手法を使った新物質開発を進めてきました。その手法の一つが高圧合成です。この手法では、しばしば異常な原子価状態のカチオンを含んだ遷移金属酸化物を合成することができます。このような物質では電子—スピン—格子が非常に強く関連しており、異常高原子価イオンの電子的な不安定性が引き起こす電荷相転移では、電子系、スピン系、格子系において劇的な物性変化が現れます。我々は新しい量子液晶物質探索の中で、このような物質の相転移において電子、スピン、格子の各変化が重畳した巨大なエントロピー変化が生じることを見出しました (図 1 参照)。さらに興味深い点はこの転移によるエントロピー変化により系の熱物性も大きく変化することです。

我々が合成に成功した新物質は異常高原子価 $\text{Fe}^{3.75+}$ を含んだ A サイト秩序型ペロブスカイト $\text{NdCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ で、室温付近の 310 K で電荷移動転移を起こします。この電荷転移において 25.5 kJ/kg という巨大な潜熱 (エントロピー変化 84.2 J/kg·K) が生じることを発見しました。電荷転移では同時に Fe^{3+} 磁気モーメントの反強磁性転移が起こりますが、 Fe^{3+} スピン間には内在的には 650 K 程度で転移を引き起こすほどの強い磁気相互作用がはたらいています。ところが、電荷転移により磁気転移は室温近傍まで抑制された 1 次の磁気相転移となり、巨大な磁気エントロピー変化を引き起こします。この巨大なエントロピー変化による熱物性変化は圧力熱量効果により熱制御に応用することができ、将来の高効率で環境負荷の小さい熱制御材料として応用できると期待されています (図 2)。

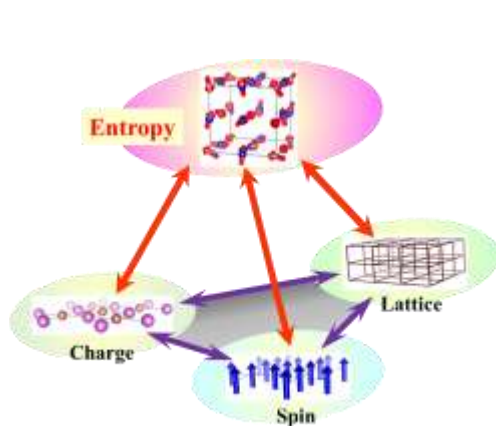


図 1: 電子—スピン—格子相関に重畳するエントロピー物性変化

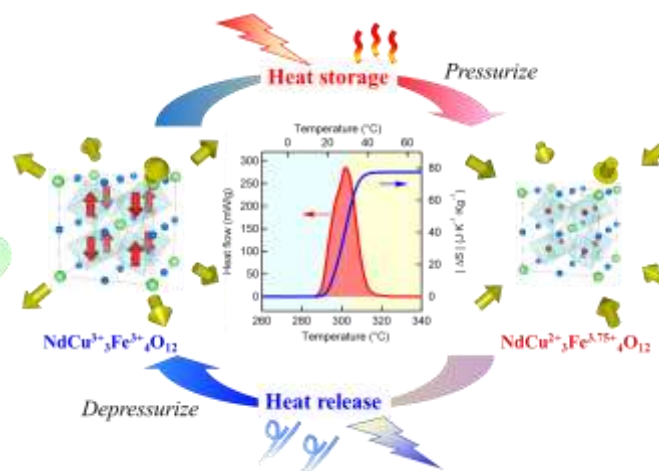


図 2: $\text{NdCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ での巨大圧力熱量効果

参考文献

- [1] Y. Kosugi, M. Goto, Z. Tan, A. Fujita, T. Saito, T. Kamiyama, W. T. Chen, Y. C. Chuang, H. S. Sheu, D. Kan and Y. Shimakawa, *Adv. Funct Mater.* **31**, 2009476 (2021). DOI: 10.1002/adfm.202009476
- [2] Y. Kosugi, M. Goto, Z. Tan, D. Kan, M. Isobe, K. Yoshii, M. Mizumaki, A. Fujita, H. Takagi and Y. Shimakawa, *Sci. Rep.* **11**, 12682 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-91888-8
- [3] Y. Shimakawa and Y. Kosugi (Perspective review), *J. Mater. Chem. A*, **11**, 12695 (2023). DOI: 10.1039/D2TA09186K

研究室 HP: <https://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~shimakgr/index.html>

島川祐一 (京都大学・化学研究所・教授)

フォノンを通して観るパイ電子集団の電荷/スピン自由度

A01 班 佐々木 孝彦

分子性有機物質の特徴は、分子が比較的弱い分子間相互作用によって集積して固体結晶となっていることです。この弱い分子間の相互作用の結果として、比較的弱い外場の変化により分子間の距離が変化しやすいため、構造的に「やわらかい」ことが特徴です。このような構造的な「やわらかさ」は、分子格子の動的性質（フォノンダイナミクス）にも表れます。分子性有機物質の電氣的磁氣的性質を担うパイ電子集団の振る舞いには、パイ電子間に働く相互作用に加えてパイ電子-分子格子の間の相互作用も影響します。また、逆に強相関パイ電子集団の挙動を分子格子フォノンの観測を通じて知ることができます。私たちは、このような「やわらかい」分子性有機物質中のパイ電子集団が示す特異な振る舞いの探索と解明を目指しています。本稿では、分子ダイマー三角格子構造を特徴とする分子性有機物質の強相関パイ電子集団の振る舞いを分子格子の動的状態（フォノンダイナミクス）の観測-非弾性中性子散乱測定によりおこなった研究について紹介します。

分子性有機物質 κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu $_2$ (CN) $_3$ は、BEDT-TTF と呼ばれる分子がダイマー（二量体）を組み、このダイマーが三角格子状に配列して 2 次元的な電気伝導層を形成しています。この BEDT-TTF 分子層と Cu $_2$ (CN) $_3$ 層が交互に積層して 3 次元結晶となっています。この物質は、BEDT-TTF 分子ダイマー上のクーロン相互作用によってパイ電子が局在化したモット絶縁体状態になっています。さらに局在したパイ電子のスピン

($S=1/2$) は、極低温でも秩序化せず量子スピン液体状態が実現しているのではないかと考えられています。私たちはこのような分子ダイマー上のパイ電子（電荷・スピン）とダイマー構造に特徴的なフォノン（ブリージング（息継ぎ）モード）の結合状態（図 1）を非弾性中性子散乱の手法を使って調べました。[1, 2] 2020-2022 年は、新型コロナウイルス感染症拡大のため中性子実験を行うフランスグルノーブルの実験施設 (Institute Laue-Langevin) に出かけて現地で実験を行うことができませんでした。そのため、準備した試料をフランスに空輸し、現地の担当者とオンラインでの打ち合わせをしながら日本からリモートで実験を行いました。その結果、この物質は、低温 ($T^*=6$ K 以下) で、特定のフォノンモード（ブリージングモード）が急激な変化を示すことを観測しました。このモードは分子ダイマー上のパイ電子と強く結合しているため、パイ電子の電荷・スピン状態をフォノンの変化を通して観たこととなります。詳細は文献[1, 2]を参照してください。この成果はこれまで実験困難と考えられていた小さな有機物質でも非弾性中性子散乱実験によるフォノンの観測が可能であり、パイ電子と結合したフォノンの観測からパイ電子集団の挙動を知ることができることを示したものです。

参考文献

- [1] M. Matsuura, T. Sasaki, S. Iguchi, E. Gati, J. Muller, O. Stockert, A. Piovano, M. Bohm, J. T. Park, S. Biswas, S. M. Winter, R. Valenti, A. Nakao and M. Lang, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 027601 (2019) [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.027601]
- [2] M. Matsuura, T. Sasaki, M. Naka, J. Mueller, O. Stockert, A. Piovano, N. Yoneyama and M. Lang, *Phys. Rev. Research* **4**, L042047 (2022) [https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.L042047]

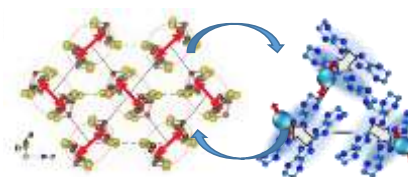


図 1: BEDT-TTF 分子ダイマーのブリージング(呼吸)フォノンモード(左図)と結合する分子ダイマー上のパイ電子ゆらぎ(右図)の概念図。

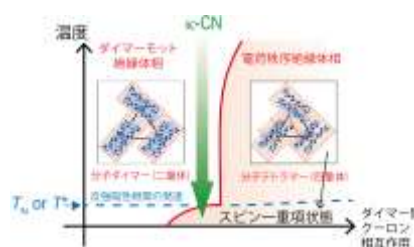


図 2: κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu $_2$ (CN) $_3$ の電子相図の概念図。理論的考察から、この物質は低温で分子 4 量体化して非磁性化していることが示唆された。[2]

研究室 HP: <http://cond-phys.imr.tohoku.ac.jp/>

佐々木孝彦（東北大学・金属材料研究所・教授）

スピン軌道相互作用に由来するスピン液晶相の物性解明と物質開発

A01 班 平井 大悟郎

電子はスピン角運動量と軌道角運動量という 2 つの角運動量をもっており、それらはちょうど自転と公転運動のようなものとイメージできます。この 2 つの角運動量はスピン軌道相互作用によって結びつけられ、特に、原子番号の大きい重遷移金属元素ではスピンと軌道が強く結合した状態が実現します。このスピンと軌道が結合した電子状態からは、磁気的な秩序であるスピンの秩序だけでなく、電荷の分布が偏る秩序など様々な秩序状態が形成されます。電荷の分布が偏る秩序は、磁気的な秩序はないのに元の結晶の対称性が破れる(方向性が現れる)液晶のような状態なので、スピンネマティック相(図 1a)とも呼ばれています。

私はスピンと軌道が結合した結果現れる、不思議なスピンの液晶状態の観測を目指して物質探索を行った結果、5d 遷移金属元素のレニウム (Re) を含む $\text{Ba}_2\text{MgReO}_6$ という物質でスピンの液晶状態が実現していることを見つけました [1]。この物質を詳しく調べると、スピンと軌道に加えて電子が結晶構造とも強く結合していることが分かってきました。例えば、磁場をかけるとスピンの向きを揃えることはできますが、結晶の方向を揃えることは、普通は出来ません。しかし、この物質では、磁場を加えると、スピンの向きが揃うのに引きずられて、バラバラの方向に向いていた結晶が 1 つの方向にそろえることが、磁場をかけながら結晶の方向を測定する実験によってわかりました [2]。また X 線を使って電子の励起状態を調べた実験でも、ピークが非対称になっていたり、温度によってピークが広がったり、格子振動と電子が強く結合していないと説明できない特徴が見つかっています [3]。このようなスピンと軌道と格子の強い結合は 5d 遷移金属のスピン液晶状態の形成に重要な役割を果たしていると考えられます。

同じく Re を含む $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ という物質では、室温から冷やしていくと 3 回も構造相転移を起こし、その駆動力が電気トロイダル四極子(図 1b)秩序という電子秩序の形成であることが分かってきました[4]。このような、他の物質では見られない非常に複雑で多彩な電子の秩序は、強いスピン軌道相互作用によって電子が多くの自由度を獲得した結果、発現しています。

電子の液晶状態は様々な物質で観測されていますが、スピンと軌道が強く結合した重遷移金属を含む化合物は、量子液晶状態を調べるうえでよい舞台になるのではないかと考えています。

参考文献

- [1] Daigorou Hirai, Hajime Sagayama, Shang Gao, Hiroyuki Ohsumi, Gang Chen, Taka-hisa Arima, and Zenji Hiroi, *Phys. Rev. Research* **2**, 022063(R) (2020) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.022063>].
- [2] Toshihiko Muroi, Daigorou Hirai, Hajime Sagayama, Taka-hisa Arima, and Zenji Hiroi *in preparation*
- [3] Felix I. Frontini, Graham H.J. Johnstone, Naoya Iwahara, Pritam Bhattacharyya, Nikolay A. Bogdanov, Liviu Hozoi, Mary H. Upton, Diego M. Casa, Daigorou Hirai, and Young-June Kim, arXiv:2311.01621
- [4] Daigorou Hirai, Atsuhito Fukui, Hajime Sagayama, Takumi Hasegawa, and Zenji Hiroi, *J. Phys.: Condens. Matter* **51**, 035403 (2023) [<https://doi.org/10.1088/1361-648X/aca05e>].

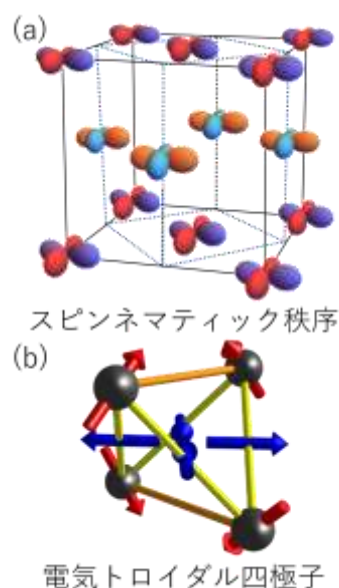


図 1:(a) $\text{Ba}_2\text{MgReO}_6$ において観測されたスピン液晶状態(スピンネマティック秩序)。(b) $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ において形成される電気トロイダル四極子。

研究室 HP: <https://mag.nuap.nagoya-u.ac.jp/index.html>

平井大悟郎 (名古屋大学・工学研究科・准教授)

Towards spiral magnetism in two-dimensional metals

A01: Max Hirschberger

We search new materials with a twisting magnetic structure, termed helimagnetism or spiral magnetism: Especially metallic helimagnets, where the charge and spin degree of freedom of quantum-mechanical electrons can be coupled, are an active field of research. Since G. Volovik's seminal work in 1987 [1,2], the concept of 'emergent electromagnetism' has been developed to describe the coupling of charge and spin in these materials: Due to the twisting of the spin, a virtual electric or magnetic field appears to bend the path of moving charges.

An important frontier in this field are two-dimensional (2D) helimagnets, which are magnetic analogues of the 'wonder material' graphene that can be exfoliated, for example using scotch tape, to a single atomic layer. Such 2D magnets are believed to be highly controllable by external stimuli, e.g. pulses of strong light or electric gate voltages. Moreover, two atomic layers can be combined and twisted to create vortex-like spin textures, termed skyrmions or merons, on-demand [Fig. 1(a)]. A small number of insulating materials has been proposed as 2D helimagnets; however, there is no suitable metallic helimagnet to study emergent electromagnetism in 2D [3].

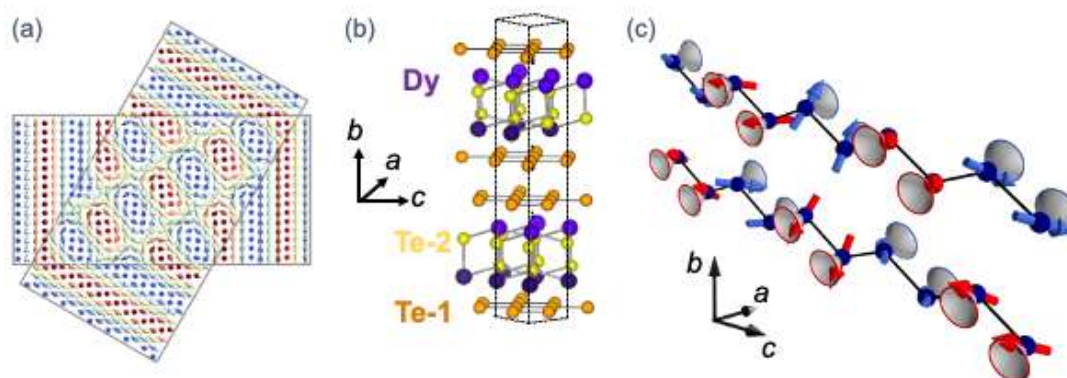


Fig. 1: (a) Double-layer made from two sheets of a two-dimensional (2D) helimagnetic material, which can be twisted to create complex spin textures, such as skyrmions, on-demand. Illustration adapted from Ref. [4]. (b) Crystal structure of orthorhombic DyTe₃, a layered material where large magnetic moments reside on the position of Dy³⁺ rare earth ions. (c) Magnetic texture in the ground state of DyTe₃, revealed by elastic neutron scattering at JRR-3 (Tokaimura, Japan).

Using the flux growth technique, electric measurements, and elastic neutron scattering at the reactor source JRR-3 in Tokaimura, Ibaraki, Japan, we have identified the layered metal DyTe₃ as a helimagnetic that can be exfoliated to the thickness of a few atomic layers [3]. The observed magnetic ground state is illustrated in Fig. 1 (b,c). As a next step, we aim to reveal the richness of magnetic ordering in this compound and to proceed with creating two-dimensional devices.

References

- [1] G. E. Volovik, *J. Phys. C: Solid State Phys.* **20**, L83 (1987);
- [2] N. Nagaosa, *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 081002 (2023)
- [3] S. Akatsuka, S. Esser, S. Gao, S. Aji, Y. Onuki, T.-h. Arima, T. Nakajima, and M. Hirschberger, arXiv:2306.04854 (2023)
- [4] K. Shimizu, S. Okumura, Y. Kato, and Y. Motome, *Butsuri* **78**, 314-319 (2023)

Group HP: <https://www.qpec.t.u-tokyo.ac.jp/hirschberger/>

Max Hirschberger (Univ. of Tokyo • Department of Applied Physics • Associate Professor)

高品質 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 薄膜の作製と磁気基底状態の制御

A01 班 打田 正輝

分子線エピタキシー成長法では、高真空中で原料となる各原子・分子を精度よく供給することで、非常に高品質な薄膜を作製することができます。元は化合物半導体の薄膜成長手法として大きな技術的進展を遂げましたが、近年では遷移金属酸化物を含む様々な物質群の高品質薄膜を作製するために用いられるようになってきています。Ruddlesden-Popper ルテニウム酸化物 ($\text{Sr}_{n+1}\text{Ru}_n\text{O}_{3n+1}$) は、 n の違いによって超伝導 ($n=1, \text{Sr}_2\text{RuO}_4$) ・ネマティック ($n=2, \text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$) ・強磁性ワイル相 ($n=\infty, \text{SrRuO}_3$) 等の様々なエキゾチック量子相を示し、またそれらが非常に高品質な試料で発現するところに特徴があります。これまでに、電子ビーム加熱を利用した酸化物分子線エピタキシー成長の技術蓄積に取り組み、特に Sr_2RuO_4 について、超伝導を示す薄膜の安定作製[1]や最高転移温度を示す薄膜の作製[2]を報告してきました。

本研究では、この分子線エピタキシー技術を $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ に適用しました。これにより、過去の報告を大きく上回る高品質薄膜を作製し、さらに基板からの歪みによってネマティック相に関連する磁性を大きく変化させることに成功しました[3]。 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ は状態図上において Sr_2RuO_4 ・ SrRuO_3 の両極限に挟まれた非常に狭い領域で安定化するため、温度・圧力・Ru フラックス量を非常に高い精度で制御し成膜を行いました。その結果、これまでの値を 5 倍近く上回る高い残留抵抗比を持つ高品質薄膜の作製に成功しました。さらに、本薄膜試料の磁気抵抗及び磁化の測定を行ったところ、ネマティック転移後の強磁性状態が基底状態として現れることがわかりました。 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ バルク試料では c 軸方向に一軸圧縮歪みを加えることでこのような強磁性状態が安定化することが示唆されており[4]、本薄膜試料ではより大きな歪みを SrTiO_3 基板からの面内引張歪みとして加えることで、大きな飽和磁化をもつ強磁性状態が誘起されたと理解されます。

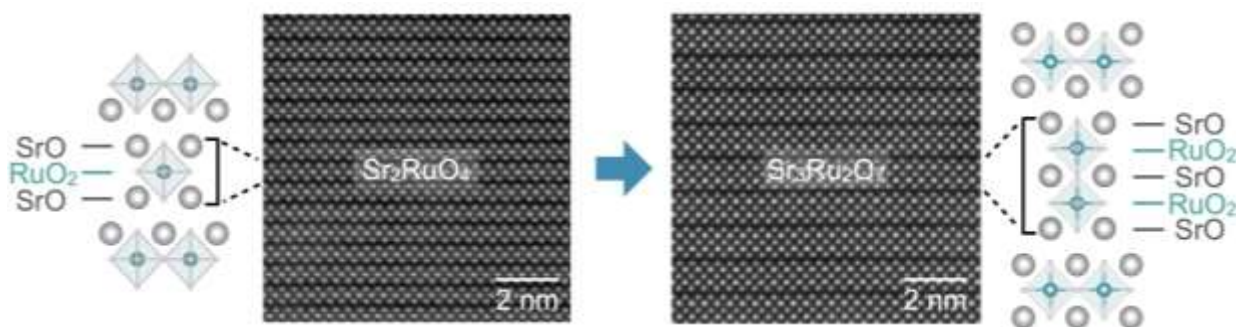


図 1: Sr_2RuO_4 ($n=1$) 薄膜と新たに作製した $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ ($n=2$) 薄膜の透過電子顕微鏡像。

参考文献

- [1] M. Uchida, M. Ide, H. Watanabe, K. S. Takahashi, Y. Tokura, and M. Kawasaki, *APL Materials* **5**, 106108 (2017).
- [2] M. Uchida, I. Sakuraba, M. Kawamura, M. Ide, K. S. Takahashi, Y. Tokura, and M. Kawasaki, *Physical Review B* **101**, 035107 (2020).
- [3] R. Oshima, T. Hatanaka, S. Nishihaya, T. Nomoto, M. Kriener, T. C. Fujita, M. Kawasaki, R. Arita, and M. Uchida, *submitted*.
- [4] S.-I. Ikeda, N. Shirakawa, T. Yanagisawa, Y. Yoshida, S. Koikegami, S. Koike, M. Kosaka, and Y. Uwatoko, *Journal of the Physical Society of Japan* **73**, 1322 (2004).

研究室 HP: <http://uchida.phys.titech.ac.jp>

打田正輝 (東京工業大学・理学院・准教授)

液晶を用いたナノシート合成

A01班 内田 幸明

古典液晶は、サーモトロピック液晶とリオトロピック液晶に分類されます。前者は異方性分子が構成する液晶で、結晶相と等方性液相の間のある温度範囲で現れます。後者は、異方性を持つ分子集合体または粒子の懸濁液が示す状態で、異方性成分がある濃度範囲のときに現れます。

本領域の公募研究の第一期課題「常磁性液晶へのスピン注入による新機能創出」と第二期課題「光磁気効果測定による液晶中のスピン拡散の機構解明」は、いずれもサーモトロピック液晶に関する課題でした。領域内の皆様のご協力のおかげで新たな展開を迎えつつありますが、こちらで報告をするにはまだ成果が熟しておりません。改めて皆様にご報告できるように、今後も進めて参ります。

一方、領域が主に扱う無機材料の合成について、古典液晶が寄与することは無いのか、という意識のもと、液晶中でナノシートを合成する私達の手法(2017年日本液晶学会論文賞受賞)[1]を無機材料に応用する手法の開発を進めて参りました。ナノシートは表面のみでできており、表面特異的な性質を強く示すため、皆様がお持ちの材料に適用できるのであれば、有望だと予想しています。この四年間の研究期間の中で、広い範囲の材料のナノシート化に応用可能な手法として、発展させることができましたので、ここで報告させていただきます。こちらはリオトロピック液晶に関する話題です。

細胞膜に似た両親媒性物質の二分子膜が蓄積したラメラ液晶相は、リオトロピック液晶相に分類されます。二分子膜の内部の空間はナノシートのように非常に薄いのが特徴です。したがって、ラメラ相はナノシート合成の鋳型として利用されます。層状化合物の単層剥離や化学気相成長とは異なる手法です。ラメラ相を用いたナノシート合成法は、剥離と蒸着の長所を兼ね備えた方法と言えますが、ナノシートがラメラ相中で凝集するのを防ぐために、さらに改良される必要がありました。

超膨潤ラメラ(HL)相は、通常のラメラ相よりもナノシート合成のための優れたテンプレートとして機能します。HL相は、異方性成分として両親媒性物質を数パーセントしか含みません。通常のラメラ相と同様に二分子膜の厚さは1~10 nmです。しかし、二分子膜同士が可視光の波長程度の(100~1000 nm)の間隔で配列しています。私達は、HL相の二分子膜を二次元反応器として用いたナノシート合成法を開発し(図1)、この方法を「両親媒性相における二次元反応器(TRAP)法」と名付けました[2]。二分子膜の内外は水相と油相に相分離しています。親水性ナノシート(金属、金属酸化物、金属錯体)は疎水性溶媒中の二分子膜の内側の親水性の空間で合成することができます(2023年日本液晶学会論文賞受賞)[3]。一方、疎水性ナノシート(ポリマー、金属錯体)は水中の二分子膜の内側の疎水性の空間で合成することができます[1]。非層状で剥離のない物質も、TRAPの中でナノシートとして成長することを確認しています。皆様がお持ちの材料を使い、新しい機能性ナノシートを合成し、将来的に新しい特性を開発できると期待しています。

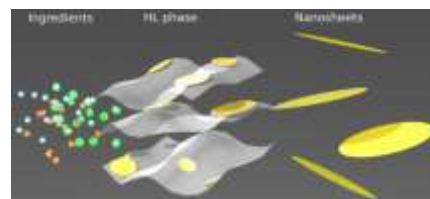


図1: 液晶を用いたナノシート合成

参考文献

- [1] Y. Uchida, T. Nishizawa, T. Omiya, Y. Hirota, N. Nishiyama, *Journal of the American Chemical Society*, **138**, 1103-1105 (2016) [<https://doi.org/10.1021/jacs.5b11256>]
[2] K. Sasaki, Y. Uchida, N. Nishiyama, *ChemPlusChem*, **88**, e202300255 (2023) [<https://doi.org/10.1002/cplu.202300255>]
[3] K. Sasaki, J. A. Hernandez Gaitan, T. Okue, S. Matoba, Y. Tokuda, K. Miyake, Y. Uchida, N. Nishiyama, *Angewandte Chemie International Edition*, **61**, e202213773 (2022) [<https://doi.org/10.1002/anie.202213773>]

研究室 HP: <http://www.cheng.es.osaka-u.ac.jp/nishiyamalabo/research/325.html>

内田幸明 (大阪大学・基礎工学研究科・准教授)

界面に誘起されるトポジカル磁気構造の微視的機構解明

A01 班 松野 丈夫

我々の研究室では遷移金属酸化物の界面を設計し、作製・評価までを一貫して実施しています。二種類の薄膜が接する界面は多様な物性の舞台であり、単一の物質では実現できない新たな物性が期待できます。原子レベルで制御された界面を通して物質の対称性・次元性を制御することで、物質科学の世界を広げていくことが我々の目標です。本領域ではナノスケールのトポジカル磁気構造である「スキルミオン」を構成単位とした量子液晶を対象としました。スキルミオンを生成する有力な機構の一つがジャロシンスキー-守谷 (DM) 相互作用で、これが強磁性体のスピンをひねることでスキルミオンが安定化されます。強磁性体にスピン-軌道相互作用の強い $5d$ 電子系酸化物 (イリジウム酸化物など) を組み合わせることで、界面での空間反転対称性破れによる DM 相互作用が期待できます。本研究では輸送特性による DM 相互作用の評価を目指しましたが、現段階では結果が得られていません。

スピン-軌道相互作用の強い物質と強磁性体との界面はスキルミオンだけでなく、電子の持つスピンの角運動量の流れであるスピン流が活躍する舞台でもあります。イリジウム酸化物 IrO_2 と強磁性体金属 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ との界面において、 IrO_2 が電流を効率よくスピン流に変換する物質であることが我々自身の研究によって明らかとなっていました [1]、本領域の期間内にさらなる発展があり、界面におけるスピン軌道トルク生成効率 (電流をスピン流に変換する効率) を高調波ホール効果により測定することで、 IrO_2 と $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ との積層順序がスピン流変換効率に与える影響 [2] やトポジカルなバンド構造を持つイリジウム酸化物 SrIrO_3 [3] が高い電流-スピン流変換効率 (+0.32) を持つことを明らかにしました。さらに最近、タングステン酸化物 WO_2 [4] の持つ高い電流-スピン流変換効率 (+0.17) を実証しました。これはイリジウム酸化物以外では初めての $5d$ 電子系酸化物のスピン流物性の成果です。 IrO_2 と WO_2 は同じルチル構造を持ち、異なる $5d$ 電子数 ($5d^5$ と $5d^2$) が t_{2g} 軌道を占める低スピン配置をとります。そのため、両者のスピン-軌道相互作用は逆符号となることが期待されますが、電流-スピン変換効率の符号はともに正です。このことはスピン-軌道相互作用が非摂動的に電流-スピン流変換に寄与することを示しており、金属系とは大きく異なる特徴です。スピン流に由来するスピン軌道トルクは隣接する強磁性層の磁化を反転させることが可能であるため、応用への展開も考えられます。これらの研究はスピン-軌道相互作用の効いた界面が示す興味深い物性の一端を明らかにしたもので、今後も界面を舞台とした物性研究が発展することが期待されます。

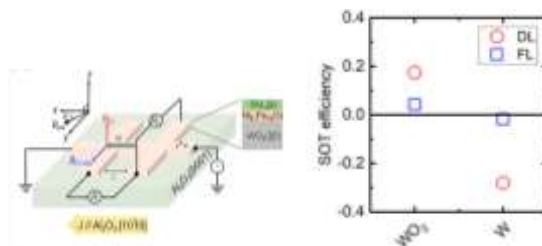


図 1: (左) 高調波ホール測定によるスピン軌道トルク生成効率評価用ホールバー型デバイスの模式図。(右) WO_2 と参照試料 W のスピン軌道トルク (SOT) 生成効率。磁化反転に重要であるダンピングライク (DL) スピン軌道トルク生成効率は、金属系の中でも有力な W の -0.28 に対し、 WO_2 は $+0.17$ と匹敵する値をとる。

参考文献

- [1] K. Ueda, N. Moriuchi, K. Fukushima, T. Kida, M. Hagiwara, and J. Matsuno, *Physical Review B* **102**, 134432 (2020) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.134432>].
- [2] K. Ueda, N. Moriuchi, K. Fukushima, T. Kida, M. Hagiwara, and J. Matsuno, *Physical Review Applied* **16**, 034039 (2021) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.034039>].
- [3] S. Hori, K. Ueda, T. Kida, M. Hagiwara, and J. Matsuno, *Applied Physics Letters* **121**, 022402 (2022) [<https://doi.org/10.1063/5.0124583>].
- [4] K. Ueda, H. Fujii, T. Kida, M. Hagiwara, and J. Matsuno, *APL Materials* **11**, 061125 (2023) [Featured Article] [<https://doi.org/10.1063/5.0153533>].
- [5]

研究室 HP: <http://interface.phys.sci.osaka-u.ac.jp>

松野丈夫 (大阪大学・理学研究科・教授)

固体中の核生成-核成長によるスローダイナミクス

A01 班 勝藤 拓郎

量子力学によると、エネルギーの逆数が時間に対応します。一般的に物質中の電子やスピンのエネルギースケールは eV~meV であり、これを時間に直すと 10^{-15} ~ 10^{-12} 秒になります。したがって固体中の電子の運動の時間スケールもこれぐらいになるのが普通です。一方、気体や液体においては 1 秒よりもはるかに遅いダイナミクスがよく見られ、固体中においてもそのようなスローダイナミクスが観測される場合があります。

このようなスローダイナミクスの基本となるのが核生成-核成長プロセスです。A 相と B 相が競合していて、自由エネルギーが B 相 < A 相であり、かつ B 相と A 相の界面に界面エネルギーがある場合を考えます。このとき、B 相が A 相の中に成長するとして、自由エネルギーの利得は B 相の体積に比例しますが、界面エネルギーの損は B 相の表面積に比例し、その自由エネルギーの和は、図 1 のようにある半径（臨界半径）で極大値が存在することになります。したがって、この臨界半径でのエネルギーバリアーを超えないと、A 相の中に生成した B 相は成長することができず、つぶれてしまいます。すなわち、エネルギーバリアーを超える大きさの核が確率的に生成して初めて B 相は成長できることになり、このことからもとのエネルギースケールで導かれる時間よりはるかに遅いダイナミクスが発現します。

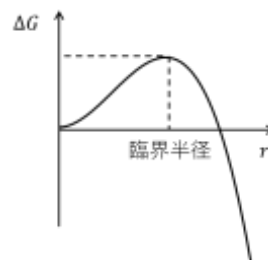


図 1: 自由エネルギーの B 相の半径への依存性

固体の場合は、界面エネルギーに相当するものがそれほど大きくないために、気体や液体と比較して核生成-核成長プロセスが起こりにくいのですが、我々は $\text{La}_5\text{Mo}_4\text{O}_{16}$ [1] という 2 次元性の強い磁性体において、スローダイナミクスが起こることを見出しました。この物質は 2 次元面上で長いスピン (Mo^{4+}) と短いスピン (Mo^{5+}) が互いに反対を向くフェリ磁性であり、長いスピンと短いスピンの差に由来するフェリ磁性モーメントが隣り合う面で反対を向く面間反強磁性となります。しかし、面間の相互作用は面内の反強磁性相互作用の 10^{-3} 倍と非常に小さく、0.5 T 程度の弱い磁場で隣り合うフェリ磁性モーメントが同じ向きとなる面間強磁性へと転移します。この面間反強磁性相と面間強磁性相が上記の A 相と B 相となり、磁場によって A 相の中に B 相をつくることも、B 相の中に A 相をつくることもでき、その過程でスローダイナミクスを示すことを明らかにしました。これは面間の相互作用の利得が 2 次元上の閉曲面の面積に比例する一方、面内の相互作用の損が閉曲面の界面の長さに比例し、核生成-核成長プロセスが成り立つためです。図 2 に示すように、磁化率の時間依存性を様々な温度、磁場で測定することにより、固体中の核生成-核成長プロセスについて定量的に明らかにしました。

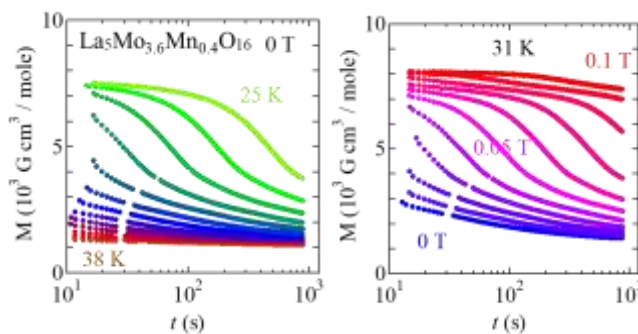


図 2: $\text{La}_5\text{Mo}_4\text{O}_{16}$ 系の磁化の時間依存性

参考文献

- [1] T. Katsufuji et al., Phys. Rev. Research 3, 013105 (2021).
[<https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.013105>]

研究室 HP: <https://katsuf.w.waseda.jp/lab/index.htm>

分光イメージング走査型トンネル顕微鏡で見た量子液晶

B01 班 花栗 哲郎

走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いて試料の表面形状を原子分解能で描き出すと同時に、STM 像の全ての画素でトンネル分光を行う手法を分光イメージング STM と呼びます。分光イメージング STM は、電子状態の空間変化を直接調べることが可能であり、量子液晶の探索・解明において強力なツールです。本新学術領域研究では、超低温・強磁場・超高真空の多重極限環境で動作する STM を用いて、電荷液晶・スピン液晶・電子対液晶のそれぞれに関して探索・解明研究を行いました。

電荷液晶は、トンネル分光測定で得られる準粒子状態密度の空間構造に直接影響するため、分光イメージング STM の最も重要な研究対象です。本研究では、B01 班の芝内グループと共同で、電子状態が自発的に結晶格子の回転対称性を破りネマティック状態となる超伝導体 FeSe の Se を Te で置換した系の電子状態を詳細に調べました。Te 置換はネマティック状態を抑制しますが、同時にバンド反転を誘起し、トポロジカルに非自明な超伝導状態が現れます。系統的に Te 置換量を変化させて電子状態を調べ、ネマティックが抑制されるよりも少ない Te 置換量で超伝導ギャップに変化が生じることを明らかにしました。この他、電子の有効質量がゼロとなる Dirac 半金属の分光イメージング STM を行い、BaNiS₂ や ZrSiS でネマティックな、NaAlSi においてスメクティックな電荷液晶状態を発見しました。BaNiS₂ では、C01 班の紺谷グループと共同で、電子相関がネマティック状態をもたらしていることを明らかにしました [1]。

スピン液晶の研究では、スキルミオンと呼ばれるスピンの渦構造をはじめとする様々な磁気構造を示す GdRu₂Si₂ の分光イメージングを、D01 班の有馬グループ、C01 班の有田グループ、求グループと共同で行いました。この物質の磁気モーメントは、STM で観測する Fermi 準位近傍にほとんど状態を持たない局在した Gd の 4f 電子が担っていますが、様々な相の磁気構造を反映した電子状態の空間分布が観測されました。この結果は、伝導電子と Gd の磁気モーメントの交換相互作用を考慮することで説明することが可能で、この系のスキルミオン形成に伝導電子が関与していることを示唆しています [2]。

電子対液晶は、超伝導が非自明な空間構造を持つような状態を指し、その最も重要なターゲットは、低温強磁場で現れる Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態と呼ばれる超伝導ギャップが周期的にゼロとなる「節面」を持つ状態の探索です。FeSe は、FFLO 状態の有力な候補物質ですが、その実現には超低温・強磁場が必要で、分光イメージングの適用が困難でした。我々は、90 mK の超低温、17.5 T の強磁場に到達できる STM を用い、B01 班の笠原グループ、芝内グループと共同で、FFLO と思われる状態の電子状態イメージングに成功しました。その結果、電気抵抗はゼロになっているにも関わらず、試料表面では超伝導が消失する状態が 14 T 以上の強磁場で観測されました。この結果は、FFLO 状態で生じた節面が、表面にピン止めされていることを示唆します [3]。この他、非自明な超伝導状態を探索するために、グラフェン上に成長させた単層超伝導体 1H-NbSe₂ の研究を行いました。1H-NbSe₂ は弱い van der Waals 力でグラフェンと結びついているため、成長過程で捻りが生じ、カイラルな構造をとることがあります。このような場合、超伝導状態における励起状態である Bogoliubov 準粒子が、結晶のポテンシャルとは異なる角度で捻られたパターンを示すことを発見し、層間の Fermi 面の重なりが重要であることが明らかになりました。

参考文献

- [1] C. J. Butler *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **119**, e2212730119 (2022).
- [2] Y. Yasui *et al.*, Nature Commun. **11**, 5925 (2020).
- [3] S. Kasahara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 257001 (2021).

研究室 HP: <https://www2.riken.jp/epmrt/index-J.html>

精密バルク物性測定による量子液晶の探索と今後の展望

B01 班 笠原 成

私達の研究グループでは、輸送現象測定や熱測定、磁気トルク測定といった各種のバルク物性測定を通じて、量子液晶の物理を開拓することに取り組んできました。本新学術領域を通じて、電荷液晶相である電子ネマティック相の探索とその周辺物性の開拓 [1, 2]、アナポール秩序という新奇な量子液晶状態の発見 [3]、電子対液晶である Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 超伝導状態の検証 [4,5] など、様々な研究課題に取り組み、微力ながらも分野への貢献ができたものと振り返る次第です。

領域の発足当初、難航を予想した課題が電子対液晶の探索と解明でした。電荷液晶やスピン液晶の研究対象が多岐にわたる一方で、ゲージ対称性の破れた量子凝縮相である超伝導において、クーパー対が更に回転対称性や並進対称性を破る状態を探るには、研究対象が限定的であることが憂慮の一つとしてありました。その様な中、電子対液晶の典型例ともいえる FFLO 状態の実現を鉄系超伝導体 FeSe において見出したことは、大きな成果であったといえます。この研究は、私達が世界有数の強磁場施設であるナイメーヘン強磁場研究所 (オランダ) において開発してきた ^3He 温度領域において最大 38 T までの測定が可能な強磁場熱伝導率測定を用いておこなったもので、このような強磁場環境下での熱輸送測定は、世界でも私達だけが有するオンリーワンの技術です。FeSe での高磁場 FFLO 超伝導状態の発見は、FFLO 超伝導状態においてクーパー対が有限の重心運動量を持つことに起因し、形成される超伝導秩序変数のゼロ面 (Nodal plane) により、熱輸送特性が変化する様子を捉えたものです。

本グループでは、新学術領域「量子液晶」の計画班として、2019 年度からの 5 年間、参画してきました。笠原は 2021 年度より岡山大学異分野基礎科学研究所へと異動し、新しい研究室の立上げを行って参りましたが、本新学術領域からも立上げにあたっての多大なるご支援をいただいた次第です。この 5 年で新しく見えてきた研究課題とともに、今後とも様々なエキゾチック物性の研究に取り組んでいく所存です。

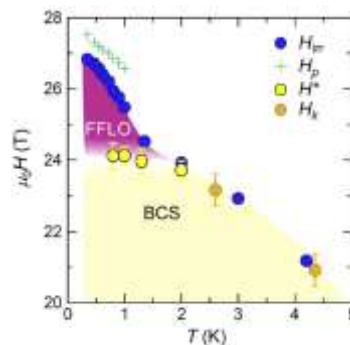


図: 強磁場熱伝導率測定によって得られた FeSe の面内磁場下における H - T 相図 [4]。一次相転移磁場 H^* を経て出現する高磁場超伝導相は電子対液晶の一形態である FFLO 状態と考えられる。

参考文献

- [1] 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, *Nat. Commun.* **10**, 3282 (2019). [<https://doi.org/10.1038/s41467-019-11200-1>]
- [2] W. K. Huang, S. Hosoi, M. Čulo, S. Kasahara, Y. Sato, K. Matsuura, Y. Mizukami, M. Berben, N. E. Hussey, H. Kontani, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, *Phys. Rev. Research* **2**, 033367 (2020). [<https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.033367>]
- [3] 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, *Phys. Rev. X* **11**, 011021 (2021). [<https://doi.org/10.1103/PhysRevX.11.011021>]
- [4] S. Kasahara, Y. Sato, S. Licciardello, M. Čulo, S. Arsenijević, T. Ottenbros, T. Tominaga, J. Böker, I. Eremin, T. Shibauchi, J. Wosnitza, N.E. Hussey, and Y. Matsuda, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 107001 (2020). [<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.107001>]
- [5] S. Kasahara, H. Suzuki, T. Machida, Y. Sato, Y. Ukai, H. Murayama, S. Suetsugu, Y. Kasahara, T. Shibauchi, T. Hanaguri, Y. Matsuda, *Phys. Rev. Lett.* **127**, 257001 (2021). [<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.257001>]

研究室 HP: <https://sites.google.com/s.okayama-u.ac.jp/kasaharalab/>

笠原 成 (岡山大学・異分野基礎科学研究所・教授)

中性子散乱による量子液晶探索

B01 班 佐藤 卓

我々のグループでは中性子散乱手法を用いて量子液晶と目される物質群の磁気構造や磁気励起を調べました。代表的な成果としては、i) 電流駆動された磁気スキルミオン格子の遅い運動の観測、ii) キタエフ候補物質 RuX_3 ($X = \text{Br}, \text{I}$) の磁気構造および磁気励起の研究、iii) 磁気スキルミオン変形の中性子小角散乱観測、iv) 量子スピンの作るマルチ Q 構造の発見等が挙げられます。ここでは、i) についてその概要を簡単に紹介したいと思います。

磁気スキルミオンとは磁気モーメントが渦巻状に配列した 2 次元強磁性相中のトポロジカル欠陥です (図 1)。磁気スキルミオンは 2009 年にカイラル磁性体 MnSi 中で初めて発見されました [1]。この物質中の磁気スキルミオンは三角格子を組み中性子小角散乱に特徴的な 6 回対称の散乱パターンを示します。このため、中性子小角散乱は磁気スキルミオン研究に広く使用されてきました。

さて、 MnSi は金属磁性体ですので、外部から電流を印加することができます。過去の多くの研究から単一の磁気スキルミオンは電流により駆動されることが知られています。他方、三角格子を組んだ

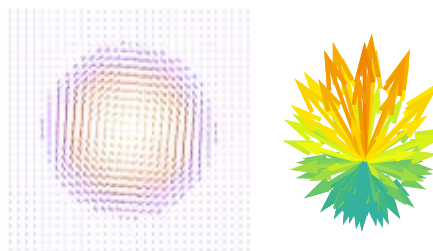


図 1: (左) 単一磁気スキルミオンスピンテクスチャー。中心のスピンは紙面垂直方向 (z 方向) を向いている。(右) 全ての磁気モーメントの始点を原点に移動した図。磁気モーメントベクトルは球面を張っている。

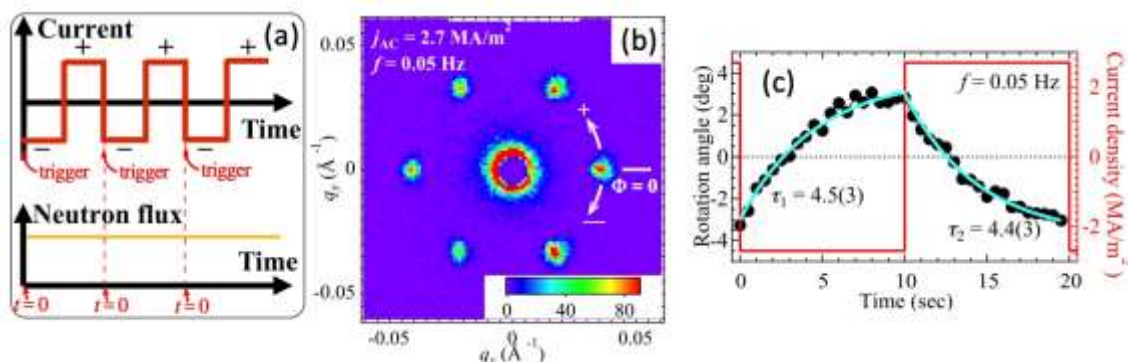


図 1: (左) MnSi 単結晶に印加された電流の時間依存性 (矩形波) と対応する定常中性子フラックス。(中央) 周波数 $f = 0.05 \text{ Hz}$ の印加電流で駆動中のスキルミオン格子小角散乱パターン。 Φ は電流未印加時からの散乱パターンの回転角。(右) 回転角 Φ の時間依存性。電流方向切り替え後 10 秒程度かけてゆっくりと回転することがわかる。

磁気スキルミオン格子が電流下でどのような運動を示すかは未解決の問題です。我々は MnSi 単結晶に対して交流電流印加状態で中性子小角散乱測定を行うことで、電流方向反転時のスキルミオン格子の変形ダイナミクスを詳細に調べました [2]。この結果磁気スキルミオン格子の回転は 10 秒程度の非常に遅い時間スケールで生じることがわかりました。このほかにも、高周波電流駆動により磁気スキルミオン格子のコヒーレンスが長くなるなど興味深い結果が多数得られています。

参考文献

- [1] S. Muhlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii, and P. Boni, *Science* 323, 915 (2009).
- [2] D. Okuyama, M. Bleuel, Q. Ye, J. Krzywon, N. Nagaosa, A. Kikkawa, Y. Taguchi, T. Tokura, J. D. Reim, Y. Nambu, and T. J. Sato (submitted).

研究室 HP: https://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/sato_tj/

鉄系超伝導体における量子液晶ゆらぎによる電子対形成

B01 班 芝内 孝禎

従来の BCS 理論では、格子振動を媒介として電子対が形成され、ボーズ・アインシュタイン凝縮と類似した量子凝縮状態が実現し、超伝導現象が現れることが確立しています。しかしながら、最近では BCS 理論から予想される温度よりも明らかに高温で超伝導を示す物質が発見されており、これは BCS 理論では説明できないため非従来型超伝導と呼ばれています。さらに高温で現れる超伝導を実現するためにも、この非従来型超伝導の発現機構を解明することが物理学における大きな課題となっています。非従来型超伝導を導く電子対を形成する引力機構として最もよく調べられてきたのが、電子のもつスピンに由来した磁氣的相互作用です。これを裏付ける実験的証拠の 1 つが、電子スピンの整列した反強磁性状態の量子臨界点付近を中心として相図上でドーム状に超伝導転移温度が変化するというものでした。量子臨界点とは絶対零度で相転移を起こす条件のことを指し、ここでは量子力学的効果により相転移を起こそうとする不安定性が特に強くなります。反強磁性状態の量子臨界点に近づくにつれて磁氣的な不安定性が強くなるため、それに呼応して超伝導転移温度が上昇しているのではないかと考えられてきました。

一方最近では、非従来型超伝導を示す様々な物質において量子液晶という液晶に類似した電子状態が現れることが明らかになりつつあり、この量子液晶状態が抑制されることによる「量子液晶揺らぎ」も超伝導電子対を形成するための相互作用となりうることを提案され、多くの注目を集めています。

我々は、鉄系超伝導体の 1 つであるセレン化鉄 (FeSe) に注目しました。この物質は例外的にスピンや電荷の整列を起こさず、量子液晶状態のみを示します。結晶中のセレン (Se) を一部テルル (Te) で置換することで、この量子液晶状態への転移温度は減少していき、ある特定の組成で絶対零度となり消失します。興味深いことに、図 1 のようにこの消失する組成量付近を中心として、相図上でドーム状に超伝導転移温度は変化していきます。我々は、試料を伸び縮みさせた場合に電気抵抗がどのくらい変化するかを測定する手法を用いて、量子液晶状態への不安定性を調べたところ、ある組成で量子液晶状態の量子臨界点を実現していることを強く支持する結果が得られました[1]。さらに、磁場中の超伝導特性の測定により、量子臨界点近傍で、量子液晶揺らぎが電子対の相互作用を増強していることを裏付ける結果を得ました[2]。

本研究は「量子液晶揺らぎによる電子対形成」という新しいメカニズムによる超伝導を実験的に検証したものです。今後、この量子液晶揺らぎによる超伝導と、磁氣的な揺らぎによる超伝導を比較することにより、非従来型超伝導機構の理解と超伝導物質開発の指針へつながることが期待されます。

[1] K. Ishida *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **119**, e2110501119 (2022).

[2] K. Mukasa *et al.*, *Phys. Rev. X* **13**, 0011032 (2023).

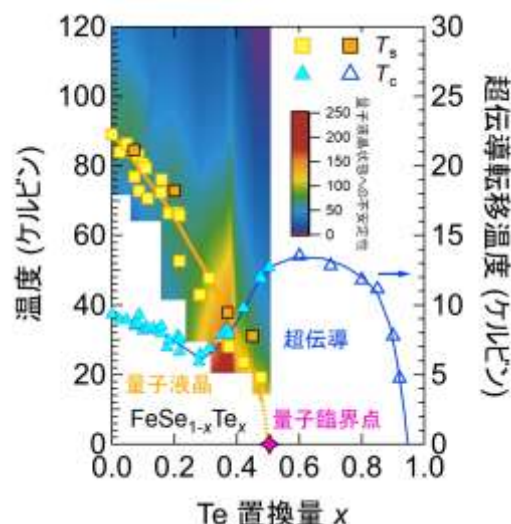


図 1: 図中の四角は量子液晶状態へ変化する温度 (T_s)、三角は超伝導状態へ変化する温度 (T_c) を表す。量子液晶状態への不安定性がカラープロットとして示されている。量子液晶状態の量子臨界点の周りで、特に超伝導転移温度が上昇していることがわかる。

研究室 HP: <http://qpm.k.u-tokyo.ac.jp/>

芝内孝禎 (東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授)

未知の素粒子を生み出す量子物質の探索

B01 班 清水 康弘

この世界に存在する素粒子は、ボース粒子(ボゾン)とフェルミ粒子(フェルミオン)とよばれる異なる量子統計性をもつ粒子のどちらかに分類されます。ボゾンとフェルミオンでは、波動関数の位相が π (180 度)異なるだけですが、前者は同じ席(エネルギー)にいくらでも詰められるのに対して、後者は2つ以上占有できない性質をもちます。例えば、自由電子気体として振る舞う金属中の電子が示す物性の多くは、フェルミ統計性で説明できます。しかし、電子が一行に整列した1次元系物質では、個々の電子は自由に動けなくなり、ボゾンのような励起を示す量子液体(朝永-ラッティンジャー液体)に凝縮します。1車線しかない道で渋滞になる様子を想像してみてください。電子は、並進運動(電荷)だけではなく、磁性を担うスピンの自由度があり、その集団運動を代表する素励起は、スピノンとよばれる粒子と見なせます。しかし、電荷をもたないスピノンをつかめるのは容易でなく、これまでさまざまな実験的な挑戦が行われてきました。

実際の物質では、純粋な1次元系を実現するのは難しく、多少なりとも2次元、3次元的な相互作用が存在します。そのため、多くの物質は極低温で何らかの秩序状態へ相転移します。(水の分子(H_2O)は0°Cで固化しますが、仮に1次元的に分子を並べられたら、絶対零度まで固まらないかもしれません。)しかし、幾何学的なフラストレーションのある系では、秩序状態が不安定となり、量子の不確定性(量子揺らぎ)により低温まで液體的な揺らぎが残ります。実際、異方的な三角格子をもつ遷移金属化合物や分子性物質において、一次元的な量子液体を示唆する振る舞いが中性子散乱や核磁気共鳴(NMR)実験において観測されています[1,2]。NMRは、秩序に伴う局所的な対称性の破れを高感度に検出する強力なプローブであり、本プロジェクトにおいて量子液体を実証する上で不可欠な実験手法として用いてきました。また、NMRで用いる電磁波はラジオと同じメガヘルツ域であり、極めて低エネルギーの磁気励起と「共鳴」することができます。その特徴をフルに使って、遍歴(フェルミオン)的なスピノンの運動や臨界現象の普遍性をとらえることができました。

一方、2次元系においては、スピノンに加えてバイゾンとよばれる渦励起が発生することが理論的に予言されています。さらに、フェルミオンのようなスピノンとボゾンのようなバイゾンが結合することで、それらの中間的な分数統計性をもつエニオンが出現することが提案され、大規模の量子コンピュータ実現には不可欠なものとして注目されています。最近、蜂の巣格子のモデルにおいて、量子スピン液体が厳密解として存在することが証明されて以来、そのモデル物質の探索がひとつのブームとなっています。その有力候補物質において、詳細なNMRを行ったところ、遍歴的なスピノンと局所的なバイゾンの存在を決定づける結果が得られています。

エニオンに代表されるような波動関数のねじれを伴うトポロジカル物質は、量子スピン液体以外にも、奇パリティ超伝導や量子ホール効果を示す系で見つかっています。実際、量子液晶のプロジェクトにおいて物質開発研究グループで数々の有力候補が生み出され、NMRによる微視的な解明に取り組んできました。今後も、このような新しい量子物質を支配する新たな素粒子を見出すための実験手法を開拓する研究を推進します。

参考文献

- [1] K. Nawa *et al.*, Phys. Rev. Research **2**, 043121 (2020) [DOI: [10.1103/PhysRevResearch.2.043121](https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.043121)].
[2] Y. Shimizu *et al.*, Phys. Rev. Research **3**, 023145 (2021) [DOI: [10.1103/PhysRevResearch.3.023145](https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.023145)].

研究室 HP: http://i-ken.phys.nagoya-u.ac.jp/index_j.html

清水康弘 (名古屋大学・理学研究科・講師)

高強度テラヘルツ分光技術が拓く非平衡量子系の物質科学

B01 班 廣理 英基

テラヘルツ (THz) 光とは、おおよそ振動数 0.1~30 THz、エネルギー 0.4~120 meV の電磁波を指します。この周波数帯は、固体の物性を特徴付ける多彩な振動や素励起が存在し、物性研究の観点から大変魅力的な周波数帯に対応します。最近の THz パルスの高強度化の技術革新は目覚ましく、物質の電氣的・磁氣的性質や結晶構造を励起・制御するためのパルスの外場として応用され始めています[1]。レーザー光や THz パルスの電場や磁場を強くして固体物質を強く光駆動すると、その電子状態やスピン構造を反映した特徴的で非線形な光学応答を示します。このような非線形応答は、物性の理解を深めるとともに、超高速でかつ非熱的な物性の変調や制御へとつながるため、基礎・応用の両面において重要な研究分野になっています。

高強度 THz パルス発生技術を用いると、時間波形が半周期の THz パルスが得られます。このような単極性 THz パルスは、走査型トンネル顕微鏡 (STM) において探針一試料間に印加するトンネルバイアスとして利用できます。この手段では通常の STM とは異なり、THz パルスで誘起されるフェムト秒程度の時間だけ流れる瞬時トンネル電流を、超高速現象を計測するプローブとして利用します[1,2]。この原理により、THz パルスを組み合わせた STM では、原子スケールで超高速に非平衡な量子ダイナミクスを把握できます。特に、非自明な空間構造・対称性の破れによって特徴づけられる量子液晶物質などにおいても、光励起直後の電子状態を原子スケールの空間分解能とフェムト秒の時間分解能で観測することはその秩序形成や素励起間の微視的な関係を理解する上で強力な手段になります。我々は、超高真空・強磁場・液体ヘリウム温度といった多重極限環境で動作する超短時間分解 THz-STM を開発しています (図 1)。これまでに、構築した装置内に THz パルスを導光し、THz 誘起の瞬時トンネル電流を観測することに成功しています。



図 1: 構築した極限環境 THz-STM の外観

また最近創出した螺旋型の金属マイクロ構造を用いることで、THz パルスの磁場成分を増大させることに成功しました。この技術を活用すると物質内部にピーク磁場強度 3 Tesla 以上の強い磁場パルスを印加できるため、スピン系物質の新たな研究ツールが得られます。この強力な THz 磁場パルスをスピン波の共鳴周波数が THz 周波数帯にある反強磁性体 (HoFeO_3) に加えることで、スピンの非線形な応答である、スピン波の第二、第三高次高調波を発生させました[3]。さらに、室温付近でスピン再配列転移という現象を示す反強磁性体 ($\text{Sm}_{0.7}\text{Er}_{0.3}\text{FeO}_3$) に強力な周期 THz 磁場を印加することで、ピコ秒時間スケールの超高速なスイッチングを実現させました。この現象は周期的な THz 磁場によって生じる磁氣的なフロッケ状態の生成を示唆しており、新たな物性制御の手法を確立したと言えます[4]。

参考文献

- [1] H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, and K. Tanaka, *Applied Physics Letters* **98**, 091106 (2011).
- [2] T. Tachizaki, K. Hayashi, Y. Kanemitsu, and H. Hirori, *APL Materials* **9**, 060903 (2021).
- [3] Z. Zhang, Y. Kanemitsu, H. Hirori *et al.*, *Nature Communications* **14**, 1795 (2023).
- [4] Z. Zhang, Y. Kanemitsu, H. Hirori *et al.*, *submitted for publication* (2023).

研究室 HP: <https://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~opt-nano/index.html>

廣理英基 (京都大学・化学研究所・准教授)

時間分解 X 線測定の開発と量子液晶のダイナミクス観測への応用

B01 班 和達 大樹

我々は量子液晶における磁性のダイナミクス観測のために、時間分解 X 線測定という実験手法を開発してきました。特に、1 ピコ秒以下の超高速な光誘起磁化ダイナミクスを観測するため、超短パルスレーザー光が試料にあたって変化を起こし、その変化を起こした状態を同様のレーザー光で観測する「ポンプ・プローブ測定」を行っています。プローブ光として X 線を用いることにより、磁性の状態を元素別に見ることができます。

まず、X 線自由電子レーザー(XFEL)施設である SACLA の硬 X 線のビームライン BL3 において、強磁性合金 FePt 薄膜の時間分解 X 線磁気円二色性(XMCD)測定に成功しました [1]。XFEL で得られるフェムト秒程度の時間幅の硬 X 線パルスを用いて、FePt に光を当てることによって引き起こされるフェムト秒スケールでの磁化の動きをとらえた結果が図 1 です。青が白金サイトの、赤が鉄サイトの磁化の変化を示します。強磁性 FePt 薄膜において鉄と白金で異なる時間スケールのダイナミクスを示すということがわかりました。これは FePt 薄膜中のレーザー光誘起磁化反転の起源となっていると考えられます。また、ドイツの放射光施設 BESSY II においても、レーザーパルスにより超短パルス X 線を得て、反強磁性体の秩序が消失するダイナミクスを明らかにしました[2]。

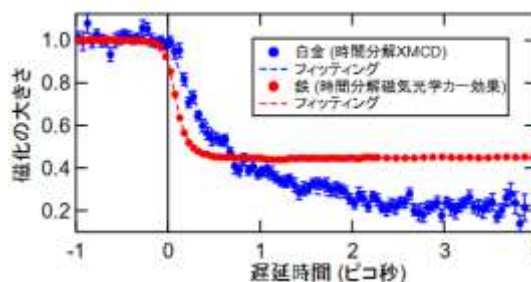


図 1: 時間分解 XMCD 測定で観測された磁化の時間変化の様子。

実験室においても超短パルスレーザー光を導入し、同様の測定を行っています。磁区観察できる磁気光学 Kerr 効果を用いた顕微鏡と、ポンプ・プローブ法による時間分解測定を両立させた、時間分解磁気光学 Kerr 効果顕微鏡を開発し、NiCo₂O₄ 薄膜において超高速消磁の測定に成功しました[3]。また、NiCo₂O₄ 薄膜では、多くのレーザーパルスを照射することにより、蓄積効果によってレーザー光誘起磁化反転が起こせることがわかりました[4]。酸化物薄膜においては初めての例となります。

XFEL と相補的な実験室における光源として、超短パルスレーザー光を希ガスセルなどに集光することによる高次高調波発生(HHG)も試みています。図 2 のようなビームラインの建設を完了し、エネルギーが 60 eV 程度までの軟 X 線を得ることに成功しています。このエネルギーは Fe などの磁性元素の吸収端を含み、磁化ダイナミクス測定が可能になります。この装置の完成により、実験室でいつでも量子液晶のダイナミクス観測を行える状態が、あと少しで実現する予定です。



図 2: 実験室において建設した HHG ビームライン。

[1] K. Yamamoto, H. Wadati *et al.*, New J. Phys. **21**, 123010 (2019) [<https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab5ac2>]

[2] K. Yamamoto, H. Wadati *et al.*, New J. Phys. **24**, 043012 (2022) [<https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac5f31>]

[3] R. Takahashi, H. Wadati *et al.*, Appl. Phys. Lett. **119**, 102404 (2021) [<https://doi.org/10.1063/5.0058740>]

[4] R. Takahashi, H. Wadati *et al.*, ACS Appl. Electron. Mater. **5**, 748 (2023)

[<https://doi.org/10.1021/acsaelm.2c01233>]

NMR 測定を用いたカゴメ遍歴磁性体 $\text{Sc}_3\text{Mn}_3\text{Al}_7\text{Si}_5$ の基底電子状態の解明

B01 班 井原 慶彦

結晶構造が三角形を基本として構成されている磁性体では、幾何学的フラストレーションの効果により、非常に低い温度まで磁気秩序を起こすことが出来ないため、低温で主役となる量子揺らぎの効果を反映した興味深い電子状態を形成する場合があります。三角形が頂点だけを共有して連なるカゴメネットワーク (図 1 の紫で示された構造) では、特に磁気基底状態を特定するのが難しく、極低温で実現する磁気状態の解明を目指す研究が盛んにおこなわれてきました。一方で、カゴメネットワークは電子が遍歴性を持つ金属においても興味深い性質を持っています。 CsV_3Sb_5 における超伝導の発見[1] をきっかけとして、大きな状態密度を供給することで、多彩な電子相実現の源となるフラットバンドやファンホーブ特異点、そしてトポロジカルな性質を有するディラック点という特徴的な構造を持つカゴメ金属バンドへの関心が急速に高まってきています。本研究では、磁気的な性質と金属的な性質を併せ持つ、カゴメ遍歴磁性体を研究対象とし、幾何学的フラストレーション効果とカゴメ金属バンドの特徴が共存することで実現する新しい電子状態を見出すことを目指しました。

私たちが注目したのは、磁性イオンである Mn がカゴメネットワークを形成する $\text{Sc}_3\text{Mn}_3\text{Al}_7\text{Si}_5$ です [2]。図 1 に示す結晶構造の通り、Mn-Mn 間をつなぐとカゴメネットワークを見出すことができます。先行研究[2]では、磁化測定から磁気的性質を持っており、電気抵抗測定から遍歴性も併せ持つことが報告されていました。また、2 K 以下の低温まで磁気秩序など明らかな相転移の兆候は見られないものの、電気抵抗が 50 K 程度で極小となり、さらに低温では徐々に抵抗が増加するという、典型的な金属とは明らかに異なる振る舞いを示します。

このような特徴的な環境で実現する電子状態の謎を解明するため、私たちの研究室では核磁気共鳴 (NMR) 分光法を用いて基底電子状態を観測しました。NMR 測定は原子核が持つ核磁気モーメントをマイクロな磁気プローブとして用いることで、原子核を取り巻く電子の状態を観測する実験手法です。局所的な電子状態を観測することで、非常に弱い磁気秩序や、状態密度に現れる部分的なギャップなどを高感度に検出することができます。単結晶試料を用いた詳細な実験の結果、低磁場では状態密度に部分的にギャップが現れていることが明らかになりました。これは、特徴的なカゴメ金属バンドの一部が消失していることを示唆しています。この結果により、電気抵抗が低温で極小値を取る原因が明らかになりつつあります。このような状態密度に現れるギャップは、超伝導の実現を阻害している可能性が考えられます。強磁場や圧力を用いてこのギャップを抑制することで、超伝導の発見、またはカゴメ金属バンド特有の新しい電子基底状態の実現が期待されます。

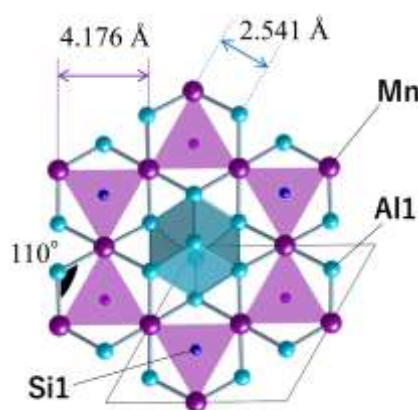


図 1: $\text{Sc}_3\text{Mn}_3\text{Al}_7\text{Si}_5$ の結晶構造の模式図。Mn をつなぐことでカゴメネットワークを見出すことができる。Mn が作る 2 次元のカゴメ面と Sc 面が交互に積層した構造を持つ。

参考文献

- [1] B. R. Ortiz, et al., *Phys. Rev. Material* **3**, 094407 (2019), *Phys. Rev. Lett.* **125**, 247002 (2020).
 [2] H He, et al., *Inorg. Chem.* **53**, 9115-9121 (2014).

研究室 HP: <https://www2.sci.hokudai.ac.jp/faculty/researcher/yoshihiko-ihara>

FeSe 超伝導体における非相反伝導現象

B01 班 塩見 雄毅

私はもともと磁性やスピントロニクスの実験研究を専門としていますが、後期の公募研究から量子液晶の本丸と言っても良いであろう FeSe 超伝導体に手を出しました。隣の研究室である前田京剛先生の研究室が FeSe 超伝導体薄膜を作製し研究しており、前田先生は今年度定年退官されることから、共同研究するなら今しかないと思ったのもあります。ただやってみると、試料の劣化が早くてなかなか信頼性のあるデータがとれず、非常に大変というのが正直な実感です。

私が今回測定している非相反伝導現象は、一見すると難しい言葉でわかりづらいですが、右向きに電流を流したときと左向きに電流を流したときで電気抵抗が異なる現象を指します。このような非対称な電気伝導は半導体の PN 接合における整流効果が有名な例ですが、均質な一つの固体中で非相反伝導現象を観測するには、空間反転対称性と時間反転対称性の両方が破れていないといけなことが知られています。FeSe 超伝導体薄膜においては、基板や保護層との界面で空間反転対称性が破れるので、外部磁場で時間反転対称性を破ってやれば非相反伝導現象が観測できる可能性があります。もともと私の研究室の助教であった横内氏(2023 年 11 月に転出)が学生時代に非相反伝導現象の測定をやっていた[1]ので、彼の力を借りてやり始めたというのが正直なところではあります。

途中の紆余曲折は省きますが、結果として、私たちは超伝導転移近傍で非相反伝導現象を観測することに成功しました(図 1)。ここで、非相反伝導現象においては電流端子に流す電流方向を逆にしたときの電圧信号の差を観測すればよいことになります。比較的大きな電流が必要になる一方で、FeSe 薄膜の超伝導転移温度が低く、不慣れな 2 K 前後の低温での測定となり苦労しました。

超伝導転移近傍での非相反伝導現象は既にいくつか報告例があり[2-4]、それ自体には新しさはありません。一体 FeSe らしさはどこにあるのでしょうか。それを今まさに追及しているところですが、一つの可能性は電流強度依存性や磁場角度依存性に見られる符号変化です。どうも FeSe 超伝導体薄膜における非相反伝導現象には、正符号をもった成分と負符号をもった成分の 2 つの寄与があるようで、私たちのデータの特徴となっています。この符号の異なる 2 成分の起源を追求するために領域内外の色んな方の力をお借りして頑張っているところです。

参考文献

- [1] T. Yokouchi, N. Kanazawa, A. Kikkawa, D. Morikawa, K. Shibata, T. Arima, Y. Taguchi, F. Kagawa, and Y. Tokura, *Nature Communications* **8**, 866 (2017). [<https://doi.org/10.1038/s41467-017-01094-2>]
 [2] J. Lustikova, Y. Shiomi, N. Yokoi, N. Kabeya, N. Kimura, K. Ienaga, S. Kaneko, S. Okuma, S. Takahashi, and E. Saitoh, *Nature Communications* **9**, 4922 (2018). [<https://doi.org/10.1038/s41467-018-07352-1>]
 [3] M. Masuko, M. Kawamura, R. Yoshimi, M. Hirayama, Y. Ikeda, R. Watanabe, J. J. He, D. Maryenko, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, N. Nagaosa, and Y. Tokura, *npj Quantum Mater.* **7**, 104 (2022). [<https://doi.org/10.1038/s41535-022-00514-x>]
 [4] Y. M. Itahashi, T. Ideue, Y. Saito, S. Shimizu, T. Ouchi, T. Nojima, and Y. Iwasa, *Sci. Adv.* **6**, eaay9120 (2020) [DOI: 10.1126/sciadv.aay9120]

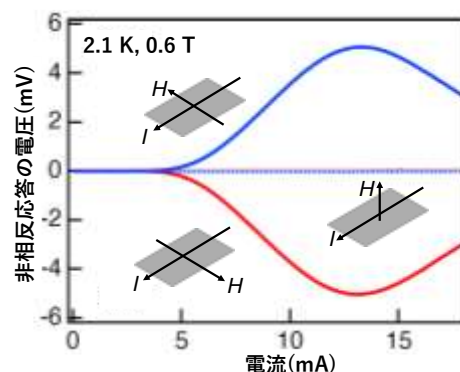
研究室 HP: <https://yukishiomi.com/>

図 1: FeSe 超伝導体薄膜(厚さ約 30 nm)における非相反伝導に由来する電圧信号。対称性の要請により、信号が見える磁場方向と見えない磁場方向がある。

π 電子の量子液晶を求めて

B01 班 今城 周作

「量子液晶」ニュースレター Vol.7、Vol.9 では、電子対液晶の一つとして強磁場下で生じる特異な超伝導状態である Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態の研究について紹介しました。FFLO 状態では秩序変数がある方向に空間的に変調するために、通常の均一な超伝導状態（電子対流体）と比べると回転対称性を破った電子対液晶として考えられます。この研究では FFLO 状態の発現に有利な条件を有する候補として有機物の π 電子に注目し、実際に FFLO 状態への相転移や、FFLO 状態のみで実空間上での異方性の出現を確認しました[1]。磁場によるゼーマンエネルギーと対形成の形成エネルギーの拮抗が新たな量子液晶状態の発現の鍵となることを明らかとし、超伝導に限らず様々なスピンスピングレットの量子状態における新奇液晶状態の提案へと繋がりました。

しかし、有機物は分子形状・分子配列などの分子自由度に依存した多彩な電子状態を示す利点がある一方で、分子自由度によって対称性が破れることで低対称な結晶構造となる場合が多いという点もあります。そのため、電子的な相転移が生じて、低対称な π 電子が正確な意味での量子液晶状態になることは困難です。そこで本研究の発展として、結晶の対称性の高い π 電子系で磁場によるゼーマン効果が電子系の不安定性によって新たな量子液晶を生む可能性を探索してみたいと考えました。

電子の固体・液体はそれぞれ絶縁体・金属と対応します。つまり、金属—絶縁体転移を引き起こす過程で、中間相が現れたら量子液晶である可能性があり、エネルギー的に拮抗した中間相を発見するには、電子系に多体効果が強く働いた非自明な電子状態が有利と予想されます。そこで、非自明な液体・固体転移の代表として、ある条件で「液体を温めると固体になる」という一般的な感覚と真逆の現象を起こす ^3He が思い浮かびます。これは Pomeranchuk 効果と呼ばれ、核スピンの磁気エントロピーが起源となっています[2]。そこで電子の Pomeranchuk 効果の探索として (DMe-DCNQI) $_2$ Cu という高い対称性をもった強相関配位高分子に注目しました。実際に ^3He と同様に Pomeranchuk 効果を示すため、Pomeranchuk 効果を示す領域における磁場印加による量子液晶状態の探索に挑戦しました。

この物質は 8 つの水素原子を有し、それらを重水素化することで基底状態を金属から絶縁体と変化させることができます。まずは完全な重水素体である (d8-DMe-DCNQI) $_2$ Cu に対して強磁場中での電気抵抗測定を行うことで、磁場による電子の液体—固体転移の検証を行いました。図 1 左に示すようにヒステリシスを伴った劇的な金属—絶縁体転移を検出することに成功しました。これにより図 1 右のような液体・固体の磁場による競合関係を明らかにできました。

重水素量を減らした (DMe-DCNQI) $_2$ Cu の測定も既に行っており、Pomeranchuk 効果を示す領域での磁場誘起の金属—絶縁体転移の観測に成功し、Pomeranchuk 効果に対するゼーマン効果の影響が初めて実験的に明らかとなりました。今回得られた結果は磁場によって誘起される新しい量子液晶状態の探索や他の量子液晶状態との共通点を議論する上で重要な鍵となると考えています。

参考文献

[1] S. Imajo et al., *Nat. Commun.* **13**, 5590 (2022). [<https://doi.org/10.1038/s41467-022-33354-1>]

[2] R. C. Richardson, *Rev. Mod. Phys.* **69**, 683 (1997). [<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.69.683>]

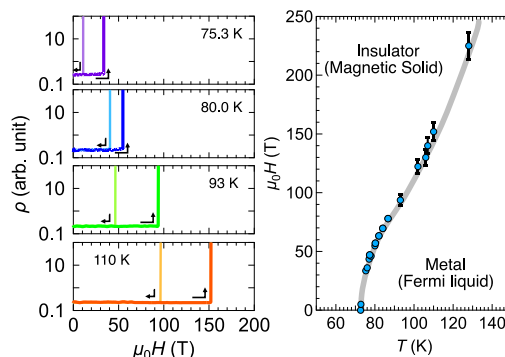


図 1 左：各温度における (d8-DMe-DCNQI) $_2$ Cu の電気抵抗の磁場依存性。右：得られた磁場温度相図。絶縁体(固体)相と金属(液体)相が磁場によって競合しているのが分かる。

研究室 HP: <https://kindo.issp.u-tokyo.ac.jp/>

今城周作（東京大学・物性研究所・特任助教）

分子自由度をもつ量子磁性体の強磁場誘起相の開拓

B01 班 石川 孟

本公募研究では、1. スピン自由度がつくる量子液晶の例であるスピネマティック状態をパルス強磁場中における磁化測定と磁歪測定を通じて調べる、2. この方法をハニカム格子スピン液体候補物質に適用して磁気相関を調べる、という 2 つの目標を立て、研究に取り組みました。

1 に関しては、二次元磁性体ボルボサイト $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の単結晶を合成し、ピックアップコイルによる磁化測定と FBG (ファイバーブラッググレーティング)法を用いた磁歪測定に取り組みました。ボルボサイトは 30 テスラ以上で 1/3 プラトーを示し、その近傍でスピネマティックが現れると言われています [1]。磁歪測定では、試料を回折格子が刻まれた光ファイバーに強く接着する必要があります。今回は磁場に平行な磁歪と垂直な方向の磁歪を測ることを目指したので、パルス磁場の発生する狭い空間でファイバーを曲げ、割れやすい試料を接着して再現性のあるデータを取ることに多くの試行錯誤を要しました。最終的に 1 K 程度の低温でデータを取ることが出来ました。運よくスピネモデルの主軸に伸びた結晶を得ることが出来たため、これまで測定できなかった 3 方向の縦磁歪と 2 方向の横磁歪を測定することが出来ました。特に、横磁歪に興味深い異方性が観測されました。

2 に関しては、4f 電子ハニカム格子磁性体のヨウ化サマリウムを念頭に置いていました。実際に試料を作ってみると、0.1 ケルビンまで磁気秩序の兆候がない大変興味深い物質であることが分かりました [2]。しかし、1 K 以下の極低温から磁気相関が発達することや、接着剤と試料が反応してしまうという、パルス強磁場での研究が難しい物質であることが分かりました。そこで、新たなハニカム格子系を探すことにしました。せっかくなのでやったことのない合成法を行おうと思い、ソルボサーマル法で作ることのできる物質でハニカム格子をもつ系である $[(\text{CH}_3)_2(\text{NH}_2)]_3[\text{Cu}_3(\text{OH})(\text{SO}_4)_4] \cdot 0.24\text{H}_2\text{O}$ と $[(\text{CH}_3)_2(\text{NH}_2)_3(\text{SO}_4)]_2[\text{Co}_2(\text{COO})_3]$ に着目しました。前者では、Cu のスピンの三角形からなるハニカム格子が、後者では Co イオンがハイパーオクタゴンという三次元ハニカム格子を形成しています。いずれの物質もパルス磁場中で飽和に至る全磁化過程を観測することが出来、様々な磁場誘起相を観測することが出来ました [3,4]。

今回着目した物質は、磁性を担う無機物質に近い構造と、水やジメチルアンモニウムといった分子が共存するという特徴があります。このような物質では、単純な無機物質では実現できない磁性ネットワークが実現することや、純粋な有機分子磁性体に比べて乱れが少ないという、磁性研究に最適な特徴があると考えています。また、 $[(\text{CH}_3)_2(\text{NH}_2)_3(\text{SO}_4)]_2[\text{Co}_2(\text{COO})_3]$ では 10 K における磁気秩序に先立って、常磁性領域の 120 K と 18 K に何らかの相転移が存在することが分かりました。これらの相転移の起源は現時点で分かっていませんが、単純な磁気秩序でないことから、液晶的な電子、または分子の秩序が形成されていると考えています。以上のように、パルス強磁場での磁性研究に加え、新物質の提案という点で領域の研究に貢献することができたと考えています。新学術領域に参加させていただいた 2 年間では、研究会への参加や共同研究を通じて、多くの方々に大変お世話になりました。この場を借りてお礼を申し上げます。今回の経験を活かし、今後もパルス強磁場と新物質開発を軸に新しい電子物性を開拓していきたいと思えます。

参考文献

[1] H. Ishikawa et al. Phys. Rev. Lett. **114**, 227202 (2015). [2] H. Ishikawa et al. Phys. Rev. Materials **6**, 064405 (2022). [3,4] H. Ishikawa et al. *under review*.



図：FBG 磁歪測定 の試料環境 (左)。
 $[(\text{CH}_3)_2(\text{NH}_2)]_3[\text{Cu}_3(\text{OH})(\text{SO}_4)_4] \cdot 0.24\text{H}_2\text{O}$ (右上) $[(\text{CH}_3)_2(\text{NH}_2)_3(\text{SO}_4)]_2[\text{Co}_2(\text{COO})_3]$ (右下) の単結晶の写真。

研究室 HP: <https://mgsl.issp.u-tokyo.ac.jp>

石川孟 (東京大学・物性研究所・助教)

量子液晶の示す対称性破れ現象を光技術でとらえることができるか？

B01 班 米澤 進吾

「量子液晶」領域には前後期の公募研究で 4 年間にわたってお世話になりました。この 4 年間、私は特に量子液晶物質の示す対称性の破れを、特に光技術で測定するという研究に取り組んできました。

量子液晶の典型として、電子ネマティック状態やネマティック超伝導状態といった、電子系が回転対称性を破る状態が挙げられます。このような回転対称性の破れを、光ファイバーを使ったひずみゲージである Fiber Bragg grating (FBG) を使って測定するというのが前半 2 年間の課題でした。FBG とは光ファイバーのコア内に作られた屈折率の周期的な変調のことで、ここに光を導入すると変調周期に対応したブラッグ波長の光が反射されます。FBG を試料に張り付けると試料の伸縮に応じて FBG の周期も伸縮し、結果的にブラッグ波長が変化します。この波長変化は精密に測定できますので、そこから試料に生じたひずみを算出できます。我々は、この技術を用いてネマティック超伝導体 $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の自発的な異方ひずみを観測することを目指しましたが、残念ながら観測可能な大きさの異方的ひずみは観測することができませんでした。しかし、その後、この手法を磁性体に適用して、現在は磁場下や電流下で起こる新奇ひずみ応答の研究を進め、強磁性体 URhGe におけるピエゾ磁気効果の発見[1]などの成果が出つつあります。

また、回転対称性の破れは、図 1 に示すように、時間反転対称性の破れ (Time-reversal symmetry breaking; TRSB) と表裏一体の関係を持っています。TRSB とは、仮想的に時間を逆回しにしたときに元の状態と一致しないという性質であり、典型的には強磁性のように磁化が自発的に生じた状態が該当します。光の世界では、回転対称性を破った直線偏光と、時間反転対称性を破った円偏光は線形結合の関係にありますし、超伝導の世界でも回転対称性を破ったネマティック超伝導と時間反転対称性を破ったカイラル超伝導は互いに線形結合で結ばれる関係にあります。後期は、このカイラル超伝導に代表されるような量子液晶物質における TRSB を光検出できる超高感度磁気光学カー効果の測定に取り組みました。この手法の開発は光の素人であった当研究室にとってかなりチャレンジングでしたが、共同研究者からの助けも借りつつ、 10^{-6} rad を切るような分解能を達成することができました。そして領域後半の大きなテーマの一つとなったカゴメ物質 CsV_3Sb_5 の電荷密度波状態が TRSB を示すことを示唆する結果を得ることができました[2]。この結果については、他グループから否定的な結果も出たため、現在試料依存性などを含め吟味を進めています。

光を使った研究以外にも従来から得意としているバルク測定研究も行い、 $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のネマティック超伝導の一軸ひずみ制御[3]や、 CsV_3Sb_5 の超伝導状態の比熱測定による「創発的対称性の破れ」[4]といった、量子液晶物質における興味深い対称性破れ現象を明らかにしました。

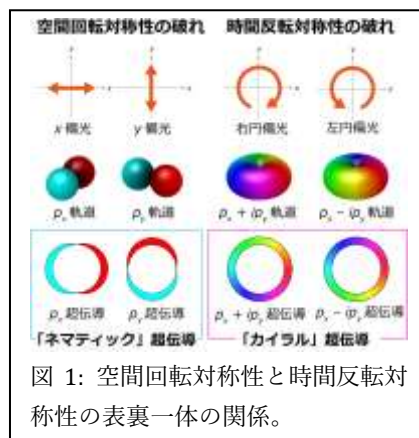
この 4 年間で、光を使った測定技術による固体物理の新展開へ向けた一步を踏み出すことができました。また、私は 2023 年度より京都大学の理学研究科から工学研究科へと異動しましたが、その際も領域の研究費に非常に助けいただきました。現在は新しい環境で、応用も視野に入れた物性科学の研究を進めるべく研究室の整備を進めています。改めて、4 年間のご支援に大変感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Tomikawa, S. Yonezawa *et al.*, in preparation.
- [2] Y. Hu, S. Yonezawa *et al.*, arXiv: 2208.08036.
- [3] I. Kostylev, S. Yonezawa *et al.*, Nature Commun. **11**, 4152 (2020). [DOI: 10.1038/s41467-020-17913-y]
- [4] K. Fukushima, S. Yonezawa *et al.*, arXiv:2303.11072.

研究室 HP: <https://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/>

米澤進吾 (京都大学・工学研究科・教授)



量子スピ液体における回転対称性の破れとトポロジカル相転移

B01 班 末次 祥大

物質中の局在スピンは絶対零度において通常は強磁性や反強磁性などの秩序状態を示します。しかし、強い量子ゆらぎやフラストレーションが存在する系では局在スピンが絶対零度においても液体のように関連しながら揺らいでいるといった、スピンの”液体”状態を実現することがあります。このような量子スピ液体では本来のスピンが持つ自由度があたかも分裂したかのように振る舞い(分数化)、風変わりな性質を持った低エネルギー励起(準粒子)が現れます。

その中でもハニカム格子上的スピンがボンド方向に依存したイジング型の相互作用をするキタエフ模型[1]は厳密な基底状態として量子スピ液体を実現するため大きな注目を集めています。キタエフスピ液体では局在スピンの自由度がマヨラナ粒子といった、自らが自身の反粒子として振る舞う風変わりな粒子に分数化するという非常に興味深い性質を持ちます(図 1)。

このキタエフスピ液体はスピン軌道モット絶縁体で実現できると提案[2]されており、有力な候補物質として α -RuCl₃ が知られています。この物質は $J_{\text{eff}} = 1/2$ のモーメントを持った Ru³⁺イオンによって形成された二次元ハニカム格子が積層した結晶構造を取ります。最近、この α -RuCl₃ のスピ液体状態において熱ホール伝導度が半整数量子化を示すことが報告されました[3]。これはマヨラナ粒子のカイラルエッジ流が存在することを支持する結果であり、有限のチェーン数を持ったトポロジカル量子スピ液体相を実現していることを示唆しています。さらに、磁場中のキタエフ量子スピ液体は磁場角度によってトポロジカル相転移を誘起できることが示されており、マヨラナ粒子のカイラルエッジ流の向きが反転することが期待されています。

以上のように α -RuCl₃ は磁場角度でトポロジを制御する格好の舞台であり、この公募研究では熱ホール効果の磁場角度依存性を測定することでトポロジカル相転移について調べました。今回の測定結果から、磁場角度がハニカム格子のボンド方向を横切るときに熱ホール伝導度の符号変化し、チェーン数の符号変化を伴うトポロジカル相転移が誘起されていることが明らかとなりました(図 2)。さらに、共同研究者の比熱の磁場角度依存性の測定から、バルクの磁気励起についてはフェルミオンのトポロジカル相転移を示すギャップの開閉が生じていることも明らかとなりました。以上の結果は熱ホール効果の起源がマヨラナ粒子のカイラルエッジ流に由来することの強い証拠となっています。

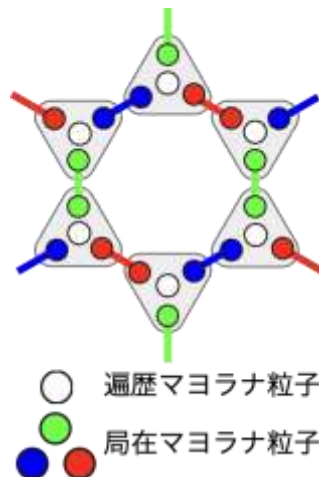


図 1: キタエフ模型におけるマヨラナ粒子の分数化

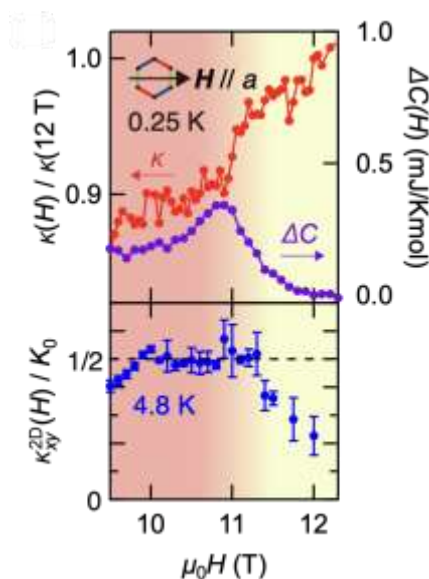


図 2: 一次相転移と熱ホール伝導度[5]

- [1] A. Kitaev, *Annals of Physics* **321**, 2 (2006).
- [2] G. Jackeli and G. Khaliullin, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 017205 (2009).
- [3] Y. Kasahara *et al.*, *Nature* **559**, 227 (2018).
- [4] O. Tanaka *et al.*, *Nat. Phys.* **18**, 429–435 (2022).
- [5] K. Imamura, S. Suetsugu *et al.*, arXiv:2305.10619 (2023).

3色超格子における超伝導ダイオード効果の探索

B01 班 浅場 智也

我々の身近にある、金属や絶縁体といった物質を研究する分野を物性物理学といい、その内容は多岐にわたります。その中でも、一番ドラマティックな現象の一つが超伝導であることは間違いありません。超伝導とは物質の抵抗値がゼロになる現象であり、1911年にカメリン・オンネスによって発見されました。超伝導状態にもなると、磁気浮上に使えるマイスナー効果や、電圧の基準を規定するジョセフソン効果など、基礎的にも応用的にも重要なさまざまな現象が発現します。この超伝導体の研究における現代の最重要課題として、高温超伝導体の超伝導機構解明やトポロジカル超伝導の実現といったものが挙げられますが、それらと並んで重要な課題となっているのが「BCS理論を超える有限運動量超伝導状態の実現」です。

超伝導の基礎的な理解は、1957年、バーディン、クーパー、シュリーファーの3名によってなされました（BCS理論）。この理論では、超伝導状態は、運動量とスピンの正反対である2つの電子がペアを組み（クーパーペア）、ひとつの粒子のように振る舞うことで実現します。しかし、この理論の枠組みを超える超伝導状態として、2つの電子の運動量の和がゼロではない（すなわち有限の）超伝導状態も理論的に提案されています。本研究ではその一つ、「ヘリカル超伝導」について着目しました。

これまでの研究で、ヘリカル超伝導状態はCeCoIn₅、YbCoIn₅、YbRhIn₅を交互に積層させた超格子において実現しているのではないかと考えられてきましたが [1]、実験手法が限られることから、その決定的な証拠を掴むことは困難でした。しかし最近、この系では「超伝導ダイオード効果」が発現している [2]、それを測定することでヘリカル超伝導状態を判別することができる、ということが理論的に提唱されました。超伝導ダイオード効果とは、超伝導体において電流方向を変化させると超伝導臨界電流もそれにもなると変化し、ある方向に電流を流すと超伝導状態なのに逆方向だと超伝導状態が破壊され、常伝導状態になる現象のことです。

本研究では、CeCoIn₅/YbCoIn₅/YbRhIn₅の三色超格子を作製し、その超伝導ダイオード効果を測定しました [3]。その結果、超伝導ダイオード効果は磁場を面内のどの方向にかけるかに依存し、特に低温高磁場でその効果が增强されることを発見しました。これは、低温高磁場領域においてクーパーペアが有限運動量を持っている、すなわちヘリカル超伝導状態が実現している可能性が高いことを示しています。さらに、二色超格子ではこのような超伝導ダイオード効果の增强は見られず、三色超格子の結果が外因的な要素によるものではないことも明らかになりました。これらの結果は、従来の超伝導理論を超えた超伝導状態の創発を示しており、今後のさらなる研究に期待がかかります。

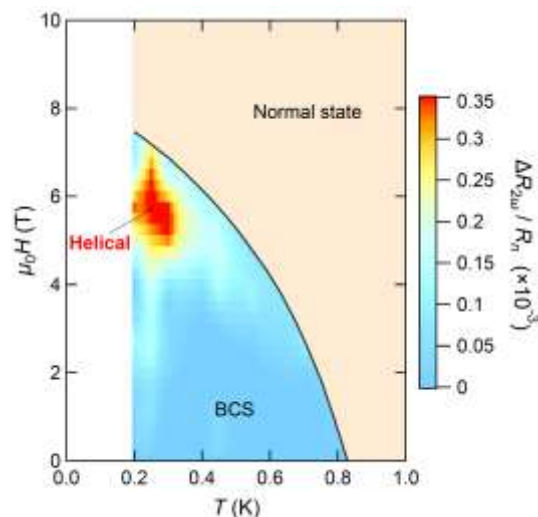


図 1: 三色超格子の超伝導ダイオード効果。低温高磁場において新奇相が創発しているのわかる。

- [1] M. Naritsuka et al., Phys. Rev. B **96**, 174512 (2017).
 [2] Akito Daido, Yuhei Ikeda, and Youichi Yanase Phys. Rev. Lett. **128**, 037001 (2022).
 [3] T. Asaba et al., submitted.

研究室 HP: <https://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.php/>

浅場智也 (京都大学・理学研究科・特定准教授)

電子ネマティック状態のドメイン構造の観測: 異方性から生まれた縞模様

B01 班 中島 正道

固体中の電子間に働く相互作用は、時として思いもよらない秩序状態を生み出します。電子集団が結晶格子にはない方向性を獲得した「電子ネマティック状態」も、そのような状態の一つです。この状態では、電子系が同一の方向性を持つドメインが形成され、その構造が模様として現れると考えられます。電子ネマティック状態の舞台となる鉄系超伝導体では、電子系が方向性を獲得する際に結晶格子を巻き込んで、正方晶から直方晶への構造相転移が起こります。低温の直方晶相で生じるドメイン構造を調べることは、電子ネマティック状態の理解には不可欠です。しかし、どのようなドメイン構造が現れているのか、これまでは統一的な見解が得られていませんでした。

私たちは、電子ネマティック状態に現れるドメイン構造の可視化を目指し、光学反射率の空間イメージング測定が可能な装置の構築を進めてきました。電子系が方向性を持つということは、その方向と直交する方向とで電子状態が異なることを意味しています。つまり、偏光方向が 90 度異なる光に対する反射率の差が、異方性の良い指標として使えます。私たちの光学測定システムでは、1 μm 程度の位置分解能で空間イメージング測定が可能です。この装置を用いて、鉄系超伝導体の代表的な母物質であり、136 K で正方晶から直方晶への構造相転移を示す BaFe_2As_2 に対して測定を行いました。

測定の結果、直方晶相ではドメイン構造が縞模様として観測されることが分かりました (図 1)。この縞模様は、長さの異なる a 軸と b 軸が周期的に入れ替わっていることを示しています。用いた光の波長は 820 nm で、 b 軸方向のほうが高い反射率を示しますので [1]、各ドメインにおける結晶構造も分かります。縞の方向が変わる場所 (右下の領域) では縞模様の間隔が乱れていますが、そこから離れた場所では周期は約 4 μm でほぼ一定となっており、 BaFe_2As_2 の本質的なドメイン構造を見ていると考えられます。この周期は P 置換した $\text{BaFe}_2(\text{As},\text{P})_2$ よりも長く [2]、電子状態が空間変調する長さには物質ごとに決まった値があることが推測されます。縞模様の間隔の決定因子を突き止めることは今後の課題ですが、本研究で明らかになったドメイン構造は、電子ネマティック状態の理解と制御につながる重要な知見となっています。

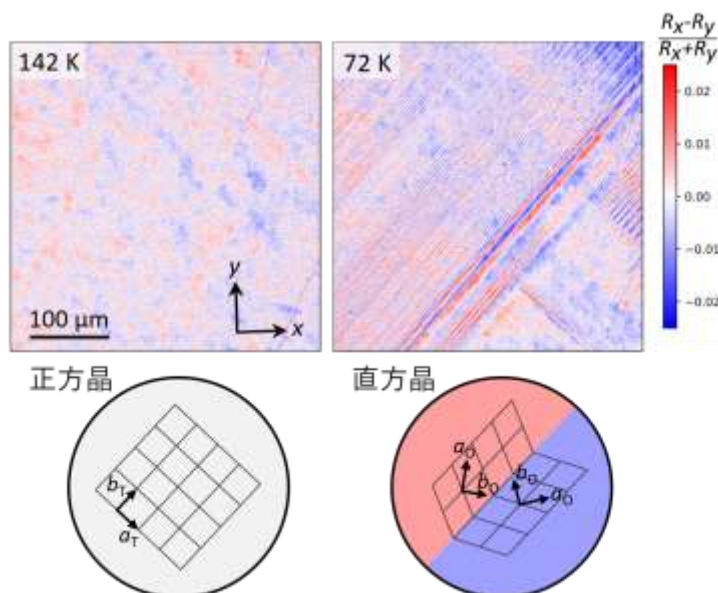


図 1: 鉄系超伝導体の母物質 BaFe_2As_2 に対する、反射率の異方性の空間イメージング。測定には、波長が 820 nm の光を用いた。構造相転移温度 (136 K) 以下の 72 K では、ドメイン構造に由来する縞模様が見える。図の下側には、正方晶から直方晶への構造相転移が起こる際の結晶格子の変化を模式的に示している。

参考文献

- [1] M. Nakajima, T. Liang, S. Ishida, Y. Tomioka, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Kakeshita, T. Ito, and S. Uchida, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **108**, 12238–12242 (2011). [<https://doi.org/10.1073/pnas.1100102108>]
 [2] T. Shimojima, Y. Motoyui, T. Taniuchi, C. Bareille, S. Onari, H. Kontani, M. Nakajima, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and S. Shin, *Science* **373**, 1122–1125 (2021). [<https://doi.org/10.1126/science.abd6701>]

スピン三重項超伝導状態における電子対液晶状態の磁場による制御 Manipulating the nematic director by magnetic fields in the spin-triplet superconducting state of $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$

B01 班 鄭 国慶 (B01 Guo-qing Zheng)

Electronic nematicity, a consequence of rotational symmetry breaking, is an emergent phenomenon in various new materials. Skyrmion spin textures of magnets, the normal state of iron-pnictides, the superconducting states of spin-triplet superconductors [1] and magic-angle graphene are nematic.

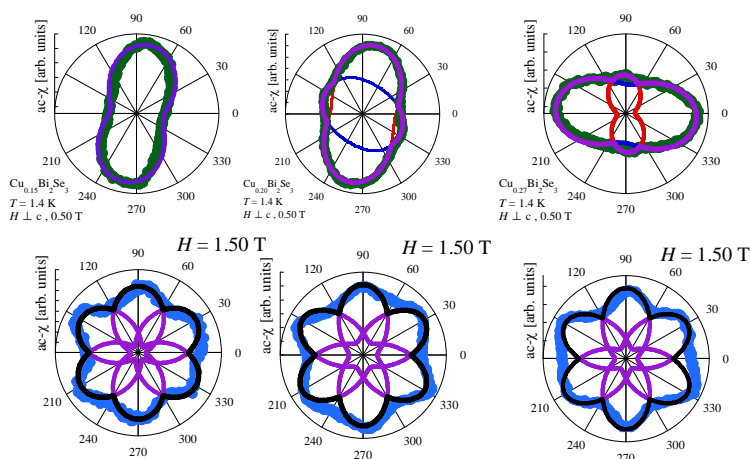


Figure 1 : Polar plot of the magnetic susceptibility in the superconducting state under different magnetic fields.

In order to fully utilize the functions of these materials, ability of tuning them through a knob, the nematic director, is desired. Here we report a successful manipulation of the nematic director, the vector order parameter (\mathbf{d} vector), in the spin-triplet superconducting state of $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ($x=0.15-27$) by magnetic fields [2]. At a field $H=0.5$ T, the ac susceptibility related to the upper critical field shows a twofold symmetry in the basal plane, but the nematic director is tilted away from the high-symmetry axis (upper panels of the figure). This can be understood as due to pinned \mathbf{d} vector coupled to phonons. At $H = 1.5$ T, however, the susceptibility shows a six-fold symmetry, which has never been reported before in any superconductor. These results indicate that the \mathbf{d} vector initially pinned to a certain direction is unlocked by a threshold field to respect the symmetry of the hexagonal basal plane (trigonal symmetry of the primitive cell). We further reveal that the superconducting gap in different crystals converges to p_x symmetry at high fields, although it differs at low fields.

[1] K. Matano, M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando, G.-q. Zheng, Nat. Phys. 12, 852(2016).

DOI : [10.1038/nphys3781](https://doi.org/10.1038/nphys3781)

[2] M. Yokoyama, H. Nishigaki, S. Ogawa, S. Nita, H. Shiokawa, K. Matano, and G.-q. Zheng, Phys. Rev. B **107**, L100505 (2023). DOI: [10.1103/PhysRevB.107.L100505](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.107.L100505)

研究室 HP: https://www.physics.okayama-u.ac.jp/zheng_homepage/

鄭国慶 (岡山大学・学術研究院・教授)

希土類化合物における量子液晶の発現と「悪魔の階段」へ導く機能性の解明

B01 班 黒田 健太

本公募研究では、希土類化合物 CeSb が示す「悪魔の階段」と呼ばれる相転移現象の機構に注目した研究を行いました。この相転移の特徴として、長周期の反強磁性秩序が微小な温度変化で逐次的に変化するだけでなく [1], Ce 4*f* 結晶場軌道が立方晶から正方晶へ変化する異方的な軌道秩序を示します [2]。この現象は 40 年以上も長く研究が行われてきましたが、この現象を導く機構の解明には未だ至っていません。そこで、この機構解明へアプローチする本研究独自の手法として、CeSb の系統物質である CeAs/CeBi の比較を行う観点で研究を進めてきました。CeX (X: P, As, Sb, Bi) は全て低温で反強磁性秩序を示しますが、なぜか周期表のプニクトゲンで中途半端な位置にある Sb を含む CeSb だけが「悪魔の階段」が発現します (図 1)。さらに、CeSb/CeBi の結晶場は T_N 以下で正方晶を示す一方で、CeP/CeAs は立方晶のまま反強磁性へ転移するため、CeAs/CeSb では異なる対称性が拮抗する境界近傍にあるため「悪魔の階段」を導く機構の鍵となると言えます。

私の研究グループでは、角度分解光電子分光 (ARPES) に加えて、レーザーラマン分光、非弾性 X 線散乱分光を行い、CeAs/CeSb/CeBi を多自由度の視点 (遍歴電子, 4*f* 結晶場軌道, フォノン) から精密に調べました。その結果、最も顕著な違いが電子・フォノン結合にあることを発見しました。この違いは縦光学 (LO) フォノンの分散関係の温度変化として現れます (図 2)。その温度変化が CeSb/CeBi でほとんど観測されない一方で、CeAs では非常に顕著になります。CeAs だけで観測されたこの温度変化は、CeAs で電子・フォノン結合が低温で発達することを示しており、CeAs は CeSb/CeBi に比べてキャリア数が少なく (フェルミ面が小さく [3]) 遮蔽効果が弱くなる結果として、伝導電子と LO フォノンの結合が低温で発達していると説明できます。したがって、CeAs/CeSb/CeBi の背後にある電子相関機構の違いにはキャリア数が重要な要素になっていることが、本研究で行った系統の実験で明らかとなりました。CeBi は多数キャリアの伝導電子と局在 4*f* 電子の相互作用によって正方晶の 4*f* 結晶場軌道へ転移する [4] ことに対して、少数キャリアである CeAs はこの相互作用の効果が不十分で立方晶を維持します。その間である CeSb ではこの両者が拮抗する結果として「悪魔の階段」と軌道秩序が発生していると言えます。

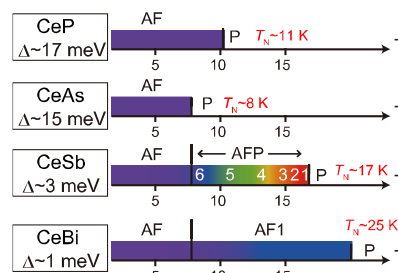


図 1: CeX の磁気相図と常磁性相における結晶場分裂 (Δ)。CeSb だけが異常な振る舞いを示す。

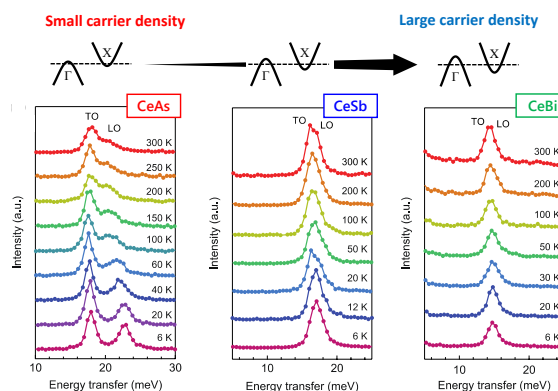


図 2: CeAs/CeSb/CeBi で得られた非弾性 X 線散乱スペクトルの結果 [Γ 点近傍 $Q=(0.1, 0.1, 0.1)$]。CeAs の縦光学フォノン (LO) が低温で大きく変化している様子がわかる。

参考文献

- [1] J. Rossat-Mignod *et al.*, *Phys. Rev. B* **16**, 440 (1977).
- [2] K. Iwasa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 207201 (2002).
- [3] K. Kuroda *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 086402 (2018).
- [4] T. Kasuya *et al.*, *Physica B* **186**, 9 (1993).

研究室 HP: <https://srphys.hiroshima-u.ac.jp/>

黒田健太 (広島大学・先進理工系科学研究科・准教授)

磁場中での鉄系超伝導体の層間抵抗測定

B01 班 寺嶋 太一

鉄系超伝導体は、鉄原子が砒素原子にサンドイッチされた層が電気伝導を担い、この鉄砒素層が電気を流しにくい層と交互に c 軸方向に積層します。このため、層方向と層間方向では電気抵抗率が 10-100 倍以上違います。室温付近で鉄砒素層は等方的で、層内どの方向でも電気抵抗率は同じです。温度を下げると、鉄砒素層が室温直方晶の [110] または等価な [1-10] 方向にごく僅かに伸び、伸びた方向が低温斜方晶の a 軸となる構造相転移が起きます。斜方晶 a 軸と (直交する) b 軸の長さの違いはごく僅かですが、電気抵抗には顕著な違い (異方性) が生じます。このため相転移の主役は電子系で結晶格子はそれに引きずられているだけだと考えられています。このような転移を電子ネマチック転移と呼びます。ネマチックとは液晶の用語で、細長い液晶分子が長さ方向を揃えて並んだ状態を示します。今の場合、電子が特定の方向に整列したような状態が生じたという意味で電子ネマチックと呼びます。

私は、鉄系超伝導体の色々な方向に磁場をかけて層間抵抗を測ることにより、電子ネマチック状態の異方性を調べることを目指しました。磁場があると、電子はローレンツ力のためまっすぐ進むことはできません。このため、かける磁場の向きに応じて、層間抵抗にも伝導層内の電子状態の異方性が反映されるはずですが、ただし、一つ実験上の問題があります。普通に試料を冷やすと、試料のある部分では [110] 方向が、別の部分では [1-10] 方向が伸び、それぞれ斜方晶 a 軸となります。結果として、試料は a 軸の向きの異なるドメインが混じった状態になり異方性が現れません (ツイングが入った状態)。これを避けるため、試料を直方晶 [110] 方向に長い長方形に成形し、両端を PEEK 樹脂に固定します (図 1)。冷やすと PEEK は試料より縮むので、転移に際し試料は固定された方向に伸びることはできず、試料全体でそれと垂直方向に伸び、そちらが a 軸となります。これをデツイングと言います。



図 1. PEEK 樹脂に固定した試料。

最初に CaFeAsF で測定を行いました [1]。この物質は超伝導になりませんが、Fe を Co で一部置換すると超伝導が出現するため母物質と呼ばれます。図 2 は、一定磁場を鉄砒素層に平行にかけた時の層間抵抗を、磁場の面内方位 ϕ の関数として示してあります。磁場が a 軸方向と b 軸方向で顕著な違いが現れます。通常バンド計算に基づく理論計算で実験結果を定性的には説明できましたが、観測された異方性は計算より非常に大きく、通常バンド計算を越えた電子ネマチック状態の影響が現れていると考えられます。

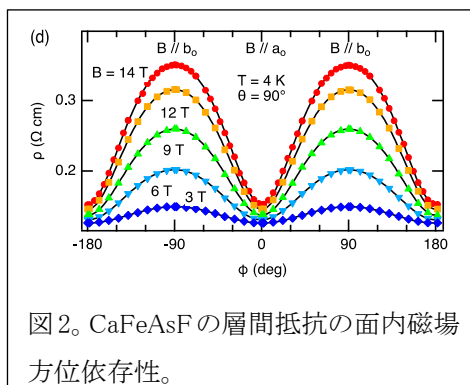


図 2. CaFeAsF の層間抵抗の面内磁場方位依存性。

CaFeAsF では低温で反強磁性秩序も生じるため、観測された異方性にはその影響もあるかもしれません。そこで、反強磁性を示さず純粋なネマチック状態になる FeSe でも測定をすることにしました。ところが、FeSe ではデツイングする前の試料で既に興味深い現象が観測されました。図 3 は図 2 と同様な測定結果です。FeSe は超伝導になりますが、赤い線は超伝導から常伝導へ転移する途中の磁場で測定したものです。磁場が直方晶 [010], [100], [0-10] 方向を向いているとき抵抗が小さいのがわかります。これは試料にツイングが入った状態で a 軸の向きの異なるドメインを隔てるツイング境界の向きに対応します。ツイング境界に超伝導磁束がトラップされて動けないため抵抗が小さくなると考えられます。今後は、デツイングした試料について研究を進めていきます。

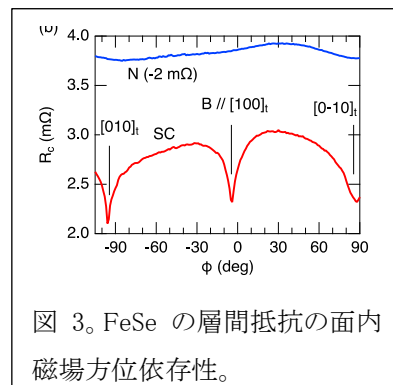


図 3. FeSe の層間抵抗の面内磁場方位依存性。

[1] TT *et al.*, PRB 106, 184503 (2022)[<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.184503>].

電荷液晶の発現機構と外場制御の理論

C01 班 紺谷 浩

「量子液晶の物性科学」の 5 年間、大変お世話になりました。振り返ると（コロナを挟んだこともあって）あっという間でしたが、大変実りのある 5 年間に対して、皆様に感謝を申し上げます。本新学術が始まった 2019 年は、10 年間続けた鉄系超伝導体中心の研究活動からの新展開を目論み、鉄系と並ぶ柱となる新しい研究目標を模索していました。本新学術の PD として雇用させていただいた田財里奈さんや、山川さんや大成さんと協力して、鉄系超超伝導体のネマティック秩序を普遍化させた量子液晶の研究に着手し、予想を超えた研究の新展開がありました[1-7]。

まずは、量子液晶の発現機構や安定性に関する基礎研究を行いました。多体電子系の自由エネルギー F の公式を与える Luttinger-Ward 理論に、量子液晶の特徴である非局所な秩序変数「構造因子 $f(\mathbf{q}, \mathbf{k})$ 」を導入して、熱力学安定条件 $\delta F[f]/\delta f = 0$ から、我々が鉄系超伝導体の研究で開発した「線形密度波方程式」を導きました[1]。つまり、密度波方程式の解 f の熱力学安定性の証明が出来ました。さらに線形密度波方程式の解を用いて、 $F[f]$ を f の低次で展開することで、相転移の議論に必須となる「Ginzburg-Landau (GL) 自由エネルギー」を厳密に定式化しました[1]。また、汎関数くりこみ群理論に基づき量子液晶を研究するために、くりこみ群方程式に「構造因子 f 」を導入し、 f の関数型を仮定せずに最適化する方程式を導きました。そして、斥力 U から f が時間反転対称性を破る電流解が出現することを示しました[2]。これらの成果をレビュー記事にまとめ[3]、後半の研究の準備が整いました。

並行して、2020 年頃から世界的な流行が始まった、twisted bilayer graphene (TBG) やカゴメ格子構造を持つ超伝導体 AV_3Sb_5 ($A=Cs, Rb, K$) における量子液晶の研究を開始しました。TBG の巨大ワニエ軌道が構成するハニカム格子（一辺 10nm 超）は、単層グラフェンと異なり各副格子 (A,B) がバレー $\xi = \pm 1$ の自由度を有し、スピンと合わせて $SU(4)$ 複合自由度を構成します。局所クーロン斥力 U により 15 チャンネルの $SU(4)$ 揺らぎが同時に発達し、新奇物性の源泉となります。我々は、 $SU(4)$ 揺らぎの量子干渉がもたらすネマティック秩序 [4] や顕著な量子臨界現象を見出しました。

カゴメ格子金属は、ダビデ星型のボンド相、ループ電流相、ネマティック相、そして超伝導という多彩な量子相が共存・競合して実現する、まさに「量子液晶の申し子」です。幾何学的フラストレーションにより V 原子上の電荷・スピン秩序は抑制されますが V - V 間のボンドに「電荷 δr 」を反強的に配置することが可能です。「 $\delta r = \text{実数}$ 」の時にボンド秩序、「 $\delta r = \text{虚数}$ 」の時に電流秩序になります。我々は、クーロン斥力 U によりボンド秩序が生じること[5]、そしてボンドの量子揺らぎが s 波/ p 波超伝導や[5]、ループ電流秩序[6]を媒介することを見出しました。さらに、ボンドと電流の共存相が回転対称性を破ったネマティック秩序をもたらすこと[5]、そしてボンド・電流共存相が僅かな外場（一様磁場や一軸歪場）により著しく敏感に応答することを見出しました[7]。この原理を応用して、カゴメ金属の量子相を外場により制御することで、デバイス応用が可能かもしれません。

さらには、Dirac 半金属 $BaNiS_2$ における有限エネルギー・ネマティック相の起源について、B01 班の花栗先生や Butler さんとの共同研究によって解明出来ました: Butler et al., PNAS **119**, e2212730119 (2022)。
参考文献

- [1] R. Tazai, S. Matsubara, Y. Yamakawa, S. Onari, and H. Kontani, Phys. Rev. B **107**, 035137 (2023).
- [2] R. Tazai, Y. Yamakawa, and H. Kontani, Phys. Rev. B **103**, L161112 (2021).
- [3] H. Kontani, R. Tazai, Y. Yamakawa, and S. Onari, Adv. Phys. **70**, 355 (2021) [arXiv:2209.00539].
- [4] S. Onari and H. Kontani, Phys. Rev. Lett. **128**, 066401 (2022).
- [5] R. Tazai, Y. Yamakawa, S. Onari, and H. Kontani, Sci. Adv. **8**, eabl4108 (2022) [open access].
- [6] R. Tazai, Y. Yamakawa and H. Kontani, Nat. Commun. **14**, 7845 (2023) [open access].
- [7] R. Tazai, Y. Yamakawa and H. Kontani, to be published in Proc. Natl. Acad. Sci. [arXiv:2207.08068].

研究室 HP: <http://www.s.phys.nagoya-u.ac.jp/>

紺谷浩 (名古屋大学・理学研究科・教授)

異なる非一様電子分布間の相転移の発見

C01 班 有田 亮太郎

空間中の粒子の分布を分類する量として、ハイパーユニフォーミティという考え方があります（最近の総合報告として文献[1]参照）。一般に粒子の分布が三次元の規則性（並進秩序）を持てば結晶、配向について何かしらの秩序を持てば準結晶か古典液晶、何も秩序がなければ液体とされます（図 1）。ハイパーユニフォーミティは並進秩序や配向秩序では議論できない非一様かつ非周期的な規則性を捉えて定量化する量として導入されました。

	結晶	準結晶	古典液晶	液体
並進	✓	✗	✗	✗
配向	✓	✓	✓	✗
Hyperuniformity	✓	✓	✗	✗

図 1: 結晶、準結晶、古典液晶、液体とその規則性[1]。

ハイパーユニフォーミティという量は次のように定義されます。 r_c を中心に、半径 R の領域 Ω を考えます。この領域の中に含まれる点の数 N は r_c を変化させれば値が変わりますが、その分散

$$\sigma^2(R) = \langle N(R)^2 \rangle - \langle N(R) \rangle^2$$

を R で $AR^d + BR^{d-1} + \dots$ と展開することを考えます。ここで d は系の次元です。 A がゼロであるとき、粒子の分布はハイパーユニフォームであるといえます。 B の値の大小が点の分布の不規則性をあらわしますが、定数であるときをクラス I、 $\log R$ に比例するときをクラス II と呼びます。

我々はこのハイパーユニフォーミティの考え方で準結晶の電子状態の特徴を定量化する研究を行いました。準結晶は周期的ではないものの規則性のある原子配列をもつ固体です。準結晶中の電子は非一様に分布し、その分布は温度・圧力等によって変化します。文献[2]では、代表的な準周期格子であるペンローズ格子上で定義された斥力電子モデルを数値計算によって調べ、電子密度の分布が電子間相互作用によって様々に変化する様子がハイパーユニフォーミティによって定量化できることを示しました。

文献[3]では、準周期ポテンシャルをもつ 1 次元のモデルにおいて、ポテンシャルの強さによって、電荷分布のハイパーユニフォーミティクラスが変わることがあることを見出しました。さらにこのとき、相転移が起こることがわかりました。これは異なる 2 つの非一様電荷分布間に起こる相転移で準周期系特有の興味深い結果と言えます。

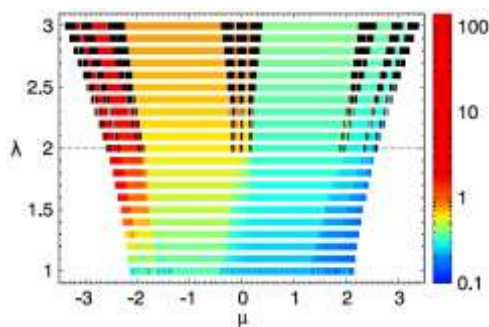


図 2: 準周期モデルのハイパーユニフォーミティ相図。 λ は準周期ポテンシャルの強さ、 μ は化学ポテンシャル。黒い領域はクラス II、カラーの領域はクラス I ハイパーユニフォームで、色は秩序計量の値を示す。

参考文献

- [1] S. Torquato, *Physics Reports* 745,1 (2018)
- [2] Shiro Sakai, Ryotaro Arita, and Tomi Ohtsuki, *Physical Review B* 105, 054202 (2022) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.054202>].
- [3] Shiro Sakai, Ryotaro Arita, and Tomi Ohtsuki, *Physical Review Research* 4, 033241 (2022) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.033241>].

研究室 HP: <http://arita-lab.t.u-tokyo.ac.jp/>

有田亮太郎（東京大学・先端科学技術研究センター・教授）

スピンの由来の電気分極と電子カイラリティ

C01 班 池田 浩章

らせん階段に代表されるように、ある物体がその鏡像と重ね合わせることができない性質（例えば、右回りのらせん階段の鏡像は左回りとなり重なりません）をカイラリティと呼び、このような性質を持つ物質をカイラルな物質と呼びます。カイラルな物質は原子・分子の世界でも存在し、 α 水晶やDNAがその代表例として挙げられます。これらの物質は磁性を持たない絶縁体であり、これまでその電氣的・磁氣的性質はあまり注目されてきませんでした。近年になって、DNAを通過した電子のスピンが一方に揃えられるような現象（カイラリティ誘起スピン選択性:CISS）が報告されたことで[1]、このようなカイラル物質の電氣的・磁氣的性質が大変注目されるようになりました。一見、非磁性な物質が磁性の元となるスピンを揃える能力を持つ理由はまだあまり明らかになっていませんが、群論的な考察と組み合わせることで、このようなCISS効果はその電子状態に内在する電気トロイダル単極子 G_0 が担っていると報告されています[2]。

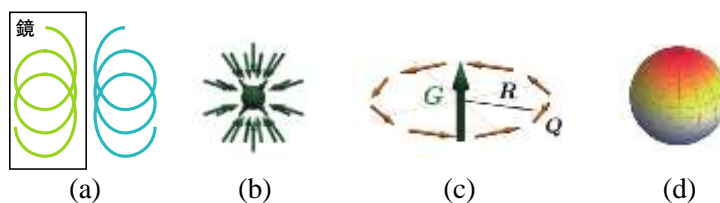


図1: (a)らせん構造、(b)電気トロイダル単極子 G_0 [3]、(c)電気双極子 Q による電気トロイダル双極子 G [3]、(d)フェロアキシシャル秩序における原子上のカイラリティ分布[4]

このようなトロイダル多重極子は、例えば、電磁場を多重極展開した際に現れる電荷・電流分布の異方性を表す自由度の一つであり、一般に、空間反転・時間反転に対する符号変化から電荷や電流の分布を完全に表現するためには、電気・磁気多重極子に加えて、電気・磁気トロイダル多重極モーメントが必要であると言われています。このとき、磁気トロイダル双極子が、環状に並んだ磁気双極子（トーラス状の電流分布）によってかなり明確に定義されるのに比べ、電気トロイダル双極子を単純に電気分極が環状に並んだものとして定義すると単なる電荷分布と見分けがつかないため、電気トロイダル多重極子を電気多重極子と異なる新しい自由度と捉えられるか少し曖昧に見えます（図1(c)参照）。

そこで、我々は電子の運動をディラック方程式に立ち戻って記述し、その非相対論極限から再考察することで、この電気分極には単に電荷の分布から定義される分極だけでなく、電子の持つスピンの回転から定義される電気分極も含まれることを示しました[4]。これによって電気トロイダルモーメントの定義がより明確になったと考えています。また、ここで得られた電気分極はスピン流の非対角成分に対応し、その対角成分では上述の電気トロイダル単極子 G_0 に対応する成分が相対論の世界で議論される電子カイラリティ（ γ^5 ）と自然に接続することも示しています。さらに、マルチフェロイクスの分野で議論されるフェロアキシシャル秩序がここで議論される電子カイラリティの双極子秩序と考えられ、それが実験的には観測困難な隠れた秩序となりうることも提案しています（図1(d)参照）。最近では、第一原理計算に基づいて電子カイラリティの定量計算も行っており、CISS効果がどのようにして出現し、どのような場合に大きくなるのかについて取り組んでいます。本研究成果は、電荷・スピン・軌道が結合する系を理解する上で、基礎学術的に重要な研究成果であると考えています。

参考文献

- [1] B. Göhler, et al., *Science* **331**, 894 (2011) [[DOI:10.1126/science.1199339](https://doi.org/10.1126/science.1199339)]
 [2] J. Kishine, H. Kusunose, and H. Yamamoto, *Isr. J. Chem.* **62**, e202200049 (2022) [[DOI:10.1002/ijch.202200049](https://doi.org/10.1002/ijch.202200049)]
 [3] R. Oiwa, and H. Kusunose, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 116401 (2022) [[DOI:10.1103/PhysRevLett.129.116401](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.116401)]
 [4] [Editors' Suggestion] S. Hoshino, M.-T. Suzuki, and H. Ikeda, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 256801 (2023) [[DOI:10.1103/PhysRevLett.130.256801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.256801)]

非平衡現象を介したスピン液晶・スピン液体・巨視的秩序の高速操作と特徴検出

C01 班 佐藤 正寛

佐藤は、本新学術領域研究に理論班(C01 班)の一員として参加させて頂きました。改めて本領域から頂いた恩恵に感謝申し上げます。さて、5 年間で私が得た本領域の成果は、(1)領域外研究者との共同研究成果と(2)本領域研究者との共同研究成果の 2 つに分類できます。(1)の代表例として、(A)スピンネマティック液体における Spin Seebeck effect (SSE) の研究と(B)周期駆動散逸量子系における非平衡定常状態の一般理論構築が挙げられます。(2)として、(C)磁性体の巨視的秩序の高強度 THz パルスによるフロッケ工学(廣理グループとの共同)、(D)光渦 THz パルスによる超伝導体のヒッグスモードの強励起と 3 次高調波の増幅(水島氏との共同)、(E)キタエフスピン液体における SSE の理論解析(求グループとの共同)と 2 次元反強磁性体における SSE の実験理論の共同研究(塩見グループとの共同)が挙げられます。これらは全て、熱や光によってスピン液体・スピン液晶・磁気相・超伝導相を非平衡化し、その特性を炙り出す、又は、系の物性を超高速制御する研究です。これらの結果は、量子液晶相を含む多体系の特徴を捉える効果的な新しい方法を提供すると期待しています。以前のニュースレターで(1)には触れていしますので、本記事では、(2)について、出来るだけ簡潔にその要点を解説します。

(C) 磁性体の巨視的秩序の高強度 THz パルスによるフロッケ・エンジニアリング(工学)

フロッケ工学とは、注目する系にうまく周期外場(レーザーなど)を印加して、外場の周波数とは異なる周波数帯(典型的には低周波数帯)における系の物性を操作する方法を指します。ここ 10 年程度で、半導体や原子・分子におけるフロッケ工学は大きく発展しましたが、強相関多体系のフロッケ工学では目立った実験報告例がありませんでした。そのような中で、廣理氏らは高磁場強度 THz パルス生成技術を用いて、マクロ反強磁性体の巨視的磁気秩序(磁気モーメント)の向きを高速で操作できることを示しました[1]。我々は、自らが開発した古典非線形系のフロッケ理論[2]を応用してこの現象を解析し、この磁気ダイナミクスがまさにフロッケ工学現象であることを明らかにしました。

(D) 光渦 THz パルスによる超伝導体のヒッグスモードの強励起と 3 次高調波の増幅

光渦とは軌道角運動量を持つレーザーであり、照射面でのドーナツ型強度分布、伝播方向の縦 AC 磁場、などの特徴があります。これらの魅力的特徴は物性分野で十分に活用されておらず、フロンティアが広がっています。そこで、我々は、空間的コヒーレンスを持つ超伝導体に光渦を照射した際のダイナミクスを解析しました[3]。巨視的波動関数の低エネルギー有効理論に基づいた、光渦の電磁場も含めた精密な数値解析の結果、光渦の空間構造(特に縦 AC 磁場)の影響で、通常のガウス光に比べて Higgs モードが強く励起され、光渦による 3 次高調波が光渦の軌道角運動量の増加と共に大きく増幅することを見出しました。これは光渦が検出しにくい Higgs モードの励起に有効であることを示しています。

(E) キタエフスピン液体と擬 2 次元反強磁性体におけるスピンゼーベック効果 (SSE)

SSE は、磁性体と金属の 2 層系に熱勾配を印加し、磁性体で発生した熱勾配駆動スピン流を金属側に注入させ、金属中の逆スピンホール効果を介して、スピン流が電気信号として検出される現象を指します。スピン版のゼーベック(熱電)効果といえる現象であり、応用的側面から研究が進展してきました。しかし、最近、SSE 信号の磁場温度依存性から磁性体の基礎物性が検出できる可能性が考察され、実際、非自明な SSE が観測・予言されています。そこで我々は、キタエフ模型の SSE スピン流の解析[4]と擬 2 次元反強磁性体 $\text{BaNi}_2\text{V}_2\text{O}_8$ の SSE の実験・理論解析[5]を行いました。キタエフスピン液体では、相互作用の符号反転でスピン流の符号も反転する、2 次元磁性体の SSE の大規模数値解析では、BKT 転移前後でスピン流に異常はなく有限値にとどまる、という新物性を解明しました。

[1] Z. Zhang, M. Kanega, M. Sato, H. Hirori, *et al.*, under review.

[2] S. Higashikawa, H. Fujita and M. Sato, arXiv:1810.01103.

[3] T. Mizushima and M. Sato, Phys. Rev. Research 5, L042004 (2023).

[4] Y. Kato, J. Nasu, M. Sato, T. Okubo, T. Misawa and Y. Motome, in preparation.

[5] K. Nakagawa, M. Kanega, T. Yokouchi, M. Sato and Y. Shiomi, in preparation.

強相関電子系におけるスピンの流

C01 班 遠山 貴巳

強磁性のように物質の内部自由度を秩序化して対称性を破る系ではランダウによる相転移理論が成功を収めています。それに対して、電子間の相互作用が物性を支配している強相関電子系の量子相では、強い量子力学的効果のためランダウ理論を超えた記述が必要な場合があります。絶対零度まで磁気秩序を示さない量子スピン液体はその代表例で、単純な対称性の破れでは記述できません。さらに、対称性を破る状態と破らない状態の間のような性質を持つ場合は量子液晶として振る舞います。量子液晶は対称性が部分的に回復した状態と見なすことが可能で、従来とは違った対称性の破れ方を示す可能性もあります。量子液晶としては回転対称性が低下した量子ネマティック液晶が本新学術領域でもよく研究されていますが、電流が局所的にループ状に流れているループカレント状態も量子液晶の一種です。ループ電流を持つ状態はもともと銅酸化物高温超伝導体に現れる擬ギャップ相を特徴づけるものとして提案されましたが、銅酸化物を記述可能な現実的なモデルでは安定な状態としては現れないことがわかっています。しかし、 Sr_2IrO_4 , $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ における最近の一連の実験で、様々なループ電流テクスチャが提案され、ループカレントを持つ状態を多角的な視点で見直す機運が高まってきています。そのような視点の一つとして、電流ではなくスピンの流のテクスチャがハバード模型で現れる可能性が提案されており [1,2]、更なる研究が必要とされています。

そこで、強相関電子系を数値的に厳密に調べるのできる密度行列繰り込み群法で正方格子単一軌道ハバード模型および二軌道ハバード梯子模型におけるスピン流テクスチャの出現可能性を調べました [3]。キャリアが導入された (i) 正方格子モット絶縁体、(ii) 励起子絶縁体、(iii) 軌道選択型モット絶縁体の 3 種の強相関電子系についてループスピンの流の相関が長くなる条件が存在することを発見しました。図 1 には (i) のときのスピンの流の様子を示しています。このスピン流テクスチャは、その電子密度で特異的に出現する電荷が一方向に並んだストライプ秩序と共存しています。(ii) では軌道間の電子ホッピングの導入によりループスピンの流の相関が長くなり、動的平均場理論による以前の研究 [1] と対応する結果が得られました。このスピン流は励起子が凝縮することに伴うものであり、 $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{CoO}_3$ でそのような励起子凝縮の可能性が提案されていることは興味深いです。(iii) の模型は、 BaFe_2S_3 で観測されているブロック型反強磁性相を示す系としても知られており、その反強磁性相の付近にループスピン流テクスチャを持つ状態が存在することがわかりました。以上のように、スピンの流のテクスチャは強相関電子系物質の様々なところに出現している可能性があり、今後の実験研究による確認が期待されています。

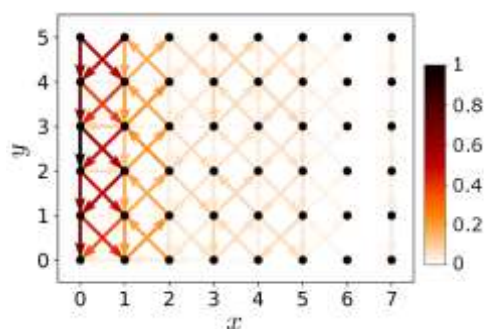


図 1: 8×6 サイト正方格子単一軌道ハバード模型の電子密度 0.85 のときのスピンの流の様子。密度行列繰り込み群法による計算結果。横軸 x 、縦軸 y は格子点の座標を表す。 $x=0$ の $y=2$ と 3 の間に非常に小さなスピンの流を加えたとき、他の格子点間にどのようなスピンの流が生じるか図示している。矢印はスピンの流の向きを、色は大きさを示す。

参考文献

- [1] J. Kuneš and D. Geffroy, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 256403 (2016) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.256403>].
 [2] H. Kontani *et al.*, *Phys. Rev. Res.* **3**, 013127 (2021) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.013127>].
 [3] K. Shinjo, S. Sota, S. Yunoki and T. Tohyama, *Phys. Rev. B* **108**, 195118 (2021) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.108.195118>].

研究室 HP: <https://www.rs.tus.ac.jp/tohyamalab/>

遠山貴巳 (東京理科大学・先進工学部・教授)

From quantum liquid crystals to gravitational waves

C01: Nic Shannon

Frustrated magnets provide a very beautiful example of a quantum liquid crystal, in the form of the quantum spin nematic, a state where magnetic quadrupole moments order. Over the last five years, our group has developed novel methods for simulating both the thermodynamics and dynamics of quantum spin nematics, as realized in spin-1 magnets. These methods were introduced and documented at length in [1].

Equipped with these new techniques, we have gone on to study two very different problems, the competition between spin nematics and spin liquids in Kitaev magnets [2], and the analogy between the Goldstone modes of a spin nematic, and gravitational waves [3].

In the second of these projects, we have shown that there is exact mapping between the quadrupole waves found in quantum spin nematics, and the gravitational waves arising in general relativity [Fig 1]. The implication of this result is that gravitational waves can be simulated in magnetic insulators, or assemblies of cold atoms, which realize a suitable quantum liquid crystal state. These systems can therefore provide access, on the lab bench, to phenomena usually found at astronomical length scales, including the gravitational radiation which accompanies the in-spiralling of merging black holes [Fig. 2].

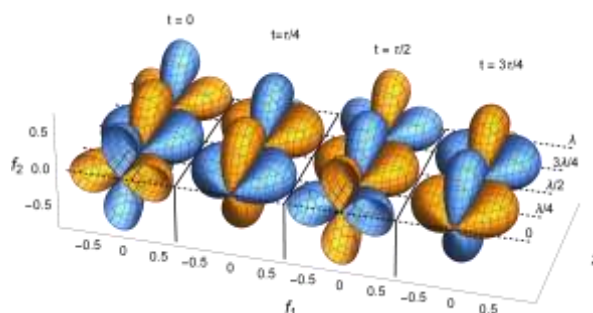


Fig. 1: Quadrupole wave in a quantum spin nematic state, showing the same structure as a gravitational wave.

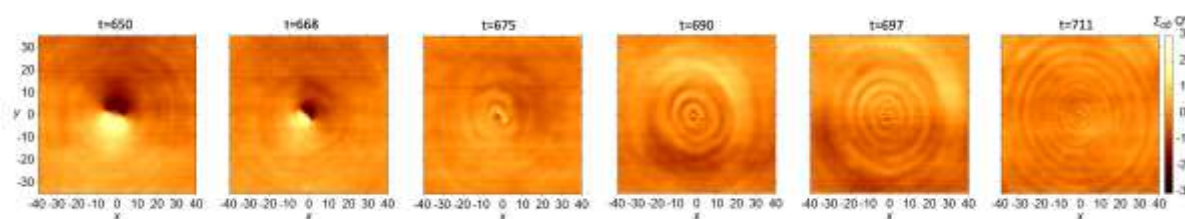


Fig. 2: Numerical simulation of the interaction of topological defects in a quantum spin nematic, showing radiation of quadrupole waves. These are equivalent to the gravitational waves emitted by merging black holes, as observed by LIGO.

Publications

- [1] K. Remund, R. Pohle, Y. Akagi, J. Romhányi and N. Shannon, Phys. Rev. Research **4**, 033106 (2022) [DOI: 10.1103/PhysRevResearch.4.033106]
- [2] R. Pohle, N. Shannon, and Y. Motome, Phys. Rev. **B 107**, L140403 (2023) [DOI: 10.1103/PhysRevB.107.L140403]
- [3] L. Chojnacki, R. Pohle, H. Yan, Y. Akagi and N. Shannon, submitted [DOI: 10.48550/arXiv.2310.10078]

Group webpage: <https://groups.oist.jp/tqm>

Nic Shannon (OIST • Professor)

スピ液晶研究: Kitaev と Skyrme のはざままで

C01 班 求 幸年

液体と固体両方の性質をもつ液晶とのアナロジーで考えると、スピ液晶とは、物質中の電子スピ
ンが液体的に振る舞うスピ液体（例えば、Anderson の提案した Resonating Valence Bond (RVB)状態）
と、固体的に振る舞うスピ固体（強磁性や反強磁性といった磁気秩序状態）の両方の性質をもつと考
えられます。本領域発足時に行われたキックオフミーティングでは、こうしたスピ液晶状態の解明
や創出に向けて、スピ液体の興味深い例であるキタエフスピ液体と、スピ固体の興味深い例で
あるスキルミオンを代表とするトポロジカルスピテクスチャの両方向からのアプローチを目指すこ
とにしました（2019 年 8 月 19 日 “Spin liquid crystals: some hints from Skyrme and Kitaev”）。以来この 5
年間に行ってきた研究の中からハイライトを 2 つお示しします。

(1) キタエフスピ液体とスピ液晶の間に現れる新規量子相の探索 [1]

キタエフスピ液体は、元々スピ 1/2 のモデルにおいて提案されたものですが、スピ 1 以上の高
スピの場合にも安定に存在します。一方、スピ 1 以上の場合には、スピネマチックに代表され
る様々なスピ液晶状態が現れます。これらの状態がどのように移り変わるのか、中間に新しい量子
相が現れうるかは興味深い問題です。そこで我々は、スピ 1 のキタエフ模型に、双一次および双二
次相互作用を加えたモデルの性質を調べました。その結果、キタエフスピ液体とスピネマチック
状態の間に、非共面的な磁気構造をはじめとする多彩な量子相が現れる可能性を見出しました。興味
深いことに、非共面的なスピ構造をもちながらスピ液体的に振る舞うカイラルスピ液体状態も
現れることを示しました。実験的にもスピ 1 のキタエフ磁性体の研究が進められているため、これ
らの新規量子相の探索が進むことを期待しています。

(2) スピモアレエンジニアリングによる新規トポロジカルスピテクスチャの創出 [2]

スキルミオンに代表されるトポロジカルなスピテクスチャは、しばしば周期的に配列した構造を
とります。それらは複数のスピの波の重ね合わせとして記述することができます。我々はこれをス
ピンのモアレとして捉え、光学などにおけるモアレに関する知見を活用して、磁気構造やトポロジカ
ルな性質、それらと結合した電子状態などを自在に制御する「スピモアレエンジニアリング」の研究
を進めてきました。これまでに、重ね合わせる波の振幅や相対角度、位相差などの変化に対するスピ
ンモアレの変化を系統的に調べ上げ、新規なトポロジカル状態やそれらの間の相転移を見出してきま
した。また、こうした操作が磁場や圧力といった外部パラメータによって可能であることも明らかにしま
した。最近では、スキルミオンを超えた 1 次元あるいは 3 次元的なスピモアレに着目し、磁場や電
場の印加による融解ダイナミクスに関する研究も進めています。

これらの他にも、領域内外の研究者と数多くの共同研究を行う機会を頂きました（領域 web「研究成
果」および下の研究室 HP 参照）。また、新しい試みとして、機械学習でよく用いられる自動微分を活
用した逆問題ソルバーの開発とその応用[3]や、物理リザパー計算において問題となる熱ノイズに強い
時空間大規模並列計算手法の提案[4]に関する研究を行いました。これらは QLC チャンネルに紹介ビデ
オを掲載させていただいています。5 年間の手厚いご支援に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] R. Pohle, N. Shannon, and Y. Motome, *Phys. Rev. B* **107**, L140403 (2023); in preparation.
- [2] K. Shimizu, S. Okumura, Y. Kato, and Y. Motome, *Phys. Rev. B* **105**, 224405 (2022); *ibid.* **103**, 184421 (2021); *ibid.*, *Phys. Rev. B* **103**, 054427 (2021); 日本物理学会誌 **78**, 314 (2023).
- [3] K. Inui and Y. Motome, *Commun. Phys.* **6**, 37 (2023); in preparation.
- [4] K. Kobayashi and Y. Motome, *Sci. Rep.* **13**, 15123 (2023); preprint ([arXiv:2310.06497](https://arxiv.org/abs/2310.06497)).

研究室 HP: <http://www.motome-lab.t.u-tokyo.ac.jp>

求幸年（東京大学・大学院工学系研究科・教授）

時間・空間反転およびゲージ対称性の破れを伴う電子液晶相の研究

C01 班 速水 賢

結晶がもつ回転対称性が、電子相関を通じて自発的な破れを示す場合には、電子液晶相が現れます。この秩序状態は、結晶が有している時間反転対称性や空間反転対称性の破れを必要としない状態であるため、通常の時間反転対称性の破れを伴う強磁性秩序状態や空間反転対称性の破れを伴う強誘電秩序状態とは質的に異なる状態です。本プロジェクトでは、こうした電子液晶相が本来有している、時間・空間反転対称性あるいはゲージ対称性が破れた際に、どのような機能物性が現れるのか、またどのような物質において実現するのか、という点を明らかにすることを目的として研究を行いました。特に、電子系における多極子概念を起点とした理論解析を行うことで、様々な対称性の破れのもとで実現する電子液晶相を系統的に整理することを目指しました。

以下に本プロジェクトで得られた主な2つの成果について記します。

(1) 電子液晶相の空間的構造により現れるクラスター電気トロイダル双極子秩序[1] :

多極子表現論の枠組みでは、電子液晶相は電気四極子秩序相として表現されます。我々は、電気四極子モーメントの空間配列構造を考えることで特異な電子秩序相の発現可能性を理論的に提案しました。具体的には、3つの電気四極子で構成される三角形クラスター構造が、結晶の鏡映対称性の破れをもたらす電気トロイダル双極子秩序相を誘起することを明らかにしました。また、こうした特異なクラスター構造が、図1に示すような5d電子系物質 $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ で観測された秩序相の性質とよく一致していることを議論しました。さらにこうした電気トロイダル双極子秩序が示す新規交差相関応答現象を見出しました[2,3]。

(2) 多極子基底を用いた超伝導秩序変数の分類[4] :

ここでは電気四極子秩序相のもとでゲージ対称性の破れが生じた際に現れる超伝導相を対象とした理論解析を行いました。そのために、電子がもつ電荷・スピン・軌道といった内部自由度を系統的に表現する多極子基底を用いて、超伝導秩序変数の分類を網羅的行いました。その結果、電気四極子を始めとする多極子と超伝導秩序変数の関係性を明らかにしました。また得られた理論形式を用いて、電気四極子モーメントや上記の電気トロイダル双極子モーメントの揺らぎのもとで実現する超伝導相の安定性についても議論しました。

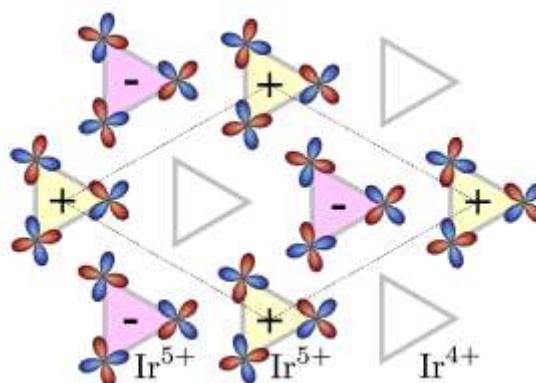


図 1: $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ の秩序相において実現が期待されるクラスター電気トロイダル双極子秩序。各軌道は電気四極子を表す。プラス(+)、マイナス(-)は電気トロイダル双極子の符号を表す。

参考文献

- [1] S. Hayami, S. Tsutsui, H. Hanate, N. Nagasawa, Y. Yoda, and K. Matsuhira, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 033702 (2023) [<https://journals.jps.jp/doi/10.7566/JPSJ.92.033702>].
- [2] S. Hayami, R. Oiwa, and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 113702 (2022) [<https://doi.org/10.7566/JPSJ.91.113702>].
- [3] A. Inda and S. Hayami, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 043701 (2023) [<https://doi.org/10.7566/JPSJ.92.043701>].
- [4] A. Kirikoshi and S. Hayami, arXiv:2312.02410 (2023).

研究室 HP: <https://phys.sci.hokudai.ac.jp/~hayami/index.html>

速水賢 (北海道大学・大学院理学院・准教授)

スピン1量子磁性体におけるスピン液晶(一般化磁気)スキルミオンの開拓

C01班 赤城 裕

2009年に磁気(CP¹)スキルミオンがカイラル磁性体において観測され、それを契機に磁気スキルミオンの研究が実験と理論の両面から精力的に行われています。トポロジカルホール効果などの新規物性を示すだけでなく、磁気スキルミオンはトポロジカルな性質に由来して擾乱に強く、強磁性磁壁の駆動に必要な電流密度の10万分の1程度で駆動できるため、超高密度・超低消費電力な磁気記憶素子/レーストラック・メモリへの応用につながると期待されています。

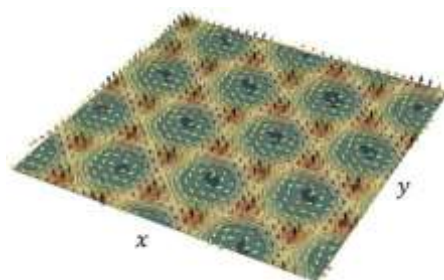


図1:スピン液晶(CP²)スキルミオン結晶

本新学術の共通/統一概念である量子液晶の代表格の一つがスピン液晶(スピネマティック)相です。スピン液晶相は磁気双極子の長距離秩序は存在せず観測が困難であることが知られていますが、磁気四極子の長距離秩序により特徴づけられる非自明な磁気秩序であるため長年に渡って注目されています。私達は、この相が実現する最も基本的なモデルである三角格子上のS=1のbilinear biquadratic (BBQ)モデルを詳細に調べることで、新規なスピン液晶(一般化磁気)スキルミオンを見出しました[1]。古典液晶との最大の違いは、液晶の構成要素である棒(円盤)状分子は基本的に形を変えない一方、スピン液晶相の構成要素であるS=1のスピンは磁気双極子⇄磁気四極子と大きく形を変える点であり、実際スピン液晶スキルミオンの中心近傍には磁気双極子が誘起されます。

本新学術を通じ、甘利氏を中心に、澤渡氏、新田氏、Gudnason氏、Shnir氏らの素粒子物理学者と共同研究を行い、スピン液晶スキルミオンの開拓を行いました。これまでの磁気スキルミオンに関する多くの研究は古典スピン系を対象にしていますが、我々はBBQモデルに一般化Dzyaloshinskii-守谷相互作用項[2]を導入することで、スピン液晶スキルミオンが周期的に配列した、スピン液晶(CP²)スキルミオン結晶[図1]が安定化することを明らかにしました[3]。この相は従来型のスキルミオン結晶と同様に磁気双極子の構造因子がtriple-Qの構造を持つだけでなく、磁気四極子の構造因子もtriple-Qの構造を持つため、古典スピン系では対応物のないスキルミオンとなります。また我々は、上記のモデルが⁷Li、²³Na、⁴¹K、⁸⁷Rb等のS=1のスピノールボース系において実現できることを示し、CP²分数スキルミオン結晶、CP²ダブルスキルミオン結晶、CP²ヘリマグネティック相、CP²スキルミオニウム結晶等の他の新規相が現れることも明らかにしました。さらにこうした冷却原子系における対称性の高い磁性体モデルの実現性に着目し、三角格子上のSU(3)近藤格子モデルを、[1, 4]の手法を拡張することで詳細に調べました。その結果として、最小サイズのCP²スキルミオン結晶が現れることを見出しました。現在、こうした一般化磁気スキルミオンをテクノロジーへと発展させるべく研究を進めております。

[1] H. T. Ueda, Y. Akagi, and N. Shannon, Phys. Rev. A **93**, 021606(R) (2016).

[2] Y. Akagi, Y. Amari, N. Sawado, and Y. Shnir, Phys. Rev. D **103**, 065008 (2021).

[3] Y. Amari, Y. Akagi, S. B. Gudnason, M. Nitta, and Y. Shnir, Phys. Rev. B **106**, L100406 (2022).

[4] K. Remund, R. Pohle, Y. Akagi, J. Romhányi, and N. Shannon, Phys. Rev. Research **4**, 033106 (2022).

研究室 HP: <https://park.itc.u-tokyo.ac.jp/hkatsura-lab/>

キラル古典異方粒子系におけるトポロジカル相の制御

C01 班 川崎 猛史

らせんや渦など鏡像と重ならない微視的秩序構造を有する材料を「トポロジカル材料」と呼びます。トポロジカル材料に関する研究は、鏡像対称性の破れた「キラルな相互作用」を示す電子系や磁性体など、量子系を中心に研究が進んできました。一方、コレステリック液晶など、分子の立体形状が捻れた古典粒子系においても、キラルな相互作用が働き、これらの粒子が高密度で凝縮した系の相挙動は「トポロジカル」な性質をもちます。また、分子のスケールより遥かに大きな、ウイルスやバクテリアなど、捻れた形状をもつ、広い意味での「粒子」は生物系においても広く存在します。このことから、古典系においてキラルな相互作用を示す粒子系の性質を探求することは大変重要です。ところが古典系におけるトポロジカル相の発現に関する研究は量子系に比べ未開拓の状態でした。以上を踏まえ、我々の本新学術領域研究では、量子系で多く観測されているトポロジカル相が、分子から生物に至る古典系においても広く生じうることを示し、その中で量子系と古典系間に存在する普遍的・多様の機構を明らかにすることを研究の目的としました。

本研究では、異方的な立体斥力、ならびにキラルな相互作用をもつ古典分子動力学モデルの構築に成功しました。その結果、らせんやスキルミオン（正確には半スキルミオンまたはメロン）と呼ばれる特徴的なトポロジカル構造が古典的な熱平衡状態において普遍的に生じることを示しました [1]。さらに我々は、このような相互作用をもつ粒子系を、バクテリアなどを模した、「アクティブマター」と呼ばれる非平衡系に拡張しました。その結果、熱平衡状態のときと同様に、高密度状態においては半スキルミオン構造をもつ多数の渦が発現することを明らかにしました。加えて、粒子の自己駆動力を系統的に変化させたところ、ある閾値を堺に、粒子が非自明な方向に回転しだすことを見出しました(図 1)。さらに、詳細な解析の結果、ここでの振る舞いは、外場下における電化密度波や超伝導渦系において観測される「depinning 転移」と呼ばれる非平衡相転移と概ね等しい臨界指数が観測され、これらの間に、普遍クラス存在を示唆する結果を得ました。ここでの普遍クラス存在理由は現在考察中ですが、古典と量子、そして、スケールの全く異なる系間に普遍性が存在するならば、大変興味深いことだと考えます。この様に、本研究は古典ソフトマター研究に新たな風穴を開けたことに加え、量子系へのフィードバックをもたらす可能性があるものと考えております。

最後に、私は当新学術領域研究に公募研究として 2 期採択いただいたことで、量子系におけるトポロジカル現象についての優れた研究成果に触れる機会を大いに得ることができました。その中で私が専門とするソフトマター（古典系）と磁性体や電子系といった量子系との間に、トポロジカル現象を介した類似点を見出し、分野間を横断する学際研究を推進することができました。このような研究の機会を与えてくださった当新学術領域、ならびに、共同研究者の東京大学の高江恭平氏、名古屋大学の鈴木新氏、宮崎州正氏に深い感謝の意を表します。

参考文献

[1] K. Takae and T. Kawasaki, *PNAS* **119**, e2118492119 (2022). [<https://doi.org/10.1073/pnas.2118492119>]

研究室 HP: <https://www.r.phys.nagoya-u.ac.jp>

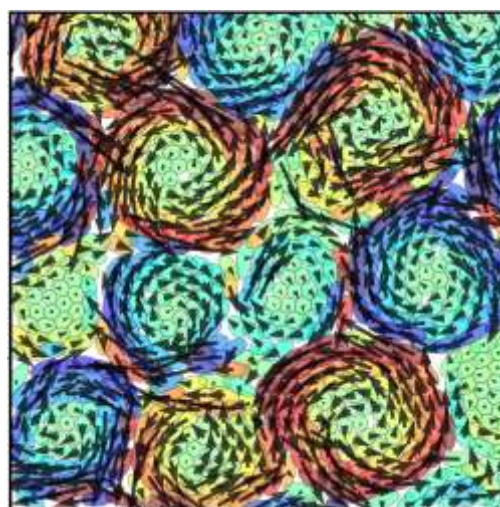


図 1:キラルな相互作用をもつアクティブ粒子系において得られた半スキルミオン構造(面内方向に射影したものです)。粒子の色は角運動量を表します(時計回りが青,反時計回りが赤)。また粒子の矢印は速度ベクトルを表します。本研究では、非自明な方向に回転する半スキルミオン渦を観測しました。

空間反転対称性の破れた超伝導体のエキゾチック超伝導と非相反応答

C01 班 大同 暁人

超伝導は金属を冷やしていくと低温で電気抵抗がゼロになる現象ですが、最近、左から電流を流した時は超伝導なのに、右から電流を流した時は普通の金属になってしまう現象が注目を集めています。超伝導体では電子が 2 つずつペアとなって Cooper 対を形成し、これが電気抵抗消失の原因となっていますが、上記の「超伝導ダイオード」では、左からある大きさの電流を流すと電子は Cooper 対として流れ、右から同じ大きさの電流を流すとバラバラに流れる、という奇妙なことが生じます。

超伝導ダイオード効果は 2020 年の実験 [1] を契機に、近年爆発的に研究されるようになりました。これは左右の流れが異なる振る舞いを示す非相反現象の一例で、試料が鏡に映して元に戻らないこと（空間反転対称性の破れ）が必要条件です。試料表面の非対称な損傷などにより生じる外因的な超伝導ダイオード効果は古くから知られていましたが、結晶構造や電子の性質などのミクロな空間反転対称性の破れが引き起こす超伝導ダイオード効果の可能性に大きな注目が集まっています。

超伝導ダイオード効果は例えば空間反転対称性を破った結晶構造を持つ超伝導体に磁場をかけると実現できます。一方で、このような状況では Cooper 対が自発的に有限の重心運動量を持つエキゾチックな超伝導状態が発現することが理論的にわかっています。これはヘリカル超伝導と呼ばれ、本領域の中心的な研究対象の一つである Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov 超伝導の親戚のようなものです。私たちのグループではヘリカル超伝導と超伝導ダイオード効果の関係に注目した研究を行ってきました[2-5]。これらの密接な関係を指摘し[2]、超伝導電流下の非相反な超伝導相図[3]、磁場による Cooper 対の軌道運動効果[4]、不純物効果[5]などの研究を行い、超伝導ダイオード効果にエキゾチックな超伝導状態の性質が反映されることを解明しました。ヘリカル超伝導は興味深いものの実験的検出が容易でなく、新しいプローブ法の提案が必要でした。超伝導ダイオード効果をはじめとした超伝導電流や非相反応答に着目した私たちのアプローチにより今後の進展が期待できます。以上の内容の一部については日本語の解説記事を執筆しましたのでぜひご覧ください[6]。

より最近では、超伝導ダイオード効果に限らない広範な非相反現象や、非平衡状態での超伝導ダイオード効果の研究などもおこなわれています。超伝導体の非相反現象の研究に加え、電子波動関数が持つ非自明な性質（量子幾何）が反映された超伝導物性の研究にも注力しています。今後も超伝導体を持つさまざまな興味深い側面に光を当てる研究をしていきたいと考えています。

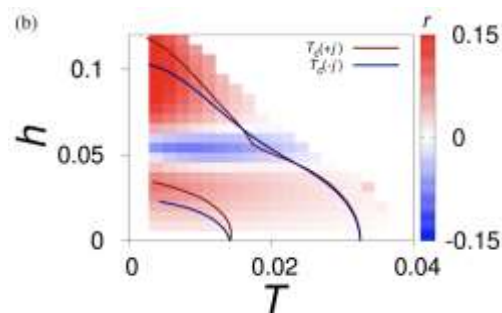


図 1: 超伝導電流下での超伝導転移線[3]。赤線(青線)は+方向(-方向)の電流下での転移線。カラープロットは各温度 T 、磁場 h での超伝導ダイオード効果。

参考文献

- [1] F. Ando *et al.*, Nature **584**, 373 (2020).
- [2] A. Daido, Y. Ikeda, and Y. Yanase, Phys. Rev. Lett. **128**, 037001 (2022).
- [3] A. Daido and Y. Yanase, Phys. Rev. B **106**, 205206 (2023).
- [4] K. Nakamura, A. Daido, and Y. Yanase, arXiv:2305.19317.
- [5] Y. Ikeda, A. Daido and Y. Yanase, arXiv:2212.09211.
- [6] 大同暁人, 柳瀬陽一, 小野輝男, 固体物理 **58**, 511 (2023).

研究室 HP: <http://cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.html>

大同暁人 (京都大学・理学研究科・助教)

光渦で探る超伝導ヒッグスモード

C01 班 水島 健

光渦は螺旋性を示すトポロジカル光波の一種です。光渦は偏光の自由度に加えて有限の軌道角運動量を有するため、等位相面の螺旋構造やドーナツ状の強度分布など、通常のガウス光にはない特徴が現れます。光渦を用いた応用研究は、レーザー加工、光マニピュレーション、光情報通信など多方面で展開されています。最近では、テラヘルツ周波数帯での光渦の発生も可能となり、プラズモン励起や磁性体における軌道角運動量による二色性など、固体物理分野へも徐々に展開されつつあります。

光渦を物性研究へ応用する上で、超伝導は格好の舞台となります。超伝導のダイナミクスの時間スケールは数 10GHz から THz の領域です。その周波数帯の電磁波の回折限界は数 10-100 μm 程度のため、固体中の電子が光渦の特徴的な螺旋性を感じることは難しいです。しかしながら、マクロな量子現象である超伝導ではクーパー対が巨視的波動関数を形成するため、光渦の螺旋的な空間構造を直接感じることができます。そのため、光渦と超伝導の組み合わせは、光の螺旋性や軌道角運動量の転写によるマクロな量子状態の操作・制御や新奇な非線形光学現象の探索など、未知の可能性を秘めています。

超伝導固有の素励起の一つとして、ヒッグスモードがあります。ヒッグスモードと外場との線形結合は対称性によって禁止されているため、その検出は困難です。ヒッグスモードを観測するためには、汚れた超伝導体を用いるか、内因的・外因的に反転対称性を破る必要があります。そのため、ターゲットなる超伝導物質も制限されます。

そこで私は、佐藤正寛氏 (C01 班) とともに、テラヘルツ帯の光渦を用いたヒッグスモード励起と非線形光学現象に関する研究を行いました[1]。超伝導秩序変数とゲージ場に対する有効理論 (ヒッグス模型) の数値シミュレーションを軸として、光渦の持つ軌道角運動量が超伝導体へ転写されるメカニズムを明らかにし、超伝導秩序変数の振幅が螺旋状に振動するスパイラル・ヒッグスモード励起 (図 1) や三次高調波への影響を議論しました。通常のガウス光には無い新しい自由度である光の軌道角運動量を用いることで、ヒッグスモードの非線形励起や三次高調波発生を増幅することができます。さらに最近では、準粒子励起の寄与を取り込んだ微視的理論計算を行っています[2]。

異方的超伝導やトポロジカル超伝導などのエキゾチック超伝導は非自明な対称性の破れを伴います。例えばネマティック超伝導では、回転対称性の破れを反映して複数の集団励起モードが現れます[3]。こういったクーパー対の集団励起を観測することは、超伝導ギャップ関数の対称性を明らかにするという観点からも重要です。光渦を用いることで、ある程度クリーンな超伝導でもクーパー対の光学応答を増幅できるため、今後、エキゾチック超伝導への展開が期待されます。

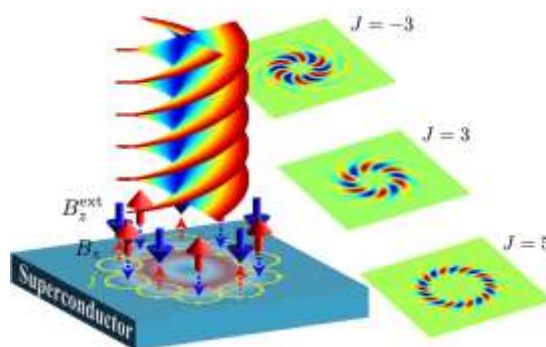


図 1: 光渦は伝播方向に磁場成分を持つ。超伝導に照射すると、その垂直磁場を遮蔽するために超伝導流が誘起され、螺旋状のヒッグスモード (右の 3 枚の図) が励起される。

参考文献

- [1] T. Mizushima and M. Sato, *Phys. Rev. Res.* **5**, L042004 (2023) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.5.L042004>].
- [2] H. Nagato, M. Sato, S. Fujimoto, and T. Mizushima, in preparation.
- [3] H. Uematsu, T. Mizushima, A. Tsuruta, S. Fujimoto, and J. A. Sauls, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 237001 (2019) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.237001>].

研究室 HP: <http://www.fujimotolab.mp.es.osaka-u.ac.jp/>

水島健 (大阪大学・基礎工学研究科・准教授)

超伝導量子渦の広視野イメージング

D01 班 小林 研介

超伝導体の多くは、磁場中で超伝導転移すると磁場を細い線状の磁束として内部に取り込むという性質を持っています。超伝導体に取り込まれた磁束は、周回する永久電流（超伝導電流）によって取り囲まれた独特の構造を持つ「渦」として存在しています。しかも、渦を貫く磁束は $h/2e$ というプランク定数 h と電気素量 e だけで表される普遍的な値の整数倍をとる（量子化）ことが知られています。これを量子渦と呼びます。量子渦は量子力学の根幹に関わる現象であり、その結晶状態や液体状態などの多彩な振る舞いが半世紀以上にわたって研究されてきました。量子渦は超伝導のメカニズムを解き明かす有力な手がかりにもなりますし、その制御は超伝導磁石の開発など応用上も重要です。

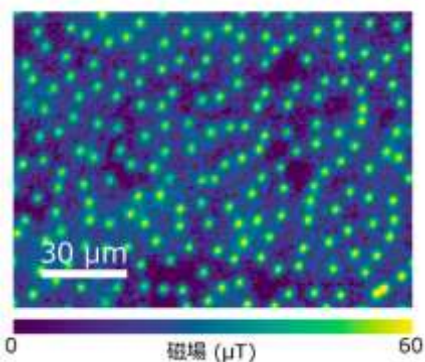


図: 超伝導体における量子渦

これまでに電子顕微鏡や SQUID（超伝導量子干渉素子）など様々な手法を用いて量子渦のイメージング（可視化）が行われてきました。今回、我々は表面に NV 中心を集積させたダイヤモンドを超伝導体上に配置し、CMOS カメラで磁場を観測する手法によって多数の量子渦のイメージングに成功しました[1]。

具体的には、緑色レーザーをダイヤモンドに照射することによって NV 中心から放射される赤色蛍光を観測します。マイクロ波を印加しながら赤色蛍光の強度を測定すると、特定のマイクロ波周波数で NV 中心内の電子スピンの磁気共鳴を起こす結果、赤色蛍光の強度が減るといった現象が起こります。この現象を光検出磁気共鳴（ODMR）と呼びます。共鳴が起こるマイクロ波周波数は電子スピンの感じている磁場と正確に一对一対応しています。このように、発光強度を観測することによって局所的な磁場を検出することができるのです。これを CMOS カメラで顕微鏡の視野全体に対して行い、多数の NV 中心からの ODMR スペクトルを同時に測定することによって、あたかも目で見るときのように磁場を可視化できます。これが NV 中心を量子センサとして用いる磁場イメージングの原理であり、私たちは本新学術においてその手法を開発してきました [2]。

測定には代表的な銅酸化物高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) を用いました。超伝導転移温度以上で一定の磁場を印加した後、磁場中冷却を行い、超伝導転移温度以下の 40 K で測定した磁場の像を図に示します。点在している磁場の強いスポットが量子渦です。我々は観測した多数の量子渦の磁場を統計的に解析することによって、磁束の量子化が起きていることを $\pm 10\%$ の精度で実証しました。さらに量子渦の「形」（量子渦の周りの磁場分布）を既存の理論モデルと比べてその整合性を確認するとともに、磁場侵入長の振る舞いを解明しました。

これまでに超伝導体の量子渦について多くの研究が行われてきましたが、本研究は広視野で多数の量子渦を同時に精密観測するという新手法を初めて実証したものです。今後は、非従来型超伝導体のメカニズムの解明や、新しい超伝導体の探索、高圧下での高温超伝導体の観測などが期待されます。さらに、今回実証した量子センサを用いた精密物性計測は量子液晶も含む幅広い物質に適用可能です。

参考文献

- [1] S. Nishimura, T. Kobayashi, D. Sasaki, T. Tsuji, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, and K. Kobayashi, *Appl. Phys. Lett.* **123** (11), 112603 (2023). [<https://doi.org/10.1063/5.0169521>]
 [2] 例えば、M. Tsukamoto, K. Ogawa, H. Ozawa, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, and K. Kobayashi, *Appl. Phys. Lett.* **118** (26), 264002 (2021). [<https://doi.org/10.1063/5.0054809>]

研究室 HP: <https://meso.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

小林研介（東京大学・大学院理学系研究科・教授）

複数変調ベクトルで記載される磁気配列

D01 班 有馬 孝尚

磁性の教科書では、 d 軌道や f 軌道に不対電子を有する磁性イオンの磁気モーメントを解説したのち、それらが、さまざまな磁気相互作用のもとでどのように配列するのかが議論されます。最低エネルギーを実現する磁気変調ベクトル \mathbf{Q} は、磁気相互作用のフーリエ変換と関係づけられることが知られています。対称性の高い晶系に属する磁性体では、しばしば、等価な磁気変調ベクトルが複数存在します。例えば、正方晶の場合、 $q,0,0$ が安定な磁気変調ベクトルであれば、それと等価な $0,q,0$ も磁気変調ベクトルとなります。六方晶であれば、 $q,0,0$ は、 $0,q,0$ 、および、 $q,-q,0$ と等価です。こういった磁性体では多くの場合、複数の安定な磁気変調ベクトルの中からどれか一つの \mathbf{Q} が選ばれることが多いです。一つの結晶の中で \mathbf{Q} の方向が完全に揃う必要はなく、 \mathbf{Q} の方向で特徴づけられる磁気ドメインに分かれることもよくあります。さらには、キラルな液晶分子において、分子配向が単一の方向にねじれるコレステリック液晶相のほかに複数の変調ベクトルで特徴づけられるブルー相が出現するのと同じように、磁性体においても、場合によっては、複数の磁気変調ベクトルで特徴づけられる磁気構造が出現することが次々と明らかになっています。複数の磁気変調が重畳すると、多くの場合、非共面的な磁気配列が実現し、角運動量を有する準粒子に対して実効的な磁場として働きます。このことが、複数の変調ベクトルで表現される磁気配列への興味をもたらしています。

私たちのグループは、新学術領域研究の期間中、 Gd_2PdSi_3 , $\text{Gd}_3\text{Ru}_4\text{Al}_{12}$, $\text{Dy}_3\text{Ru}_4\text{Al}_{12}$, SrFeO_3 , GdRu_2Si_2 , GdRu_2Ge_2 , EuAl_4 といった舞台において複数の磁気変調ベクトルで特徴づけられる磁気構造を放射光 X 線や中性子を使って研究してきました[1-7]。これらの回折実験によって、磁気変調ベクトルを精度よく決めることができます。一方で、回折実験によって複数の \mathbf{Q} を持つ状態と、単一の \mathbf{Q} を持つ磁気構造の多ドメイン状態を見分けることは容易ではありません。さらに、複数の磁気伝搬ベクトルを持つ状態には、各成分の位相が磁気構造に関係するものがあります。例えば、六方晶で上述した 3 方向の磁気変調が等しい振幅で重畳する場合、位相のみの変化によって、図に示すように異なる型の磁気構造が実現されるのです。我々は、高調波成分の検出などでこれらの問題に対処しましたが、より本質的な磁気構造決定のためには、実空間スピン観測技術の向上が望まれます。



図 1: 六方晶磁性体において $q,0,0$; $0,q,0$; $q,-q,0$ の 3 方向の磁気変調が同じ振幅で重畳した triple- \mathbf{Q} 磁気配列の例。色と強度はそれぞれ磁化の面内成分と面直成分を表現している。これら 3 つの状態は、位相関係のみの変化によって得られる。左と右は、いずれも磁気スキルミオンの三角格子状態だが、磁化の向きが逆になっている。中央は、磁気メロンと磁気反メロンの三角格子状態。

参考文献

- [1] T. Kurumaji et al., Science **365**, 914 (2019) [<https://doi.org/10.1126/science.aau0968>].
 [2] M. Hirschberger et al., Nature Commun. **10**, 5831 (2019) [<https://doi.org/10.1038/s41467-019-13675-4>]
 [3] S. Gao et al., Phys. Rev. B **100**, 241115(R) (2019) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.241115>]
 [4] S. Ishiwata et al., Phys. Rev. B **101**, 134406 (2020) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.134406>]
 [5] N. D. Khanh et al., Nature Nanotechnology **15**, 444 (2020) [<https://doi.org/10.1038/s41565-020-0684-7>]
 [6] R. Takagi et al., Nature Commun. **13**, 1472 (2022) [<https://doi.org/10.1038/s41467-022-29131-9>]
 [7] H. Yoshimochi et al., Nature Physics in print.

研究室 HP: <http://symm.k.u-tokyo.ac.jp/>

有馬孝尚（東京大学・新領域創成科学研究科・教授）

パルス電流を印可した磁性体のナノスケール磁気イメージング

D01 班 石坂 香子

磁性体中のナノスケール磁気テクスチャ（磁壁、磁気スキルミオンなど）は粒子の性質を持ちつつ結晶中をスピーディに動き回ることから次世代情報担体として期待されており、その運動論に関心がもたれています。これを実験的に追究するために、私達は短パルスレーザーを電子顕微鏡のフォトカソード電子源に組み込んだ超高速時間分解透過電子顕微鏡（UTEM）を用いた研究を進めています[1-3]。これまでナノ秒光パルスをダイナミクスのトリガー（ポンプ）、ナノ秒電子パルスをプローブに用いたポンププローブ実験により、磁気スキルミオンの生成、運動などの実時間計測などに成功してきました[3]。現在はさらに試料に印可する電流パルスをプローブの電子パルスと同期することにより、電流印可下の磁性体のナノスケール磁気イメージングを行っています。これにより、電流により駆動される超高速な磁気ダイナミクスを調べることができます。

例として、室温スキルミオンのホスト物質である $(\text{Fe}_{0.63}\text{Ni}_{0.3}\text{Pd}_{0.07})_3\text{P}$ の強磁性状態において得られた磁壁のダイナミクスの様子を図1に示します。図1(a)が実験のセットアップ、図1(b)が得られたローレンツTEM像です。図1(b)において白い直線状に見える部分が強磁性磁壁です。この磁壁に対して垂直な方向（ x 方向）に時間幅100 nsの電流パルスを印可しながら時間分解計測を行ったところ、 $-x$ ($+x$)方向の電流印可にともない $+70$ nm (-50 nm)ほど磁壁が移動する様子を観測することができました[図1(c,d)]。これはスピン移行トルクによる磁壁の運動とピン止め効果の競合による振る舞いと考えることができます。今後、磁壁だけでなく、磁気スキルミオンや螺旋磁性を含む多様な磁気構造の運動の計測へと展開してゆく予定です。

参考文献

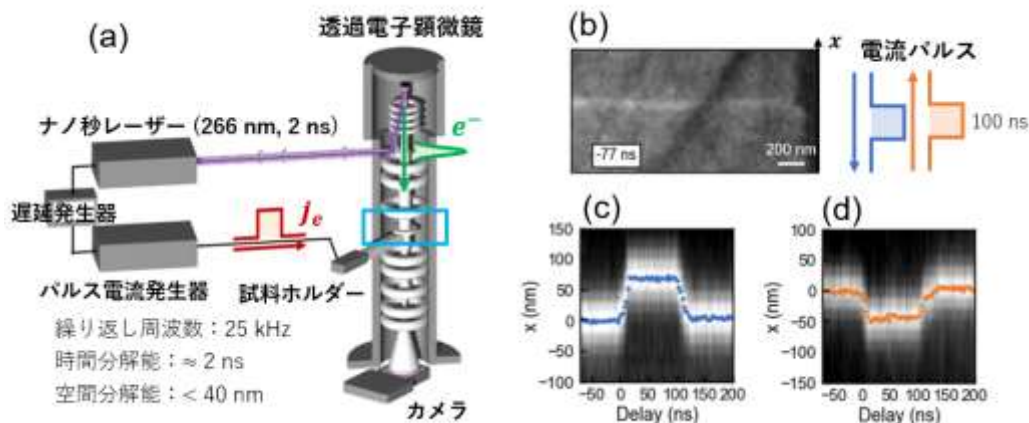


図1:(a) パルス電流と同期した超高速時間分解透過型電子顕微鏡。(b) 強磁性状態で観測された磁壁に対して垂直方向に電流パルスを印可し計測した。(c) $-x$ 方向および(d) $+x$ 方向にパルス電流を印可した際の磁壁位置の時間変化。

[1] A. Nakamura, T. Shimojima, K. Ishizaka, Nano Lett. 23, 2490–2495 (2023). [10.1021/acs.nanolett.2c03938].

[2] T. Shimojima, A. Nakamura, K. Ishizaka, Microscopy dfad021 (2023). [10.1093/jmicro/dfad021].

[3] T. Shimojima, A. Nakamura, X. Z. Yu, K. Karube, Y. Taguchi, Y. Tokura, K. Ishizaka, Sci. Adv. 7, eabg1322 (2021). [10.1126/sciadv.abg1322].

研究室 HP: <http://ishizaka.t.u-tokyo.ac.jp>
<https://cems.riken.jp/jp/laboratory/esprt>

石坂香子（東京大学・大学院工学系研究科・教授）

量子液晶物質の光による物性制御に向けて

D01 班 岡崎 浩三

我々は、量子液晶物質の光による物性制御を目指し、高次高調波レーザーを用いた時間・角度分解光電子分光装置におけるポンプ光の波長可変化に取り組んできました。時間分解分光とは、ポンプ・プローブ法とも呼ばれ、物質にポンプ光を照射することで非平衡状態にし、プローブ光で非平衡状態の物質を観測する手法です。角度分解光電子分光は物質中の電子のバンド構造を直接観測する実験手法で、ポンプ・プローブ法と組み合わせることで、ポンプ光によって生じた非平衡電子状態を直接観測することが出来ます。高次高調波レーザーは、フェムト秒オーダーの超短パルスレーザーをアルゴンなどの希ガスに集光することで 20-60 eV の極紫外光を発生させる高次高調波発生(HHG)という技術を用いたレーザーです。一般に、外部光電効果を生じさせる紫外線以上のエネルギーを持つレーザー光の発生は難しいのですが、この技術を用いることで、より広い運動量・エネルギー領域での非平衡電子状態を観測することが出来るようになります。

図 1 はポンプ光波長可変高次高調波レーザー時間分解光電子分光装置の概略図です。ポンプ光の波長を可変にするには光パラメトリック増幅(OPA)という技術によってレーザーの波長を変換しますが、これには大強度の超短パルスレーザーが必要になります。一方で、HHG にも大強度が必要になり、1 台のレーザーで十分な出力を得ようすると出力が不安定になってしまう可能性があります。そこで我々は、オシレータ(発振器)からの出力を 2 つに分け、それぞれをノーベル物理学賞の受賞対象にもなったチャープパルス増幅という技術を用いた再生増幅器に入力することで、OPA によるポンプ光発生、HHG によるプローブ光発生の両方に十分な強度のレーザー出力を得ることが出来るようになり、ポンプ光波長可変な時間・角度分解光電子分光測定が可能になりました。

具体的な研究対象としては、最近発見されたカゴメ格子を持つ超伝導体 CsV_3Sb_5 やその関連物質などの非平衡電子状態の観測を行っています。カゴメ格子は幾何学的フラストレーションを持つことで主にスピン系が興味を持たれていましたが、金属でも複数のディラックバンドや van Hove 特異点を持つなど、様々な興味深い点があることがわかってきました。さらに、 CsV_3Sb_5 は時間反転対称性が破れた電荷秩序相や超伝導相、ネマティック秩序相への転移を示す可能性などでも注目を集めています。この物質についてはポンプ光の波長を変えた測定はまだ出来ていませんが、1.55 eV の近赤外ポンプによる測定では、光励起による van Hove 特異点のエネルギーシフト、電荷密度波の振幅モードの観測などに成功しています。また、高分解能レーザー角度分解光電子分光を用いた測定では、関連物質における電子-格子相互作用によるバンドのキック構造[1]、超伝導ギャップ[2]などの観測にも成功し、超伝導のメカニズムに直結する知見も得ています。

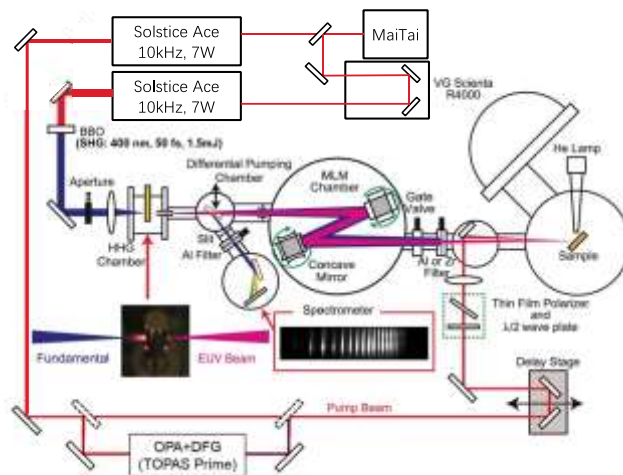


図 1: ポンプ光波長可変高次高調波レーザー時間分解光電子分光装置の概略図

[1] Y. Zhong, K. Okazaki et al., *Nat. Commun.* **14**, 1945- (2023) [<https://doi.org/10.1038/s41467-023-37605-7>].

[2] Y. Zhong, K. Okazaki et al., *Nature* **617**, 488-492 (2023) [<https://doi.org/10.1038/s41586-023-05907-x>].

カイラル磁性研究

D01 班 戸川 欣彦

私たちは、微細加工技術を用いて量子液晶物質のナノデバイスを作製し、相制御を精密に行い、電磁場イメージングやマイクロ波領域までの電磁計測により得られる知見に基づいて、量子液晶物質に固有の物質機能を開拓することを目指しています。特に注目しているのは、カイラルスピン物質に現れるカイラルスピソリトン格子は周期可変な磁気構造です。その形成過程は古典的なキラルネマティック液晶（コレスレリック液晶）に知られるフレデリクス転移と同様にモデル化されることからスピン系の液晶状態と見なすことができます。私たちは新物質の開拓[1-3]、計測法の開発[4-5]、新物性の探索[5-8]を行い、スピン液晶秩序が示す非自明な電磁応答を明らかにしました。一番の研究ハイライトは集団励起スペクトルの検出（図 1）です[8]。その可変な周波数特性はとても興味深く、サブテラヘルツ帯域で動作する高周波磁性材料として次世代通信システム（Beyond 5G）の技術開発に貢献すると期待されます。室温動作や減衰特性の向上へ向けて新物質探索が進んでいます。解説記事[9-12]もあります。ぜひご一読ください。

参考文献

- [1] Y. Kousaka, T. Ogura, J. Jiang, K. Mizutani, S. Iwasaki, J. Akimitsu, and Y. Togawa, *APL Mater.* **10**, 090704 (2022) [https://doi.org/10.1063/5.0101351].
- [2] K. Mizutani, J. Jiang, K. Monden, Y. Shimamoto, Y. Kousaka, and Y. Togawa, *AIP Advances* **13**, 095125 (2023) [https://doi.org/10.1063/5.0166333].
- [3] Y. Miyagi, J. Jiang, K. Ohishi, Y. Kawamura, J. Suzuki, D. R. Alshalawi, J. Campo, Y. Kousaka, and Y. Togawa, *APL Mater.* **11**, 101105 (2023) [https://doi.org/10.1063/5.0171790].
- [4] G. W. Paterson, A. A. Tereshchenko, S. Nakayama, Y. Kousaka, J. Kishine, S. McVitie, A. S. Ovchinnikov, I. Proskurin, and Y. Togawa, *Phys. Rev. B* **101**, 184424 (2020) [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.184424].
- [5] Y. Togawa, T. Akashi, H. Kasai, G. W. Paterson, S. McVitie, Y. Kousaka, H. Shinada, J. Kishine, and J. Akimitsu, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 014702 (2021) [http://doi.org/10.7566/JPSJ.90.014702].
- [6] Y. Shimamoto, F. J. T. Goncalves, T. Sogo, Y. Kousaka, and Y. Togawa, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 242401 (2019) [https://doi.org/10.1063/1.5129556].
- [7] F. J. T. Goncalves, Y. Shimamoto, T. Sogo, G. W. Paterson, Y. Kousaka, and Y. Togawa, *Appl. Phys. Lett.* **116**, 012403 (2020) [https://doi.org/10.1063/1.5131067].
- [8] Y. Shimamoto, Y. Matsushima, T. Hasegawa, Y. Kousaka, I. Proskurin, J. Kishine, A. S. Ovchinnikov, F. J. T. Goncalves, and YT, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 247203 (2022) [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.247203].
- [9] 戸川欣彦、カイラルリティとは何かー物質科学の視点からー、数理科学 **693**(3), 9-15 (2021).
- [10] 戸川欣彦、結晶カイラルリティと巨視的スピン応答、日本物理学会誌 **76**(10), 646-651 (2021).
- [11] Y. Togawa, A. S. Ovchinnikov, and J. Kishine, *Journal of the Physical Society of Japan* **92**, 081006 (2023) [https://doi.org/10.7566/JPSJ.92.081006].
- [12] 「量子液晶」 ニュースレター #2 (2020/4), #5 (2021/7), #6 (2022/1), #8 (2023/1), QLC チャンネル.

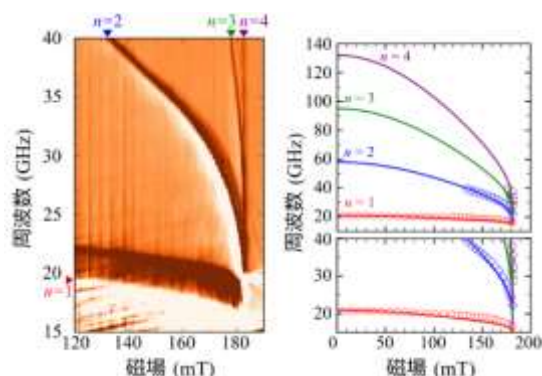


図 1: CrNb₃S₆ 結晶に現れるカイラルスピソリトン格子が示す集団励起スペクトル[8]。磁気共鳴の高次モードが 16 GHz から 40 GHz の幅広い周波数帯で現れることを世界で初めて観測しました。理論解析から 3 つ目の高次モードは 100 GHz を超えると見積もられます。元素置換した CrTa₃S₆ 結晶 [2] では周波数がさらに高くなり 550 GHz に到達すると予測されます。Beyond 5G 通信技術への展開が期待されます。

研究室 HP: <https://www.omu.ac.jp/eng/pe1/>

戸川欣彦（大阪公立大学・工学研究科・教授）

トポロジカル光波を用いた電荷液晶制御に向けて

D01 班 戸田 泰則

量子液晶の制御と機能開拓に向け、本研究では光渦に代表されるトポロジカル光波を利用した超高速分光に取り組んできました。本稿では Bi 系銅酸化物高温超伝導体を対象に進めてきた光誘起擬ギャップ準粒子ダイナミクス観測と光渦パルスを使った時空間制御応用について成果をまとめます。

銅酸化物高温超伝導体は超伝導相転移温度 T_c 以上の温度領域で、通常の金属とは異なる性質をもつ擬ギャップと呼ばれる電子状態が存在し、電荷液晶に分類される回転対称性破れを伴う物性が発現します。この擬ギャップは光領域に及ぶ広いエネルギー範囲のスペクトル変化を示すため、超短パルス光を用いた準粒子応答による高感度検出が可能です。例えば図上段のカラーマップは時間分解ポンブプローブ (P-pr) 分光を用いて観測される Bi2212 ($T_c \sim 90\text{K}$) の準粒子応答の温度依存性です。青色で示される擬ギャップ準粒子応答が元素置換に応じて大きく変化しています。つまり空間的な不均一化が擬ギャップ制御に有効であることが分かります[1]。同様の傾向は Bi2201 (図中央左 ($T_c \sim 34\text{K}$), 右 (20K)) でも観測され、普遍性も確認できます。さらに Bi2201 の場合は T_c が低いため、超伝導準粒子応答 (図の暖色領域) との分離解析が実現されます。この特性は超伝導と擬ギャップとの関係性を調べる上で重要です。図下段に示すのは、P-pr にもう一つ相破壊 (D) パルス光を組み合わせたコヒーレントクエンチ (CQ) 分光による Bi2201 の観測結果です。クエンチ後の経過時間 (縦軸: t_{DP}) に対する準粒子応答 (横軸: t_{Pr}) がマップされており、 $t_{DP}=0$ の応答の消失は超伝導や擬ギャップの瞬時的な相破壊を意味しています。このとき縦軸方向の準粒子応答変化は超伝導および擬ギャップが再形成する過程を反映します。図では、超伝導ギャップの形成開始が擬ギャップの形成完了と相関を持つことが示されます。さらに D パルスに光渦を適用すると、クエンチ領域をリング状にするような空間制御手段として利用できます。我々は Bi2212 を対象に、D パルス強度増加に伴う超伝導領域の空間局在化を証明しました[2]。生体試料で実現される超解像イメージングと同様の原理を量子多体系に適用できたと言えます。光渦を利用した超伝導の CQ 分光の概要はニュースレター No.6 で紹介していますのでご参照ください。同様の空間変調や制御は擬ギャップに対しても適用可能であり、電荷液晶に対する制御手段として期待できます。トポロジカル光波の高い自由度[3]を活用した機能開拓を進めていきます。

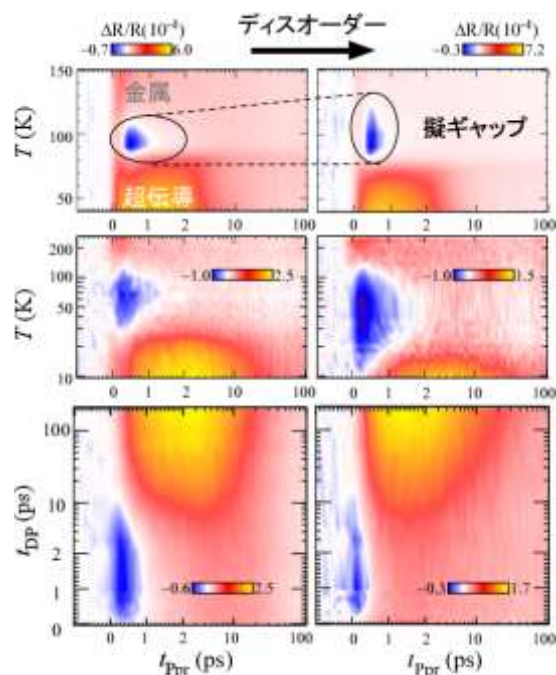


図 1: 最適ドーピング Bi2212 (上) および Bi2201 (中央) における準粒子応答の温度依存性. (下) Bi2201 の秩序再形成ダイナミクス ($T=10\text{K}$). 元素置換により面外ディスオーダーを増加 (左→右) させている.

[1] Y. Toda, *et al.*, Phys. Rev. B **104**, 094507 (2021).

[https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.094507]

[2] Y. Toda, *et al.*, Opt. Express **31**, 17537 (2023). [https://doi.org/10.1364/OE.487041]

[3] K. Nakagawa, *et al.*, Appl. Phys. Express **13**, 042001 (2020). [https://doi.org/10.35848/1882-0786/ab7bf7]

研究室 HP: <https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/optphys/exp/>

戸田泰則 (北海道大学・大学院工学研究院・教授)

金属らせん磁性体におけるキラリティの制御・検出

D01 班 小野瀬 佳文

らせん磁性体は、文字通り磁気モーメントがらせん状に整列した磁性体のことである。図 1 のように、らせんの巻き方（キラリティ）には左右二通りがあり、結晶の対称性が高ければこの二つの状態は縮退している。絶縁体のらせん磁性体においては、ジャロシンスキー守谷相互作用の逆効果を通じて電気磁気効果が生じるため、電場磁場の印加によってキラリティが制御出来ることは知られていたが、電場が大きく印加できない金属らせん磁性体においては、最近までキラリティの制御は達成されていなかった。

最近我々は、金属らせん磁性体におけるキラリティの制御や検出の手法を開発した[1-3]。まず、図 2 のように磁場と高密度の電流を平行もしくは反平行に印加すると、キラリティの縮退が破れて平行・反平行に依存してキラリティがそろうことを明らかにした[1]。最初は、電流をヘリカル磁気構造が安定しない高磁場で電流を印加して、磁場を減少させてヘリカル磁気構造へ転移させるといった方法でキラリティを制御していたが、ヘリカル磁気状態で強いパルス電流を印加することで瞬時にキラリティ制御が可能であることも明らかにした。制御したキラリティは、最初非相反伝導と呼ばれる抵抗率の第二高調波成分を解析して得られる手法で検出していたが、図 3 のようにその後スピントロニクスが高い白金 (Pt) 電極を用いると電流印加の横電圧すなわち横抵抗としてキラリティの情報が引き出せることを明らかにした[3]。

以上のような成果によって金属らせん磁性体におけるキラリティ自由度の制御・検出が比較的簡便に行えるようになってきた。これらを用いた、らせん磁性体をもとにしたスピントロニクスへの展開が視野に入ってきたといえる。

参考文献

- [1] N. Jiang, Y. Nii, H. Arisawa, E. Saitoh, Y. Onose, *Nature Communications* **11**, 1601 (2020) [<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15380-z>].
 [2] Hidetoshi. Masuda, T. Seki, J. Ohe, Y. Nii, K. Takanashi, Y. Onose, preprint [<https://arxiv.org/abs/2212.10980>]
 [3]Hidetoshi Masuda, T. Seki, Y. Nii, Hiroto Masuda, K. Takanashi, Y. Onose, preprint [<https://arxiv.org/abs/2205.13112>].

研究室 HP: <http://onoselab.imr.tohoku.ac.jp/>

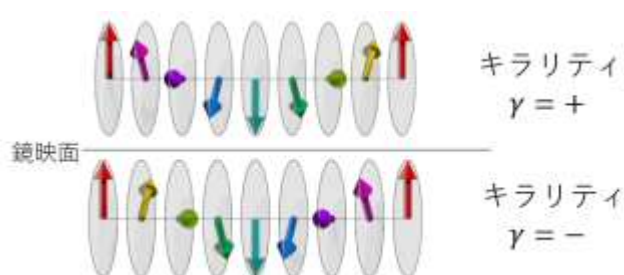


図 1 らせん磁性体におけるキラリティ自由度

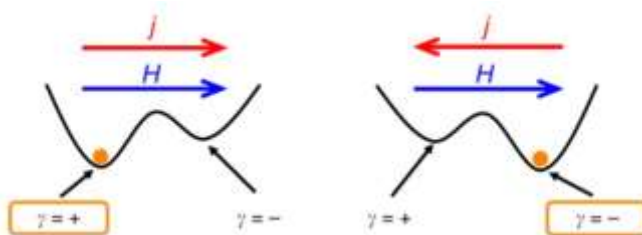


図 2:キラリティ制御の概念図[1]。印加した電流 j と磁場 H が平行か反平行かに依存してキラリティが制御される。

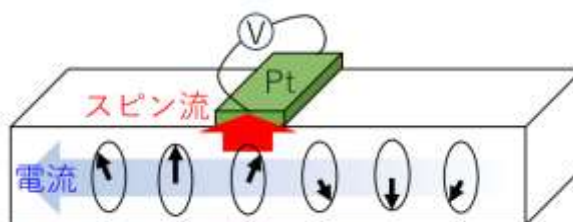


図 3 : キラリティ依存横抵抗の概念図。

トポロジカルスピン液晶の創発的磁気光学応答

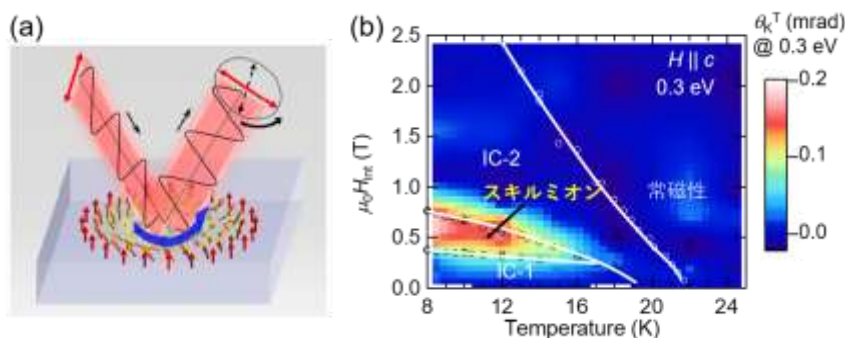
D01 班 岡村 嘉大

分子から構成される（古典）液晶は、液体のような流動性を持つにも関わらず、結晶のように分子の異方性による大きな複屈折性を示すため、重要な光学材料として認識されています。本公募研究で注目した電子スピンの織りなす「スキルミオン」は、古典液晶的な特徴だけでなく、トポロジカルなスピン配列に由来した量子力学的効果を示すことで大きな注目を集めてきました。ただしこれまでは輸送現象においてその効果が実証されてきましたが、他の物理現象についてはほとんど議論されていません。そこで本研究では、量子液晶としての特性を利用することで、古典液晶では現れない創発的な光学応答の実現に挑戦してきました。

そもそもスキルミオンとは一つがナノメートルオーダーの磁気渦であり、構成するスピンを球面上に射影すると球面の立体角を覆いつくすという、いわば「トポロジカルな」スピン配列を持っています（図(a)）[1]。こうした特殊なスピン配列がある状況においては、伝導電子の波動関数にベリー位相と呼ばれる量子力学的な位相が付与され、物質に対して実効的に数十テスラもの巨大な「創発」磁場が印加されている状況になります。したがって、印加磁場に比例する磁気光学効果についても同様の増大が生じる可能性があります（図(a)）。

実際にこうした目論見通り、我々は Gd_2PdSi_3 という物質においてスキルミオン由来の磁気光学効果の観測に成功しました[2]。この物質では、非常に短周期のスキルミオン格子が観測されており、期待される創発磁場の大きさは報告されている物質の中でも最大級です。今回、磁気光学カー効果について磁場・温度依存性を詳細に調べたところ、確かにスキルミオン相においてのみ光学応答が増強していることがわかりました（図(b)）。スペクトル応答について詳細な解析を進めると、スキルミオン相においてのみ共鳴構造が発現しており、これによって磁気光学効果が増強されていることを突き止めました。実はこの効果は従来の強磁性体における磁気光学効果の微視的機構とは対照的にスピン軌道相互作用を必要とせず、区別して「トポロジカル磁気光学効果」と呼ばれており、今回初めてその実験的な実証に成功したといえます。

スキルミオンの創発磁場は、直観的には伝導電子とスキルミオン構造が結合することで初めて発現します。しかし、今回のトポロジカル磁気光学効果は伝導電子のダイナミクスとは関係のないバンド間遷移について観測されているため、原理的には伝導電子の存在しない絶縁体においても発現することが期待されます。また、こうしたスキルミオンと光の強い結合はスキルミオンの光検出だけでなく、光制御（生成・消滅など）の可能性も示唆しており、今後も様々な展開が期待されます。



(a) スキルミオンによるトポロジカル磁気光学効果の概念図。(b) トポロジカル磁気光学効果の温度磁場相図に対するカラーマップ。

参考文献

- [1] Y. Tokura and N. Kanazawa, *Chemical Reviews* 121, 2857 (2021).
 [2] Y. D. Kato, Y. Okamura, M. Hirschberger, Y. Tokura, and Y. Takahashi, *Nature Communications* 14, 5416 (2023).

研究室 HP: https://www.qpec.t.u-tokyo.ac.jp/takahashi_lab/index.html

岡村嘉大（東京大学・工学系研究科・助教）

三角格子反強磁性体 Ag_2CrO_2 における巨大異常ホール効果

D01 班 新見 康洋

異常ホール効果は、印加電流とその物質の磁化の大きさに比例して、ゼロ磁場でも有限の横電場が発現する効果で、その発現起源は外因的散乱と内因的散乱の 2 種類に大別されます。前者は物質内の不純物における非対称散乱による効果、後者はベリー曲率から生じる伝導電子の異常速度による効果であり、物質のバンド構造に由来します。縦伝導率と異常ホール伝導率には、物質固有のパラメータに依存しない普遍的なスケールリング則が存在することが知られており [1]、これまでに多数の磁性体における異常ホール効果がスケールリング則で説明されてきました。

その一方で近年、このスケールリング則に従わない磁性体の探索が盛んに行われています。例えば、非共面的スピン構造をもつ磁性体は、余分なベリー曲率を獲得する可能性があり、そのような磁気構造においては、熱ゆらぎによって異常ホール効果が著しく増強されることが理論的に提案されています [2]。そこで本研究課題では、スピン軌道相互作用が弱く、かつスピン液晶の候補物質であるフラストレーションの強い三角格子反強磁性体 Ag_2CrO_2 [3,4] を用いて、異常ホール効果を詳細に調べました [5]。

Ag_2CrO_2 で測定された異常ホール角 ($\tan\theta_{\text{AHE}} = \text{異常ホール伝導率}\sigma_{\text{AHE}}/\text{縦伝導率}\sigma_{xx}$) の温度依存性を図 1(a) に示します。 Ag_2CrO_2 は 24 K で反強磁性体に転移することが知られていますが [3]、その温度近傍で異常ホール角が著しく上昇し、温度の低下とともに減少する振舞いが観測されました。このような温度依存性は、通常の磁性体で観測される振舞いとは大きく異なります [1]。また図 1(b) に異常ホール伝導率 σ_{AHE} を縦伝導率 σ_{xx} の関数としてプロットすると、特に伝導率の高いところでは、よく知られたスケールリング則から大きく逸脱することが分かりました。これらの結果は、非共面的スピン構造をもつ磁性体において、特に磁気転移温度近傍の熱ゆらぎの大きなところで、異常ホール効果が増大する最近の理論 [2] とよく一致することが分かりました。

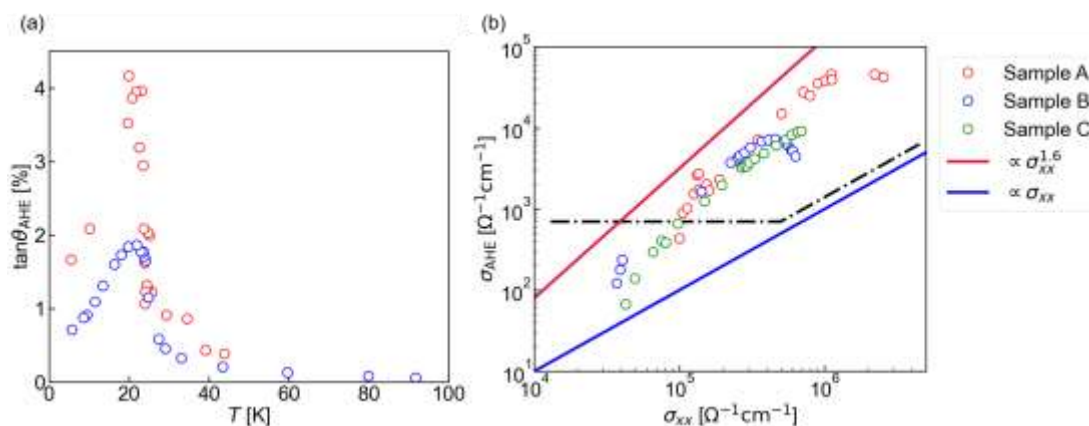


図 1:(a) 異常ホール角 $\tan\theta_{\text{AHE}}$ の温度依存性。(b) 異常ホール伝導率 σ_{AHE} と縦伝導率 σ_{xx} の関係。赤実線は $\sigma_{xx}^{1.6}$ 則、青線はスキュー散乱で期待される σ_{xx} 則、一点鎖線は Ref. [1] におけるスケールリング則を示す。

参考文献

- [1] N. Nagaosa *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1539 (2010). [DOI: 10.1103/RevModPhys.82.1539].
 [2] Y. Kato and H. Ishizuka, *Phys. Rev. Applied* **12**, 021001 (2019) [DOI: 10.1103/PhysRevApplied.12.021001].
 [3] H. K. Yoshida *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 123703 (2011) [DOI: 10.1143/JPSJ.80.123703].
 [4] H. Taniguchi *et al.*, *Scientific Reports* **10**, 2525 (2020) [DOI: 10.1038/s41598-020-59578-z].
 [5] M. Watanabe *et al.*, submitted.

研究室 HP: <https://nanoscale.jp>

新見康洋 (大阪大学・大学院理学研究科・教授)

International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023) 開催報告

D01 班 戸田 泰則

2023 年 8 月 8 日 (火) ~10 日 (木)、International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023)

【組織委員長: 芝内孝禎(領域代表、東大新領域)、木村剛(東大新領域)]を北海道大学(会場:工学部オープンホール)で開催しました。招待講演 13 件(米国 6 件, アジア 2 件, 欧州 1 件, 国内 4 件)、口頭講演 16 件、ポスター講演 118 件の発表があり、海外 5 か国 11 名(米国 6 名, アジア 3 名, 欧州 2 名)を含む 170 名を超える量子液晶研究者が集まりました。この夏は猛暑日が続き、北海道も例外とはいきませんでした。3 日間を通して盛況のうちに終了することができました。講演者、参加者、開催にご尽力いただいた QLC 関係者の皆さまに感謝いたします。

前回の国際会議 QLC2021 はコロナ禍のためオンライン開催でしたが、今回は完全対面で開催されました。入国規制の完全撤廃が 4 月末だったため海外からの参加者が限定的でしたが、いずれのセッションも活発な議論が繰り広げられました。特に初日と 2 日目の午後に設けられたポスターセッション(会場:工学部アカデミックラウンジ)は大変な盛り上がりを見せ、対面発表の重要性と醍醐味を再認識した次第です。多数の優れたポスター発表の中から、2 名の大学院生に QLC2023 Young Researcher Award が授与され、10 月 6 日(金)の第 11 回 QLC 若手コロキウムで記念講演が行われました。口頭講演は新物質や技術開発、新理論に基づく物性開拓や現象予測といった量子液晶に関連する多彩なセッションで構成されました。プログラムの一覧を次ページ以降に添付しますので、ご参照ください。また講演内容の詳細についてお知りになりたい場合は、QLC2023 ホームページ <http://qlc.jp/2022/11/22/qlc2023/> からアブストラクトを閲覧いただけます(要パスワード)。

本稿執筆時からは遠い昔のように感じますが、開催準備を開始した 1 年前は入国規制や会場の定員制限など、国際会議の対面開催に対して不確定な要素が多かったように思います。領域最終年度に何とか国際交流を推進させたいという領域代表を始めとするメンバーの熱意が今回の対面開催を実現させたと言えるでしょう。QLC2023 が量子液晶研究のさらなる飛躍の契機となることを祈念します。



QLC2023 の参加者集合写真

International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023)
Program

Tuesday, August 8, 2023

Opening

09:15-09:30 Takasada Shibauchi, Co-Chair of QLC2023 (Univ. of Tokyo, Japan)

Session 1

Chair : Atsushi Fujimori (National Tsing Hua Univ., Taiwan)

09:30-10:00 Superconducting gap function and specific heat below T_c in doped FeSe near a nematic QCP
Andrey V. Chubukov (Univ. of Minnesota, USA)

10:00-10:30 Emergence of multipole polaron and electronic anisotropy in the devil's staircase of CeSb
Kenta Kuroda (Hiroshima Univ., Japan)

Session 2

Chair : Kenya Ohgushi (Tohoku Univ.)

10:50-11:10 Spin switching by terahertz Floquet engineering using Tesla-class fields in antiferromagnets
Hideki Hirori (Kyoto Univ., Japan)

11:10-11:30 Electric-field control of magnetic textures and topological orders in Mott insulators
Masahiro Sato (Chiba Univ., Japan)

11:30-11:50 Optically induced magnetization switching in NiCo₂O₄ thin films by using Ultrafast Lasers
Hiroki Watati (Univ. of Hyogo, Japan)

Poster Session 1

13:00-14:30 Poster Presentation

Session 3

Chair : Tetsuo Hanaguri (RIKEN, Japan)

15:00-15:30 Interaction-driven quantum anomalous Hall state, Josephson diode effect and flat band superconductivity with quantum metric in moiré materials

Kam Tuen Law (Hong Kong Univ. of Science and Technology, Hong Kong)

15:30-15:50 Nonreciprocal charge transport of fluctuating finite-momentum Cooper pairs
Akito Daido (Kyoto Univ., Japan)

15:50-16:10 Manipulating the nematic director by magnetic fields in the spin-triplet superconducting states of Cu_xBi₂Se₃ and K₂Cr₃As₃
Kazuaki Matano (Okayama Univ., Japan)

Session 4

Chair : Ryotaro Arita (RIKEN / Univ. of Tokyo, Japan)

16:30-17:00 Phonon dynamics in the Kitaev materials
Natalia Perkins (Univ. of Minnesota, USA)

17:00-17:20 Computational design of Kitaev materials
Yukitoshi Motome (Univ. of Tokyo, Japan)

17:20-17:40 Spin loop-current textures in the Hubbard models
Takami Tohyama (Tokyo Univ. of Science, Japan)

Wednesday, August 9, 2023

Session 5

Chair : Hiroshi Kontani (Nagoya Univ., Japan)

09:00-09:30 Ultranodal state in multiband spin-1/2 superconductors
Peter J. Hirschfeld (Univ. of Florida, USA)

09:30-10:00 Smectic Pair Density Wave in EuRbFe₄As₄
Abhay Narayan Pasupathy (Brookhaven National Laboratory / Columbia Univ., USA)

10:00-10:20 Exotic pairing states with time-reversal symmetry breaking in FeSe-based nematic superconductors
Takasada Shibauchi (Univ. of Tokyo, Japan)

Session 6

Chair : Takasada Shibauchi (Univ. of Tokyo, Japan)

10:40-11:10 Electronic liquid crystal state in a kagome lattice antiferromagnet
Pengcheng Dai (Rice Univ., USA)

11:10-11:30 Bond Order Fluctuation Mechanism: Loop Current, Bond Order and Their Coexisting Phase in AV₃Sb₅
Rina Tazai (Kyoto Univ., Japan)

11:30-12:00 Discovery of a Novel Dirac Quantum Spin Liquid Candidate
Sara Haravifard (Duke Univ., USA)

Poster Session 2

13:00-14:30 Poster Presentation

Session 7

Chair : Takami Tohyama (Tokyo Univ. Science, Japan)

15:00-15:30 Micro-ARPES study of exotic quantum materials
Takafumi Sato (Tohoku Univ., Japan)

15:30-16:00 Quantum Material Micro-Resonators to Probe Symmetry Breaking
Carsten Putzke (EPFL, Switzerland)

16:00-16:20 Scanning tunneling microscopy observation of symmetry breaking in Landau levels at the ZrSiS surface
Christopher J. Butler (RIKEN, Japan)

- Session 8** Chair : Kensuke Kobayashi (Univ. of Tokyo, Japan)
- 16:40-17:10 Computationally assisted exploration of metastable perovskite-type oxides exhibiting exotic magnetism
Shintaro Ishiwata (Osaka Univ., Japan)
- 17:10-17:30 First-principles exploration of short-pitch skyrmion materials
Ryotaro Arita (RIKEN / Univ. of Tokyo, Japan)
- 17:30-17:50 Multi- q spin texture in the hexagonal quantum magnet $\text{Yb}_3\text{Ru}_4\text{Al}_{12}$
Taku J. Sato (Tohoku Univ., Japan)

Thursday, August 10, 2023

- Session 9** Chair : Tsuyoshi Kimura (Univ. of Tokyo, Japan)
- 09:00-09:30 Imprinting optical spin texture into liquid crystals
Hirokazu Kobayashi (Kochi Univ. of Technology, Japan)
- 09:30-09:50 Reentrant Antiferromagnetic Order in $S=3/2$ Square Magnet
Taka-hisa Arima (Univ. of Tokyo / RIKEN, Japan)
- 09:50-10:10 Orbital-ordered phase and nematic phase in spinel vanadates
Takuro Katsufuji (Waseda Univ., Japan)
- Session 10** Chair : Taka-hisa Arima (Univ. of Tokyo / RIKEN, Japan)
- 10:30-11:00 Chirality-induced spin polarization and enhanced x-ray circular dichroism in a collinear antiferromagnet
Atsushi Fujimori (National Tsing Hua Univ., Taiwan / Univ. of Tokyo, Japan)
- 11:00-11:20 Manipulation of Crystallographic Chirality in Chiral and Ferroaxial Crystals
Tsuyoshi Kimura (Univ. of Tokyo, Japan)
- 11:20-11:40 Chirality control and detection in metallic helimagnets
Yoshinori Onose (Tohoku Univ., Japan)

Closing

- 11:40-11:55 Tsuyoshi Kimura, Co-Chair of QLC2023 (Univ. of Tokyo, Japan)

International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023)
Poster Presentation List

Poster Session 1 _ Tuesday, August 8, 2023

- PS1-01 Ryotaro Sano (Kyoto University)
Surface acoustic waves-driven magnon valley Hall effect in atomically thin van der Waals antiferromagnets
- PS1-02 Risako Kikuchi (Nagoya University)
Electrical conductivity and screening effect of spin-1 chiral fermions scattered by charged impurities
- PS1-03 Yoshihiro Okamura (University of Tokyo)
Topological magneto-optical effect from skyrmion lattice
- PS1-04 Mina Udono (Chiba University)
Optical properties of the Wannier-Stark ladder and Stark shift of exciton in Mott insulators
- PS1-05 Hajime Ishikawa (University of Tokyo)
High magnetic field investigations of quantum spin liquid candidates based on the Cu-spin trimer
- PS1-06 Yuta Kimoto (Tohoku University)
Electric current induced resistivity anomaly in a helimagnet: indication of sliding motion
- PS1-07 Yuki Shiomi (University of Tokyo)
Unidirectional magnetoresistance in CoFeB/FeSe bilayer films
- PS1-08 Keisuke Adachi (Ibaraki University)
High Chern-number spin liquid states in perturbed Kitaev magnets
- PS1-09 Ryota Yambe (University of Tokyo)
Floquet engineering of magnetic interactions: Understanding based on the crystal symmetry lowering
- PS1-10 Rico Pohle (University of Tokyo)
Spin Nematics Meet Spin Liquids: Exotic Phases in the Spin-1 Bilinear-Biquadratic Model with Kitaev Interactions
- PS1-11 Takahiko Sasaki (Tohoku University)
Inelastic neutron scattering study on lattice dynamics at the 6K anomaly in the quantum spin liquid candidate κ -(BEDT-TTF) $_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$
- PS1-12 Seigo Ogawa (Okayama University)
 ^{75}As -NMR study of $\text{K}_2\text{Cr}_3\text{As}_3$
- PS1-13 Satoshi Tsuchiya (Hokkaido University)
Ultrafast pump-probe reflectivity study in the normal state of quarter-filled organic superconductor
- PS1-14 Shusaku Imajo (University of Tokyo)
The BCS-BEC crossover in organic superconductors
- PS1-15 Masanori Kanemoto (Ritsumeikan University)

- Hybrid-functional band structure of iron-based superconductors
 PS1-16 Shun Okumura (University of Tokyo)
- Helical instability of skyrmion strings induced by longitudinal spin-polarized currents
 PS1-17 Shunsuke Yoshizawa (National Institute for Materials Science)
 Imaging the domain structure and topological defects of charge density waves of $2H\text{-NbSe}_2$ by scanning tunneling microscopy
- Taichi Terashima (National Institute for Materials Science)
 PS1-18 In-plane nematic anisotropy revealed by interlayer resistivity measurements on the iron-based superconductor parent compound CaFeAsF
- Masaki Uchida (Tokyo Institute of Technology)
 PS1-19 Control of magnetic ground states in largely strained $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ films
- Kotaro Shimizu (University of Tokyo)
 PS1-20 Emergent electric field and resonance dynamics in a one-dimensional chiral magnet driven by an AC magnetic field
- Tsutomu Momoi (RIKEN)
 PS1-21 Dynamics of spin nematics revisited
- Kiyu Fukui (University of Tokyo)
 PS1-22 Effect of a magnetic field on the Kitaev model coupled to environment
- Shingo Kobayashi (RIKEN CEMS)
 PS1-23 Nuclear spin relaxation rate of nonunitary Dirac and Weyl superconductors
- Kodai Moriyama (University of Tokyo)
 PS1-24 Quantum critical phenomena caused by gradual structural variations in $\text{SrCo}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{P}_x)_2$
- Akane Inada (Hokkaido University)
 PS1-25 Third-order transverse magnetic susceptibility under ferro-axial ordering
- Masahiro Naritsuka (RIKEN)
 PS1-26 Superconductivity in the monolayer NbSe_2 twisted on graphene
- Miho Tanaka (Ibaraki University)
 PS1-27 Numerical study of the inverse Faraday effect in dissipative Rashba electron systems
- Hiroki Shoji (Osaka Metropolitan University)
 PS1-28 Systematic evaluation of exchange interactions using collective excitation of chiral spin solitons
- Akira Iyo (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))
 PS1-29 Novel superconductors in antiperovskite transition metal pnictides
- Yuki Amari (Keio University)
 PS1-30 Realization of spin nematic Skyrmion crystals in cold atom systems
- Koki Satow (Nagoya University)
 PS1-31 Hall conductivity in an effective model of spin-1 fermions
- Yutaka Akagi (University of Tokyo)
 PS1-32 Topological magnetism in quantum spin-nematics
- Takenori Fujii (University of Tokyo)
 PS1-33 Non-linear electrical conductivity and Kosterlitz-Thouless(KT) transition in underdoped Bi-2223
- Jushin Tei (Osaka University)
 PS1-34 Eliashberg analysis and topological crystalline superconducting states in UTe_2 with time-reversal symmetry
- Yasuyuki Kato (University of Tokyo)
 PS1-35 Hidden topological transitions in emergent magnetic monopole lattices
- Ryo Okugawa (Tokyo University of Science)
 PS1-36 Weyl superconductivity in multilayered quasicrystals
- Masahiro Hori (Tokyo University of Science)
 PS1-37 Multifractality and Hyperuniformity in the Disordered Bose-Hubbard Model on Quasicrystals
- Ryoga Hiyoshi (Hokkaido University)
 PS1-38 Quantum spin liquid state in $\text{Pb}_{(1-x)}\text{Sr}_x\text{CuTe}_2\text{O}_6$
- Takuya Nagashima (University of Tokyo)
 PS1-39 Study on superconducting gap structure of $\text{Fe}(\text{Se},\text{S})$ from impurity effects
- Tetsuo Hanaguri (RIKEN CEMS)
 PS1-40 Correlation-driven electronic nematicity in the Dirac semimetal BaNiS_2
- Fuki Sato (Tohoku University)
 PS1-41 Metal-insulator transition in $\text{Ru}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ with a honeycomb structure
- Ryutaro Okuma (University of Tokyo)
 PS1-42 Neutron scattering studies of the candidate Kitaev material Na_2PrO_3
- Masahiro O. Takahashi (Osaka University)
 PS1-43 Charge oscillation around a vacancy of Kitaev magnets
- Hiroya Nagato (Osaka University)
 PS1-44 Third harmonic generation and Higgs mode excitation in s-wave superconductors using terahertz vortex beam
- Koki Mizuno (Nagoya University)
 PS1-45 Majorana fermions in Fibonacci quasicrystal with spin orbital coupling
- Yasuhiro Asano (Hokkaido University)
 PS1-46 Physics of $j=3/2$ superconductors
- Kyohei Nakamura (Kyoto University)
 PS1-47 Intrinsic Superconducting Diode Effect and Decoupling Transition due to Orbital Effect
- Reona Kondo (University of Tokyo)
 PS1-48 Study on nematic superconductivity in tetragonal $\text{Fe}(\text{Se}, \text{S})$ using bulk measurements

- PS1-49 Suguru Hosoi (Osaka University)
Valley-dependent charge transport under strain in bismuth
- PS1-50 Minoru Kanega (Chiba University)
DC current generation by two-color laser in graphene
- PS1-51 Katsuhiko Tanaka (University of Tokyo)
Magnetoresistance in a tunnel junction with an antiferromagnet Mn_3Sn
- PS1-52 Haruka Matsumoto (University of Tokyo)
Superconductivity in hexagonal zirconium telluride Zr_6MTe_2 ($M = Fe, Co$)
- PS1-53 Toshihiko Muroi (University of Tokyo)
Magnetic field effects on the quadrupole order of the spin-orbit-coupled insulator Ba_2MgReO_6
- PS1-54 Keita Onodera (Hokkaido University)
Anomalous Dripping of Superfluid 4He Droplets
- PS1-55 Jianxin Huang (Nagoya University)
Even- and Odd-Parity Intra-Unit-Cell Bond-Order and Emergence Nematicity in Kagome Metals
- PS1-56 Takao Watanabe (Hirosaki University)
BCS-BEC Crossover Observed in Te-annealed $FeTe_{1-x}Se_x$ Single Crystals
- PS1-57 Nanse Esaki (University of Tokyo)
Electric field controllable thermal Hall effect of triplons in quantum dimer magnets $XCuCl_3$ ($X = Tl, K$)
- PS1-58 Yoshihiko Ihara (Hokkaido University)
 $^{27}Al, ^{55}Mn$ -NMR study for itinerant kagome antiferromagnet $Sc_3Mn_3Al_7Si_5$
- PS1-59 Ryuma Nagatomo (Hokkaido University)
Quantized Dripping Period of Superfluid 4He

Poster Session 2 _ Wednesday, August 9, 2023

- PS2-01 Yoshiaki Uchida (Osaka University)
Facile nanosheet synthesis using liquid crystals
- PS2-02 Yoshihiko Okamoto (University of Tokyo)
Superconductivity in Ternary Telluride Sc_6MTe_2 with $3d, 4d,$ and $5d$ Transition Metals
- PS2-03 Daigorou Hirai (Nagoya University)
Novel molecular orbital crystal and possible liquid crystal state in RuP
- PS2-04 Shengjie Fang (University of Tokyo)
Field dependent specific heat measurements of the Kitaev quantum spin liquid candidate $Na_2Co_2TeO_6$
- PS2-05 Toshiya Ikenobe (University of Tokyo)
Superconductivity induced by hole-doping in the nodal-line semimetal $NaAlGe$
- PS2-06 Takumi Sato (Hokkaido University)
Superconductivity with quasiparticle states below the gap
- PS2-07 Michiya Chazono (Kyoto University)
Finite-momentum Cooper pairing in few-layer transition metal dichalcogenides
- PS2-08 Youichi Yamakawa (Nagoya University)
Drastic magnetic-field-induced chiral current order and emergent current-bond-field interplay in kagome metal AV_3Sb_5 ($A=Cs, Rb, K$)
- PS2-09 Yuma Wada (Hokkaido University)
Temperature dependence of photoinduced carrier dynamics in the charge glass candidate θ -(BEDT-TTF) $_2$ CsCo(SCN) $_2$
- PS2-10 Hikaru Taneoka (Tohoku University)
Magnetotransport Properties of Itinerant Antiferromagnet $LaMnSi$
- PS2-11 Yasunori Toda (Hokkaido University)
Spatio-temporal dynamics of localized superconductivity generated by optical vortex pulse excitation
- PS2-12 Yuya Ikeda (University of Tokyo)
Photocurrent induced a bicircular light drive in centrosymmetric or rotational symmetric systems
- PS2-13 Taiki Kawamura (Nagoya University)
Theory of the electron correlation effect in the organic conductor (EDO-TTF-I) $_2ClO_4$
- PS2-14 Kota Miyakoshi (Hokkaido university)
Superconductivity and magnetism in high- T_c cuprate $La_2CuO_{4+\delta}$
- PS2-15 Kazushi Aoyama (Osaka University)
Half-quantum-shifted Little-Parks oscillation and d-vector texture in spin-triplet superconductors
- PS2-16 Hirotake Itoh (Tohoku University)
Sub-picosecond manipulation of electronic-ferroelectric polarization in a rare-earth ferrite at room temperature
- PS2-17 Kanta Maruyama (Nagoya University)
Electronic structure of the nodal line semimetal candidate IrO_2
- PS2-18 Naoto Uematsu (Nagoya University)
Superconductivity in High-Entropy Antimonides
- PS2-19 Tatsuki Mori (Ritsumeikan University)
Instability of Bogoliubov Fermi surfaces under magnetic field
- PS2-20 Yuto Muramatsu (Nagoya University)
Large magnetoresistance in distorted rutile-type oxide WO_2
- PS2-21 Yuichi Yamasaki (National Institute for Materials Science)
Anisotropic electronic state with non-collinear magnetic order controllable by tilted magnetic field cooling
- PS2-22 Takuya Aoyama (Tohoku University)

- PS2-23 Kazutaka Kudo (Osaka University)
Piezomagnetic effect in antiferromagnetic MnTe with broken time-reversal symmetry
- PS2-24 Koki Shimura (Nagoya University)
Non-monotonic variation of superconducting transition temperature in BaPtAs-BaPtSb solid solution
- PS2-25 Tadashi Adachi (Sophia University)
Chiral charge current with orbital ferromagnetism in loop-current order state in kagome lattice
- PS2-26 Akifumi Mine (University of Tokyo)
Relationship between the Magnetism, Superconductivity and Electronic Nematicity in Iron-Chalcogenide FeSe_{1-x}S_x Thin Films
- PS2-27 Tomohiro Kitano (Tohoku University)
Study of the superconducting gap in the Kagome lattice superconductor CsV₃Sb₅ by low-temperature and high-resolution laser ARPES
- PS2-28 Kenji Kawashima (IMRA Japan Co., Ltd)
Electronic Properties of Molybdenum Iodides with Cluster Structure
- PS2-29 Kaede Isomura (Tohoku University)
Superconductivity in Ca-Free Cuprate with double CuO₂ layers
- PS2-30 Tatsuya Miki (Saitama University)
Superconductivity and spin correlations in *T**-type cuprate
- PS2-31 Hung-Cheng Wu (Tohoku University)
Physics of superconductor junction with Bogoliubov Fermi surface
- PS2-32 Moeta Tsukamoto (University of Tokyo)
Observation of temperature-induced piezomagnetic switching in Cu₂OSeO₃ polymorph synthesized under high-pressure
- PS2-33 Terunari Koshinuma (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)
Simultaneous magnetic imaging using the nitrogen-vacancy center and magneto-optical Kerr effect
- PS2-34 Jun Tokimoto (Tokyo University of Science)
Superconductivity in Ba-Ir-Ge ternary system
- PS2-35 Seiichiro Onari (Nagoya University)
Analysis of Photo-Pumped Hubbard Model on a Square Lattice Using Dynamic Mode Decomposition
- PS2-36 Koichi Ichimura (Hokkaido University)
Three-dimensional CDW order in kagome metal: Analysis of third-order term in three-dimensional GL theory
- PS2-37 Masamichi Nakajima (Osaka University)
Charge disproportionation in organic conductors studied by STM
- PS2-38 Hiroto Tanaka (Kyoto University)
Single-crystal growth and physical properties of iron-based superconductor Sr₂VFeAsO₃
- PS2-39 Koki Shinada (Kyoto University)
Superconducting nonlinear responses in magnetic fields
- PS2-40 Akira Kofuji (Kyoto University)
Orbital magnetoelectric effect induced by electric fields and temperature gradients in period metals
- PS2-41 Shungo Nakagawa (University of Tsukuba)
Unconventional gap dependence of high harmonic generation in the extremely strong light-matter coupling regime
- PS2-42 Akimitsu Kirikoshi (Hokkaido University)
Study of structural changes with doping levels in the cuprate superconductor Bi2212
- PS2-43 Yoshihiko Togawa (Osaka Metropolitan University)
Classification of Superconductivity in Multiorbital Systems by Multipoles
- PS2-44 Jobu Matsuno (Osaka University)
Enantiopure crystal growth of chiral inorganic compounds
- PS2-45 Shunsuke Nishimura (University of Tokyo)
Spin current generation from an epitaxial tungsten dioxide WO₂
- PS2-46 Ryuta Iwazaki (Saitama University)
Quantitative imaging of superconducting vortices penetrating a thin film using diamond quantum sensor
- PS2-47 Soichiro Yamane (Kyoto University)
Material-based analysis of organic Mott insulators
- PS2-48 Mikiya Tomikawa (Kyoto University)
Field-training-tunable charge order in kagome metal CsV₃Sb₅
- PS2-49 Shingo Yonezawa (Kyoto University)
Measurement of the current-induced strain in BaMn₂As₂ using fiber Bragg grating
- PS2-50 Shiori Sugiura (Tohoku University)
Anomalous in-plane anisotropy in the Kagome superconductor CsV₃Sb₅
- PS2-51 Shigeru Kasahara (Okayama University)
Noise spectroscopy in layered organic superconductor κ-(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂
- PS2-52 Yutaro Mino (Tokyo University of Science and AIST)
Superconducting gap structure of tetragonal FeSe_{1-x}S_x under high pressures
- PS2-53 Hiroshi Watanabe (Ritsumeikan University)
Single crystal growth of high-*T*_c superconductor (Hg,Re)Ba₂Ca₂Cu₃O_{8+δ}
- PS2-54 Tomoya Asaba (Kyoto University)
Possibility of BCS-BEC crossover in unconventional superconductors
- PS2-55 Shotaro Izutsu (Hokkaido University)
Evidence for an odd-parity nematic phase above the charge density wave transition in kagome metal CsV₃Sb₅

- Charge density wave and superconductivity in $ZrTe_3$
PS2-56 Yota Komiyama (Sophia University)
- Spin Fluctuations of Single-Layer Bi-2201 Cuprate in the Heavily Overdoped Regime
PS2-57 Shigetada Yamagishi (University of Tokyo)
- Ferroaxial Transitions in Glaserite-type Compounds: Database Screening, Phonon Calculations, and Experimental Verification"
PS2-58 Asato Onishi (University of Tokyo)
- Absence of conventional nematic susceptibility in kagome metal $CsV_3Sb_{5-x}Sn_x$
PS2-59 Takahiro Nozue (Tokyo University of Science, AIST)
- Pressure dependence of T_c in TI-based high- T_c cuprate superconductors



QLC2023 ポスターセッションの様子

The 14th APCTP Workshop on Multiferroics 開催報告

A01 班 木村 剛

- 【会議名】 : The 14th APCTP Workshop on Multiferroics
【会期】 : 2023 年 10 月 19 日 (木) ~10 月 21 日 (土)
【会場】 : 東京大学本郷地区キャンパス 武田先端知ビル 武田ホール
(〒113-0032 東京都文京区弥生 2-11-16)
【参加人数】 : 総数 87 名 [日本 63 名, 韓国 7 名, 中国 4 名, 台湾 4 名, オーストラリア 2 名,
米国 2 名, スイス 2 名, ドイツ 2 名, イタリア 1 名]

本ワークショップは、2008 年よりほぼ毎年 APCTP(Asia Pacific Center for Theoretical Physics)に加入するメンバー国にて持ち回りで開催されてきたものであり、今年度は日本にて開催された。マルチフェロイクスと総称される磁性と誘電性が強く相互作用した物質・材料に関する研究の近年の急速な進展を踏まえて、同系における多彩な新規複合物性に関する物質・材料開発とそれらを対象とした先進的な測定手法に焦点を当て、主にアジア・太平洋地域におけるマルチフェロイック物質の研究者の交流・共同研究を促進し、分野の発展に寄与することが本ワークショップの目的となっている。第 14 回となる今年度の会議は、東京大学大学院工学系研究科の木村剛教授を Chair, 大阪公立大学大学院工学研究科の森茂生教授を Co-chair として、東京都文京区にある東大本郷地区キャンパス武田先端知ビルにおいて、10 月 19 日(木)~21 日(土)に開催した。また、主催団体である APCTP をはじめ、住友化学株式会社、新学術領域研究「量子液晶の物性科学」、日本板硝子材料工学助成会に助成いただいた。

木村教授の開会挨拶から始まった 3 日間の開催期間中に、25 名の招待講演者および 5 名の一般参加者による口頭発表セッション、および、主に大学院生や若手研究者ら一般参加者によるポスターセッション(ポスター発表 34 件)を実施した。各口頭発表セッションの内容を以下に列挙する。

Session 1: Manipulation of ferroics

ペロブスカイト薄膜における 4 状態の極性状態の制御(Y. S. Oh), 第一原理計算による六方晶フェライトマルチフェロイクスのデザイン(H. Das), 高圧合成による四重ペロブスカイトマルチフェロイクスの合成(W.-T. Chen)など多様なアプローチによる「新規なマルチフェロイック物質デザイン・合成」に関する講演がなされた。

Session 2: Domain topology

BiFeO₃ ナノドットにおける強誘電ドメイン壁操作(J.-M. Liu), 原子間力顕微鏡を用いた強誘電体におけるドメイン壁のノイズ計測(J. Seidel), flexoelectric 効果を用いた polar bubble 操作(C.-H. Yang)など多様な「フェロイックドメイン操作」に関する講演がなされた。

Session 3: Chirality

キラルな結晶構造を持つ反強磁性体で観測された巨大な X 線円二色性(D.-J. Huang), フェロアキシヤル物質における磁気キラル二色性(T. Hayashida), 円偏光ラマン(T. Satoh)および円偏光共鳴非弾性 X 線散乱(H. Ueda)の手法により観測されたカイラルフォノンなど「カイラリティ関連の新規物性」に関する講演がなされた。

Session 4: Optical study

らせん磁性マルチフェロイクスにおける electromagnon に起因する電気磁気光学効果(Y. Takahashi), 伝導性を有する強誘電ドメイン壁の光学的手法による観測(H.-S. Park), ソフトフォノンに起因するテラヘルツ領域のバルク光起電力効果(Y. Okamura)など強誘電体, マルチフェロイクスにおける光学応答に関する講演がなされた。

Session 5: Metallic multiferroics

時間反転・空間反転の破れに起因した(超)伝導体における非相反伝導に関する理論(N. Nagaosa), らせん磁性金属系の物質開発(M. Hirschbeger), 時間反転・空間反転をともに破る金属系反強磁性体における反強磁性ドメイン観測(T. Kimura)など「伝導性マルチフェロイクス」に関する講演がなされた。

Session 6: Spiral multiferroics

Bi(Fe,Co)O₃ 薄膜における電場による磁化反転(M. Azuma), トポロジカルな観点からのらせん磁性マルチフェロイクスにおける秩序変数の反転に関する理論(S. Artyukhin), YBaCuFeO₅ の磁気構造(C.-H. Du) や六方晶フェライト薄膜の電気磁気特性(K. H. Kim)など「らせん磁性マルチフェロイクス」に関する講演がなされた。

Session 7: Altermagnetism

新たな磁気状態としての注目を集めている Altermagnetism に関する磁気対称性の議論(S.-W. Cheong), Altermagnet として議論されている MnTe におけるピエゾ磁気効果(T. Aoyama), non-coplanar な磁気構造を有する CoTe₃S₆ におけるトポロジカル輸送特性(S. Seki), 新概念 Alterferroicity の提案(S. Dong)などの講演がなされた。

Session 8: 2D ferroelectrics, 2D multiferroics

Free standing な 2 次元強誘電ペロブスカイト膜における物性・機能(Y. Nie), 低次元強誘電体における物性・機能に関する理論(S. Liu), 光学的手法による 2 次元 type-II マルチフェロイクスに関する物性測定(R. Comin)など「2 次元 (マルチ) フェロイクス」に関する講演がなされた。

Session 9: Device, Application

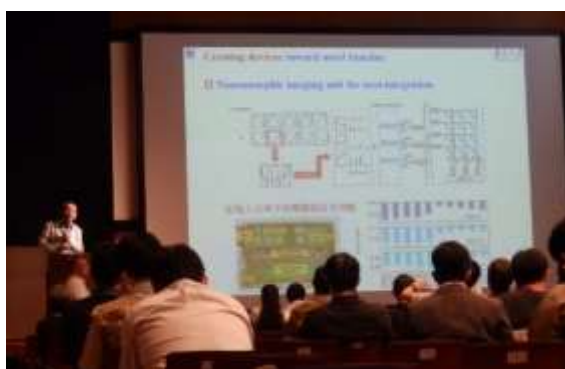
スキルミオンを利用した Logic device への応用に向けた研究(M. Kläui), BiFeO₃ における伝導性強誘電ドメイン壁を用いた Data storage に関する研究(P. Sharma), さらには BiFeO₃ の磁気特性を光触媒と組み合わせ合わせた応用に向けた研究(J.-Y. Wu)など, 多彩な「デバイスや応用」に向けた研究に関する講演がなされた。

以上のようにマルチフェロイクスおよびその関連物質・物性に関わる様々なアプローチの研究内容の発表がなされ, 各セッションで活発な議論が行われた。プログラム詳細は http://crystal.k.u-tokyo.ac.jp/14th_apctp/program.html を参照下さい。

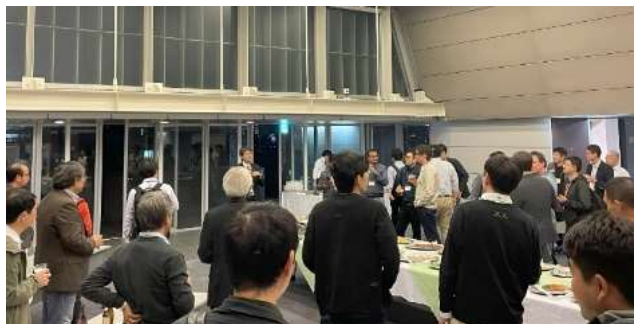
本シリーズのワークショップとしては 14 回目を数える本会議であったが, 新型コロナ感染症のため 2020 年の台湾での開催以来の対面での会議開催となった。そのメリットを享受するため, 会議初日の夕方には Welcome reception を, 会議 2 日目の夜には会場近くのレストランにおいて, Invited speakers dinner を催し, オンライン会議では得難い参加者間での交流・情報共有をはかることができた。また, 2 日目の昼食時には今回の会議で助成いただいた住友化学株式会社による若手研究者に向けたランチオンセミナーを開催し, 同社の進める強相関電子系やマルチフェロイクスに関わる新規プロジェクト

の紹介をいただいた。最終日 3 日目のすべてのセッションが終了した後に Closing session が開催され、木村教授よりワークショップで議論した研究内容に関して総括がなされ、また、全般が滞りなく進化したことに対して参加者への感謝の意が表された。また、第 15 回のワークショップをソウル国立大学の Kee Hoon Kim 教授を Chair として韓国のソウルにて開催されることが発表され、その後、本ワークショップの閉会が宣言された。会議終了後、国内外の複数の参加者から、本ワークショップの期間中に本分野の最新の研究を知ることができ、勉強になったなどの好意的なコメントが寄せられた。最後に本ワークショップにご支援いただいた新学術研究領域「量子液晶の物性科学」をはじめとする助成団体に御礼申し上げます。

The 14th APCTP Workshop on Multiferroics Program		
Oct. 19th (Thu)	Oct. 20th (Fri)	Oct. 21th (Sat)
Session 1: Manipulation of ferroics	Session 4: Optical study	Session 8: 2D ferro- & multi-ferroics
Opening T. Kimura	Youtarou Takahashi (Tokyo, Japan)	Yuefeng Nie (Nanjing, China)
Yoon Seok Oh (UNIST, Korea)	Heung-Sik Park (KAIST, Australia)	Shi Liu (Westlake, China)
Hena Das (Tokyo Tech., Japan)	* Yoshihiro Okamura (Tokyo, Japan)	Riccardo Comin (MIT, USA)
Wei-Tin Chen (NTU, Taiwan)	(Break)	(Break)
(Break)	Session 5: Metallic multiferroics	Session 9: Device, Application
Session 2: Domain topology	Naoto Nagaosa (RIKEN, Japan)	Mathias Kläui (Mainz, Germany)
Jun-Ming Liu (Nanjing, China)	* Max Hirschberger (Tokyo/RIKEN, Japan)	Pankaj Sharma (Flinders, Australia)
Jan Seidel (UNSW, Australia)	* Tsuyoshi Kimura (Tokyo, Japan)	Jhen-Yang Wu (Tokyo Tech., Japan)
Chan-Ho Yang (KAIST, Koera)	(Group Photo)	Closing T. Kimura
(Lunch)	Luncheon Seminar (Lunch)	
	Session 6: Spiral multiferroics	* は新学術班員
Poster Session	Masaki Azuma (Tokyo Tech., Japan)	# は新学術班員のグループメンバー
	Sergey Artyukhin (IIT, Italy)	
Session 3: Chirality	Chao-Hung Du (Tamkang, Taiwan)	
Di-Jing Huang (NSRRC, Taiwan)	Kee Hoon Kim (SNU, Korea)	
#Takeshi Hayashida (Tokyo, Japan)	(Break)	
Takuya Satoh (Tokyo Tech., Japan)	Session 7: Altermagnetism	
Hiroki Ueda (PSI, Switzerland)	Sang-Wook Cheong (Rutgers, USA)	
	#Takuya Aoyama (Tohoku, Japan)	
	Shinichiro Seki (Tokyo, Japan)	
Welcome reception	Shuai Dong (Southeast, China)	
	Invited speakers dinner	



口頭発表セッション。



ウエルカムレセプション。



ポスターセッション。



集合写真。

「第 17 回物性科学領域横断研究会」開催報告

領域代表 芝内 孝禎

2023 年 11 月 24 日（金）、25 日（土）の 2 日間にわたって、第 17 回物性科学領域横断研究会が名古屋工業大学にて対面開催されました。この研究会は、物性科学に関連した新学術領域研究および学術変革領域研究(A)の領域が合同で開催するものであり、今回は「超秩序構造」領域代表の林好一名古屋工業大学教授が中心となって運営を担当され、14 領域が参加しました。本領域からは、芝内領域代表による「量子液晶の物性科学の紹介」、A01 班代表の大串研也氏による「遷移金属化合物におけるピエゾ磁気効果の開拓」の講演があり、活発な議論が行われました。また、ポスターセッションでは、69 件の発表が行われ、本領域からは、東京大学有馬グループの鬼頭俊介氏、立命館大学池田グループの寺田伊吹氏および森達明氏、名古屋大学清水グループの太田善彦氏、東京大学芝内グループの六本木雅生氏および房圣杰氏、および東京大学 Hirschberger グループの中野遼太氏の 8 件の非常に質の高い発表がありました。若手講演から、最優秀若手奨励賞 2 名および若手奨励賞 4 名が選出され、本領域からは鬼頭俊介氏が若手奨励賞を受賞しました（下図左は受賞時の懇親会の様子です）。

また、第 18 回（2023 年）凝縮系科学賞の授賞式が開催され、理論部門にて、本領域 C01 班の公募研究者であります北海道大学の速水賢准教授が受賞されました。誠におめでとうございます（下図右は授賞式の様子です）。なお次回については、日程は未定ですが、同じ時期に神戸大学にて開催予定となっております。



研究会 HP: https://www.rs.tus.ac.jp/ryoikioudan_17th/index.html

令和5年度領域研究会報告

総括班, A01 班 木村 剛

令和 5 年 12 月 26 日(火)~28 日(木)に令和 5 年度領域研究会を開催いたしました。令和元年夏に開始した本新学術領域研究ですが、第一回の領域研究会として行うはずだった令和元年度領域研究会はコロナ感染拡大を受けて中止、令和 2 および 3 年度研究会はともに完全オンライン形式で開催、令和 4 年度研究会はハイブリッド形式にて名古屋大学にて開催、という変遷をたどってきました。領域最終年度となる今年度、ようやく初めて完全対面形式での領域研究会を開催することができました。年の瀬の慌ただしい時期の開催であったにもかかわらず、総計で 125 名（口頭発表者：52 名、ポスター発表者：39 名、聴講者：34 名）と多くの参加者があり、各日常時 100 名を超える参加があり、各発表に対して活発な質疑応答が行われました。今回の研究会では、計画班および公募班のすべての領域メンバーによる口頭発表に加えて、領域外や領域内のグループの大学院生・若手研究者らによるポスターセッションが実施されました。領域メンバー全員に口頭発表していただいたため、各自の持ち時間が、計画班 15 分(発表 11 分+質疑応答 4 分)、公募班 12 分(発表 9 分+質疑応答 3 分)と短くなってしまい、プログラム担当としては消化不良にならないか心配していました。しかしながら、皆さん本領域で実施した研究のまとめや成果をうまく短時間にまとめていただき、大変内容の濃い充実した研究会となりました。顔の見える状況での活発な質疑応答、休憩時間におけるちょっとしたやりとり、懇親会における様々なメンバーとの交流など、対面ならではのメリットを大いに享受することのできた研究会でした。また、領域研究会でのポスターセッションも初めて対面で行い、直に説明を聞くことができ、2 時間あっという間に過ぎてしまったというのが率直な感想です。本研究会における各発表者の発表内容に関しては、次ページの研究会プログラムをご参照下さい。また、2 日目の夜に開催された懇親会では、第 5 回 QLC 若手研究奨励賞の受賞者の発表があり、2 名の若手研究者に同賞が授与されました。受賞者の詳細は本ニュースレターの関連記事を参照下さい。

本年度が最終年度となる本領域にとっては、最初で最後の完全対面形式での領域研究会となりましたが、Closing にて評価委員の先生方から本領域研究の総評と今後の展開に向けてのご助言、励ましのお言葉をいただきました。本領域研究で得られた研究成果や研究の芽をさらに発展させるべく、メンバー一同、今後も研さんを積んでいく所存です。最後に、領域代表の芝内先生、若手支援班の和達先生、領域事務の兼子様、会場対応いただいた岡崎先生、新榮様をはじめとする本研究会の企画運営に協力下さった方々および参加いただいた皆様に御礼申し上げます。



ポスターセッション



懇親会



集合写真

令和 5 年度領域研究会 プログラム

Tuesday, December 26

Opening

10:00-10:10 Opening Remark, Announcement SHIBAUCHI, Takasada

Session 1:

Chair : HANAGURI, Tetsuo

- 10:10 SHIBAUCHI, Takasada (University of Tokyo)
“Ultranodal pairing state in FeSe-based superconductors”
- 10:25 EISAKI, Hiroshi (AIST)
“Phase diagram of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ revisited from material viewpoint”
- 10:40 OKAMOTO, Yoshihiko (University of Tokyo)
“Search for New d -Electron Superconductors”
- 10:55 IMAJO, Shusaku (University of Tokyo)
“Ultrahigh field effect on Pomeranchuk Electrons”
- 11:07 TERASHIMA, Taichi (NIMS)
“Interlayer resistance measurements on FeSe under magnetic fields”
- 11:19 MIZUSHIMA, Takeshi (Osaka University)
“Third Harmonic Generation and Higgs Excitations in Superconductors Using Vortex Beams”
- 11:31 NAKAJIMA, Masamichi (Osaka University)
“Evolution of nematic domain structure in iron-based superconductors probed by imaging of in-plane reflectivity anisotropy”
- 11:43 DAIDO, Akito (Kyoto University)
“Nonreciprocal superconductivity induced by dissipation”
- 11:55 KUDO, Kazutaka (Osaka University)
“Development of Novel Superconductors with Triangular, Honeycomb, or Kagome Networks”

Session 2:

Chair : EISAKI, Hiroshi

- 13:30 KASAHARA, Shigeru (Okayama University)
“Ultra-nodal superconducting state of tetragonal $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ ”
- 13:45 TODA, Yasunori (Hokkaido University)
“Photoinduced pseudogap quasiparticle dynamics of Bi-based cuprates”
- 14:00 HIRORI, Hideki (Kyoto University)
“Control of macroscopic magnetic order by Floquet-engineering using Tesla-class terahertz fields”
- 14:15 SATO, Masahiro (Chiba University)
“Theory for Floquet control of a macroscopic order with THz laser”
- 14:30 ASABA, Tomoya (Kyoto University)
“Evidence for a finite-momentum Cooper pair in tricolor d -wave superconducting superlattices”
- 14:42 ZHENG, Guo-qing (Okayama University)
“Nematic director coupled to phonon and controlled by magnetic fields in the spin-triplet superconductors $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ”
- 14:54 YAMADA, Rinsuke (University of Tokyo)
“Anisotropic electronic properties on helical Weyl magnet GdAlSi ”
- 15:06 NIIMI, Yasuhiro (Osaka University)
“Unconventional anomalous Hall effect in a triangular lattice antiferromagnet with weak spin orbit interaction”

Session 3:

Chair : OHGUSHI, Kenya

- 15:45 SHIMAKAWA, Yuichi (Kyoto University)
“Relieving the electronic instability in transition-metal oxides containing unusually high valence cations”
- 16:00 KOBAYASHI, Kensuke (University of Tokyo)
“Magnetic Field Imaging Using Quantum Spin Microscope”
- 16:15 WADATI, Hiroki (University of Hyogo)
“Development of X-ray time-resolved measurements for observing charge and spin dynamics”
- 16:30 ISHIZAKA, Kyoko (University of Tokyo)
“Spatiotemporal imaging of nanoscale magnetic excitations in YIG thin plate”
- 16:45 KURODA, Kenta (Hiroshima University)
“Electronic correlations in rare-earth monpnictides : CeSb vs CeAs ”
- 16:57 KATSUFUJI, Takuro (Waseda University)
“Slow dynamics in the metamagnetic transition of $\text{La}_5\text{Mo}_{4-x}\text{T}_x\text{O}_{16}$ ”
- 17:09 UCHIDA, Masaki (Tokyo Institute of Technology)
“Controlling magnetic ground states of $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ by epitaxial strain”
- 17:21 YONEZAWA, Shingo (Kyoto University)
“Magneto-optical effects in quantum liquid crystal materials to detect novel time-reversal-symmetry breakings”

Wednesday, December 27

Session 4:

Chair : SATO, Masahiro

- 09:15 ARIMA, Taka-hisa (University of Tokyo)
“Why is $\text{Y}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ not ferromagnetic metal?”
- 09:30 OHGUSHI, Kenya (Tohoku University)
“Piezomagnetic Effect in Altermagnet MnTe ”
- 09:45 SHIMIZU, Yasuhiro (Nagoya University)

- 10:00 “Local symmetry and quasiparticles of quantum liquid crystals”
MOTOME, Yukitoshi (University of Tokyo)
“Search for spin liquid crystals: insight from Skyrme and Kitaev”
- 10:15 SUETSUGU, Shota (Kyoto University)
“Majorana fermion origin of the planar thermal Hall effect in the Kitaev magnet α -RuCl₃”
- 10:27 ISHIKAWA, Hajime (University of Tokyo)
“High magnetic field study of novel quantum spin systems made of coupled spin trimer”
- 10:39 AKAGI, Yutaka (University of Tokyo)
“CP² triple-Q state in the SU(3) Kondo lattice model”
- 10:51 KAWASAKI, Takeshi (Nagoya University)
“Non-Equilibrium Phase Transitions in Active Skyrmions”

Poster Session:

- 11:30-12:15 1 min. Preview @ Lecture Room (A632)
13:30-15:30 Poster Presentation @ 6F Lounge

Chair : KOBAYASHI, Kensuke

Session 5:

- 15:45 HANAGURI, Tetsuo (RIKEN)
“Discovery and Elucidation of Quantum Liquid Crystals by STM”
- 16:00 OKAZAKI, Kozo (University of Tokyo)
“Non-equilibrium electronic states of the Kagome superconductor CsV₃Sb₅”
- 16:15 KONTANI, Hiroshi (Nagoya University)
“Theoretical studies of loop current orders in kagome metals”
- 16:30 ARITA, Ryotaro (University of Tokyo / RIKEN)
“Towards simplified complexity: Deriving a symmetry-adapted single-orbital model for Cr_{1/4}NbSe₂ based on the closest Wannier function”
- 16:45 IHARA, Yoshihiko (Hokkaido University)
“*q*-resolved NMR study for itinerant kagome antiferromagnet Sc₃Mn₃Al₇Si₅”
- 16:57 OKAMURA, Yoshihiro (University of Tokyo)
“Topological magneto-optical effect from quantum liquid crystal”
- 17:09 ONOSE, Yoshinori (Tohoku University)
“A high-temperature multiferroic Tb₂(MoO₄)₃”
- 17:21 UCHIDA, Yoshiaki (Osaka University)
“Photomagnetic effects in liquid crystals”

Chair : KASAHARA, Shigeru

- 18:00- Banquet @ “Plaza Iko”, Restaurant in Kashiwa Campus
Winner announcement, QLC Young Researcher Award: WADATI, Hiroki

Thursday, December 28

Session 6:

- 09:15 TOHYAMA, Takami (Tokyo University of Science)
“Spin loop-current textures in low-dimensional Hubbard models”
- 09:30 SHANNON, Nic (OIST)
“Gravitational wave analogues in quantum liquid crystals”
- 09:45 SATO, Taku J (Tohoku University)
“Small angle neutron scattering study on various aspects of magnetic skyrmions and other multi-q spin structures”
- 10:00 SHIOMI, Yuki (University of Tokyo)
“BKT-like signature of spin Seebeck effect in 2D antiferromagnet BaNi₂V₂O₈”
- 10:12 MATSUNO, Jobu (Osaka University)
“Spin-current properties of 5*d* transition-metal oxides”
- 10:24 SASAKI, Takahiko (Tohoku University)
“Lattice dynamics coupled to the intra dimer π -electrons degrees of freedom in the organic charge transfer salts”

Chair : KONTANI, Hiroshi

Session 7:

- 11:00 KIMURA, Tsuyoshi (University of Tokyo)
“Search for materials showing ferroaxial order”
- 11:15 TOGAWA, Yoshihiko (Osaka Metropolitan University)
“Chirality-Induced Phenomena in Chiral Materials”
- 11:30 IKEDA, Hiroaki (Ritsumeikan University)
“Ab initio calculation of electronic chirality density”
- 11:45 HAYAMI, Satoru (Hokkaido University)
“Representation of electronic order parameters breaking spatial inversion, time-reversal symmetries or gauge symmetries”
- 11:57 HIRAI, Daigorou (Nagoya University)
“Material search and investigation of spin-nematic state induced by spin-orbit interactions”

Chair : OKAMOTO, Yoshihiko

Closing

- 12:09- Comments: Evaluation Committee Members (TAJIMA, Setsuko and FUJIMORI, Atsushi)
Closing Remark: SHIBAUCHI, Takasada

国際学会 Quantum Magnetism and Topology 2023 での講演

B01 班 石川 孟

SCES (International Conference on Strongly Correlated Electron Systems)のサテライトミーティングとして開催された国際学会 Quantum Magnetism and Topology 2023 に、海外派遣支援を受けて参加しました。個人的にはパンデミック以来初の国際会議への現地参加です。会場は韓国の Pohang の海岸に面したホテルで、昼は会議、夜は海岸を散歩というように、滞在中は気持ちよく過ごすことができました。この会議は Asia Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP)という組織が主催しており、物性物理だけでなく物理の幅広い分野において研究や学会の主催を行っているそうです。学生向けのワークショップなども定期的に開催しているようですので、APCTP ホームページをチェックしていると興味ある会議の情報を見つけられるかもしれません。韓国での会議は時差なく気軽に参加できるのでお勧めです。

Quantum Magnetism and Topology 2023 は小規模な会議で、50 人程度の参加者が一つの会議室に集まって行われました (写真左上)。会議はタイトルにある量子磁性体とトポロジカル物質に関する講演だけでなく、4f 電子の多極子に関する講演やカゴメ格子超伝導体に関する話題など多岐にわたり、分野の最新的话题を勉強することが出来ました。今は十年前の鉄系超伝導体にあたるような多くの研究者がこぞって研究に参入するような流行りのテーマがあるわけではなく、それぞれの研究者が自分の興味と得意とする手法に合わせた研究をしているという印象を受けました。逆に言うと分野をリードする新たな物質や概念の登場が待たれているのかもしれません。主催は理論物理の研究所でしたが、理論と実験の両方の研究者からの講演があり、実験家の私でも興味深く講演を聞くことが出来ました。講演だけでなく、休み時間に直接ディスカッションすることが出来たことも収穫です。



私は”Search for the honeycomb quantum spin liquid materials without Ir, Ru, and Co”というタイトルでハニカム格子量子磁性体の新物質開発に関する講演を行いました。近年ハニカム格子の磁性体は Ir, Ru, Co を磁性元素として含む物質が集中的に研究されていますが、他にも面白い物質があり、物質開発が重要ですというメッセージをこめたタイトルにしました。講演では最近開発した 2 つのハニカム格子量子磁性体である三ヨウ化サマリウム SmI_3 と有機無機ハイブリッド物質 $[(\text{CH}_3)_2(\text{NH}_2)]_3[\text{Cu}_3(\text{OH})(\text{SO}_4)_4] \cdot 0.24\text{H}_2\text{O}$ (DMACuS)について紹介しました。 SmI_3 は新しい 4f 電子のハニカム格子系で、量子スピン液体の実現にとって理想的な電子状態と結晶構造をもつことを発表しました。DMACuS は 120 テスラまでのパルス強磁場磁化測定と第一原理計算を基に、スピン三量体を基にした新しいタイプの異方的ハニカム格子をもつ量子スピン系であることを発表しました。久しぶりの英語講演で講演時間が 30 分ということもあり準備は大変でしたが、発表後にいろいろと質問を頂いたので、伝えたかったことは伝えることが出来たのではないかと思います。今後も定期的に国際会議に参加できるように良い研究をしていきたいと実感しました。

最後に Pohang の町の様子について紹介します。海岸が観光地になっているようで、昼(写真左下)も夜(写真右上、右下)もきれいな風景がひろがっています。夜 8 時くらいでも幼稚園生ぐらいの子供が海岸で遊んでいたのが治安の良さを感じました。このような良い会議に参加させていただき、旅費支援を頂いた新学術領域の皆様、会議の主催者の皆様はこの場を借りて感謝申し上げます。

石川孟 (東京大学・物性研究所・助教)

バンクーバー滞在報告

B01 班 六本木 雅生、劉 蘇鵬

新学術領域研究「量子液晶の物性科学」の若手海外派遣の支援を受けまして、2023 年 6 月 4 日から 6 月 22 日にかけてカナダ・バンクーバーに滞在し、バンクーバーのブリティッシュコロンビア大学（以下、UBC）にある加速器施設 TRIUMF においてミュオンスピン回転緩和実験 (μ SR) を行ったため、報告致します。

6/5~12 までは中国 IOP の Guoqiang Zhao 氏らと共に共同研究を行い、カゴメ格子を系物質 $R\text{AgGe}$ ($R=\text{Tb}, \text{Gd}$) を対象として μ SR を行いました。この物質系は複雑な磁気秩序相転移スピニアイスであることが報告されていましたが、今回の μ SR では、その磁気秩序を直接的に観測することができ、先行研究と合わせて包括的に磁性相を解明することができました。

また、6/12~20 までのマシンタイムでは産業技術総合研究所の超電導グループによって合成していただいた鉄系超伝導体 $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ と $(\text{Ba}, \text{Rb})\text{Fe}_2\text{As}_2$ を対象とした、ミュオンスピン回転緩和実験を行いました。これらの物質は磁性と超伝導が絡み合い非自明な状態を生み出す系として注目を集めており、まさにこれら二つの相に対して良い感度を持つミュオンスピン回転緩和実験が強力なプローブとなることが考えられます。そして、実験では途中でビームが故障で止まってしまうなどのトラブルこそありましたが、なんとか測定することができ、今回の我々の結果から実際に磁性と超伝導の関係を明らかにする重要な情報が得られたと感じています。 $(\text{Ba}, \text{Rb})\text{Fe}_2\text{As}_2$ に関してはいくつか測定しきれなかった試料もあるので秋以降のビームタイムにて追加の測定を行う予定です。今回の滞在では特に劉氏は初めての海外での実験ということもあり、今後のための良い経験になったと感じています。



図 1: μ SR 測定の実験場の様子(M20 beam line)



図 2: 共同研究者や他のグループの方々とのディナー

六本木雅生（東京大学・新領域創成科学研究科物質系専攻・博士後期課程 2 年）

劉 蘇鵬（東京大学・新領域創成科学研究科物質系専攻・博士後期課程 1 年）

イタリア・フランス出張報告

石原 滉大

この度、新学術領域研究「量子液晶の物性科学」の若手海外派遣制度にご支援いただき、イタリアのイスキア島で開催された国際会議「Superstripes 2023」に参加し、招待講演を行いました。また、その後フランス・パリの Ecole Polytechnique に二週間、トゥールーズの LNCMI-Toulouse に一週間滞在し、それぞれ電子線照射、パルス高磁場下電気抵抗測定を行いましたので、報告いたします。

Superstripes 2023 では、超伝導やトポロジカル物性をはじめとした様々な量子物性に関する講演が行われました。その中で私の講演では、近年注目を集めている重い電子系超伝導体 UTe_2 の超伝導ギャップ構造に注目し、カイラル超伝導状態が実現している可能性について議論しました。今回およそ四年ぶりに対面での国際学会に参加しましたが、講演後には海外の理論家の先生とも UTe_2 や他の超伝導体に関する議論を行うことができ、非常に充実した時間を過ごすことができました。また、私自身初めてリゾート地での学会に参加しましたが、ホテルに大きなプールが付いておりそこで参加者が泳いでいるといった、非常に楽しい雰囲気を感じることができました。

Ecole Polytechnique にある Laboratoire Solides Irradies では、主に FeSe 系超伝導体に対する電子線照射の影響を調べました。物質に電子線を照射することにより結晶内に非磁性不純物を導入することができ、その不純物量に対する超伝導特性の変化から超伝導状態について議論することができます。今回、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ の $x=0.3$ と $x=0.6$ の試料に対して電子線照射量と超伝導転移温度の関係を調べました。その結果、 $x=0.6$ 試料では電子線照射に伴い超伝導転移温度が単調に減少するものの、 $x=0.3$ 試料では超伝導転移温度が上昇する振る舞いが観測されました。この結果は、超伝導状態と電子ネマティック状態の間に非自明な関係があることを示唆しています。

トゥールーズの LNCMI-Toulouse では、一軸歪みを加えた FeSe と加えていない FeSe に対してパルス高磁場下での電気抵抗測定を行い、電子ネマティックドメインの電子物性への影響を調べました。今回のマシンタイムでは、 ^3He 冷凍機と 58 T マグネットを組み合わせたシステムを利用しました。まず、最低温度において電気抵抗の磁場依存性を測定したところ、いずれの試料でも明瞭な量子振動を観測することができました。一方で、二つの試料における磁気抵抗の磁場依存性は異なっており、歪みを印加した試料では高磁場領域で磁場に対して線形な振る舞いを示すことがわかりました。この結果は、ネマティックドメインの存在が磁気抵抗に影響していることを示唆しています。

最後に、今回のイタリア・フランス出張をサポートくださった新学術領域研究「量子液晶の物性科学」の関係者各位に、心より感謝申し上げます。



Superstripes 2023 会場のプール



電子線照射設備

●人事異動

東北大学多元物質科学研究所の奥山大輔助教が、2022 年 4 月 1 日付で高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光実験施設測定装置部門 准教授へ異動（所属変更）しました。

東北大学多元物質科学研究所の那波和宏助教が、2023 年 4 月 1 日付で同研究所 無機材料研究部門 准教授に昇任しました。

当領域 B01 班の PD・特任研究員、SHARMA, Ramender Kumar 氏（北海道大学 学術研究員）が 2023 年 9 月 30 日付で転出しました。

●受賞報告

岡本佳比古教授が、“Papers of Editors’ Choices”を受賞しました（2023/8/31）。

<https://journals.jps.jp/page/jpsj/ec>

内田幸明准教授が、“2023 年度日本液晶学会賞 論文賞 A 部門”を受賞しました（2023/9/12）。

<https://jlcs.jp/about/award>

峯明史氏（岡崎研博士 1 年）が“第 78 回年次大会（2023 年）日本物理学会学生優秀発表賞（領域 6）”を受賞しました（2023/10/14）。

https://www.jps.or.jp/activities/awards/gakusei/2023a_student_presentation_award.php#r6

HIRSCHBERGER, Max 准教授が“第 18 回（2024 年）日本物理学会若手奨励賞”を受賞しました（2023/10/15）。

<https://www.jps.or.jp/activities/awards/jusyosya/wakate2024.php>

今城周作特任助教が“第 18 回（2024 年）日本物理学会若手奨励賞”を受賞しました（2023/10/15）。

<https://www.jps.or.jp/activities/awards/jusyosya/wakate2024.php>

打田正輝准教授が“29th International Workshop on Oxide Electronics, The Oxide Electronics Prize for Excellence in Research”を受賞しました（2023/10/17）。

有田亮太郎教授が highly cited researcher (Clarivate Analytics) に選ばれました（2023/11/16）。

<https://clarivate.com/highly-cited-researchers/>

速水賢准教授が、第 18 回（2023 年）凝縮系科学賞を受賞しました（2023/11/24）。

<https://cmsp.phys.s.u-tokyo.ac.jp/2023/11/24/award-decision-2023/>

鬼頭俊介助教（有馬研究室）が“第 17 回物性科学領域横断研究会（領域合同研究会）若手奨励賞”を受賞しました（2023/11/25）。

https://www.rs.tus.ac.jp/ryoikioudan_17th/program.html

今城周作特任助教が“第 12 回（2023 年度）研究開発奨励賞”を受賞しました（2023/12/2）。

<https://nf-foundation.or.jp/award/list/2023/winner.html>

●アウトリーチ

A01 班 公募研究

林田健志，木村剛，一般向け講演会・セミナー：“フェロアキシシャル結晶における電場誘起磁気キラル二色性の観

測”，(QLC チャンネルビデオ, 2023/8/22)

<https://youtu.be/0AYoie5mUJg>

A01 班 公募研究

佐々木孝彦, 小中高向け授業・実験・実習: “江戸川区子ども未来館連続講座「ガリレオは何を見つけたの」”, (江戸川区子ども未来館, 2023/4/1)

佐々木孝彦, 小中高向け授業・実験・実習: “金属材料研究所一般公開”, (東北大学金属材料研究所, 2023/10/7)

<http://www.imr.tohoku.ac.jp/kids/>

C01 班 計画研究

小林海翔, 求幸年, 一般向け講演会・セミナー: “ノイズに強い大規模並列磁性体物理リザーコンピューティング”, (QLC チャンネルビデオ, 2023/10/19)

<https://youtu.be/pClBK08TtgA>

C01 班 公募研究

川崎猛史, 小中高向け授業・実験・実習: “名古屋大学模擬講義”, (愛知県立江南高校, 2023/11/13)

D01 班 計画研究

有馬孝尚, 一般向け講演会・セミナー: “日本物理学会 2023 年公開講座「量子ビームで見る、視る、診る」”, (日本物理学会, 2023/11/13)

<https://www.jps.or.jp/public/koukai/koukai-2023-11-26.php>

●メディア報道

A01 班 計画研究

岡本佳比古, “東大など、7 種の磁性元素で超電導体 機序完全解明へ”, (NIKKEI Tech Foresight, 2023/9/14)

<https://www.nikkei.com/prime/tech-foresight/article/DGXZQOUC072D80X00C23A9000000>

C01 班 公募研究

水島健, “阪大・東大・学習院大・JST、幻の素粒子「マヨラナ粒子」の量子テレポーテーション現象を解明”, (日本経済新聞, 2023/12/6)

https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP665453_W3A201C2000000/

水島健, “阪大、マヨラナ粒子の量子状態転送現象を解明 利活用に研究加速”, (日刊工業新聞, 2023/12/8)

<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/695129>

D01 班 公募研究

岡村嘉大, “東大と理研、スキルミオンによるトポロジカル磁気光学効果の観測に成功”(日本経済新聞, 2022/9/7)

https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP661751_X00C23A9000000/

●プレスリリース

A01 班 計画研究

木村剛, “フェロアキシシャル結晶を用いて電場誘起磁気キラル二色性を実現 —電場でも磁場でも光の吸収を制御することが可能に—”, (東京大学大学院工学系研究科, 2023/8/21)

<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2023-08-21-001>

岡本佳比古, “さまざまな磁性元素を含む新しい超伝導体ファミリーの発見”, (東京大学物性研究所, 2023/9/1)

<https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=19835>

岡本佳比古, 平井大悟郎, “新しい超伝導体ファミリー: 異なる磁性元素をもつ 7 個の新超伝導体の発見”, (日本物理学会, 2023/10/11)

<https://www.jps.or.jp/books/23-10-1.pdf>

岡本佳比古, “トポロジカル物質における表面超伝導を発見 ~新しいタイプの非従来型超伝導物質~, (名古屋大学, 2023/11/2)

<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2023/11/post-582.html>

永崎洋, “電子にはたらく特殊な力をマイクロメートルの高解像度で可視化「量子マテリアル」のデバイス評価に新展開”, (広島大学, 2023/12/21)

<https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/80809>

木村剛, “光通信分野での新たな知見に 光の進行方向を反転することで吸収のしやすさが 2 倍以上変化する物質を発見”, (大阪公立大学, 2024/1/18)

https://www.omu.ac.jp/info/research_news/entry-09909.html

A01 班 公募研究

平井大悟郎, “新しいハイエントロピー化合物超伝導体の合成に成功 ~新規超伝導体発見への新しい道~, (名古屋大学, 2023/8/23)

<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2023/08/post-550.html>

HIRSCHBERGER, Max, 岡村嘉大, “スキルミオンによるトポロジカル磁気光学効果の観測に成功 —スキルミオンメモリの高速光読み取りに道筋—”, (東京大学大学院工学系研究科, 2023/9/7)

<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2023-09-07-001>

B01 班 計画研究

芝内孝禎, 浅場智也, 末次祥大, 紺谷浩, “非磁性カゴメ金属に隠された「磁性」—原子スケールでループを描く新奇電流状態—”, (東京大学大学院新領域創成科学研究科, 2024/1/5)

<https://www.k.u-tokyo.ac.jp/information/category/press/10703.html>

B01 班 公募研究

浅場智也, 末次祥大, 芝内孝禎, 紺谷浩, “非磁性カゴメ金属に隠された「磁性」—原子スケールでループを描く新奇電流状態—”, (京都大学, 2024/1/5)

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2024-01-05>

黒田健太, “電子・スピンの運動を可視化する走査型顕微鏡の開発—マイクロメートル領域のスピン流を精密に測定—”, (広島大学, 2024/1/12)

<https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/81141>

C01 班 計画研究

求幸年, “電子のスピンを用いた人工ニューラルネットワークの新しい動作原理を発見 —AI ハードウェア実現に向けたノイズに強い超大規模並列計算が可能に—”, (東京大学大学院工学系研究科, 2023/10/11)

<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2023-10-11-001>

紺谷浩, “カゴメ金属で起きる自発回転する不思議な電子状態 ~ナノスケールの永久ループ電流の機構を明らかに~”, (名古屋大学, 2023/12/15)

<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2023/12/post-599.html>

紺谷浩, 芝内孝禎, 浅場智也, 末次祥大, “非磁性カゴメ金属に隠された「磁性」—原子スケールでループを描く新奇電流状態—”, (名古屋大学, 2024/1/5)

<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2024/01/post-607.html>

紺谷浩, “カゴメ金属の新奇な多重量子相を予言・制御する理論を構築—ループ電流・電荷秩序・超伝導が奏でる“アンサンブル”—”, (名古屋大学, 2024/1/17)

<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2024/01/post-613.html>

C01 班 公募研究

水島健, “幻の素粒子“マヨラナ粒子”の量子テレポーテーション現象を解明—トポロジカル量子コンピュータの実現へ道—”, (大阪大学, 2023/12/6)

https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2023/20231206_2

大同暁人, “量子幾何学によるスピンを持つ超伝導の予言—スピン三重項超伝導の探索に向けた指導原理—”, (京都大学, 2024/1/19)

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2024-01-19-0>

D01 班 計画研究

小林研介, “量子の渦、数えます! —ダイヤモンド量子センサによる超伝導研究の新技术—”, (東京大学大学院理学系研究科, 2023/9/16)

<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/10020/>

岡崎浩三, “励起子絶縁体から半金属への変化に伴い出現する擬ギャップ状態を観測”, (東京大学物性研究所, 2023/11/27)

<https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=20724>

D01 班 公募研究

岡村嘉大, HIRSCHBERGER, Max, “スキルミオンによるトポロジカル磁気光学効果の観測に成功—スキルミオンメモリの高速光読み取りに道筋—”, (東京大学大学院工学系研究科, 2023/9/7)

<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2023-09-07-001>

●開催報告

第 41 回 QLC セミナーを東京大学（柏キャンパス）にて開催しました。

講師: Prof. Pengcheng Dai (Rice University)

日時: 2023 年 7 月 20 日 (木) 14:00~

場所: 東京大学 柏キャンパス基盤棟 物質系講義室 (2B6)

タイトル: Competing itinerant and local spin interactions in kagome metal FeGe

アブストラクト: <http://qlc.jp/2023/07/11/41stqlcseminar/>

担当: 芝内孝禎 (東京大学)

第 42 回 QLC セミナーを名古屋大学（東山キャンパス）にて開催しました。

講師: 平井大悟郎 氏 (名古屋大学大学院工学研究科)

日時: 2023 年 7 月 20 日 (木) 13:00~

場所: 名古屋大学 (東山キャンパス) 理学館 614 (Sc 研コロキウム室)

タイトル: スピン軌道結合金属の特異な電子秩序とハイエントロピー化合物における超伝導

アブストラクト: <http://qlc.jp/2023/07/11/42ndqlcseminar/>

担当: 紺谷浩 (名古屋大学)

International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023) を北海道

大学（札幌キャンパス）にて開催しました。

日時：2023 年 8 月 8 日（火）～10 日（木）

場所：北海道大学（札幌キャンパス）工学部 オープンホール

（HP 掲載先）<http://qlc.jp/2022/11/22/qlc2023/>

第 11 回 QLC 若手コロキウムをオンライン開催しました。

講演者：QLC2023 Young Researcher Award、受賞者 2 名

日時：2023 年 10 月 6 日（金）13:30～14:30

講演者 1：成塚政裕 氏（理化学研究所創発物性科学研究センター）

タイトル：グラフェン上にひねり積層した単層 NbSe₂ におけるキラル結晶超伝導

講演者 2：西村俊亮 氏（東京大学大学院理学系研究科）

タイトル：完全配向 NV 中心量子センサによる超伝導量子渦の広視野定量的磁気イメージング

アブストラクト：<http://qlc.jp/2023/08/22/11thqlcyoungcolloquium/>

担当：和達大樹（兵庫県立大学）

第 43 回 QLC セミナーを東北大学（片平キャンパス）にて開催しました。

講師：Moravec, Michal 氏（Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe）

日時：2023 年 10 月 20 日（木）13:30～

場所：東北大学 金属材料研究所（片平キャンパス）1 号館 5 階セミナー室

タイトル：Focused ion beam microstructuring for mesoscopic transport experiments

アブストラクト：<http://qlc.jp/2023/09/27/43rdqlcseminar/>

担当：石田浩祐、小野瀬佳文（東北大）

第 44 回 QLC セミナーを名古屋大学（東山キャンパス）にて開催しました。

講師：遠山貴巳 氏（東京理科大学 先進工学部 物理工学科）

日時：2023 年 11 月 21 日（火）14:00～

場所：名古屋大学（東山キャンパス）理学館 506

タイトル：共鳴非弾性 X 線散乱でみた銅酸化物高温超伝導体のスピン・電荷励起

アブストラクト：<http://qlc.jp/2023/10/25/44thqlcseminar/>

担当：紺谷浩（名古屋大学）

The 14th APCTP Workshop on Multiferroics が東京大学にて開催されました。

日時：2023 年 10 月 19 日（木）～21 日（土）

場所：東京大学（本郷-浅野キャンパス）武田先端知ビル 武田ホール

（HP 掲載先）<http://qlc.jp/2023/07/20/14thapctp/>

第 17 回物性科学領域横断研究会（領域合同研究会）が名古屋工業大学およびオンラインを利用したハイブリッド開催されました。

日時：2023 年 11 月 24 日（金）～25 日（土）

場所：名古屋工業大学 4 号館ホールおよびオンライン

（HP 掲載先）<http://qlc.jp/2023/08/17/17thryoikioudan/>

令和 5 年度領域研究会を東京大学（柏キャンパス）にて開催しました。

日時：2023 年 12 月 26 日（火）～28 日（木）

場所：東京大学（柏キャンパス）物性研究所 6 階大講義室

プログラム：

http://qlc.jp/wp-content/uploads/2023/12/FYR05-QLCmeeting_program.pdf

第 5 回 QLC 若手研究奨励賞を授与しました。

藤本大仁さん（Harvard University / University of Tokyo）

” First Landau level in moiré system at zero magnetic field”

高橋龍之介さん (University of Hyogo)

“All-optical switching in NiCo₂O₄ thin films using ultrafast lasers”

(HP 掲載先) <http://qlc.jp/2023/10/04/fyr05qlcmeeting/>

●支援プログラムの紹介

総括班では、若手育成支援プログラムとして、(1) 海外派遣支援、(2) 交換プログラム、(3) 若手研究奨励賞、国際活動支援プログラムとして、(1) 国際会議開催および支援、(2) 海外研究者招聘・国際ビデオ講義、(3) シンポジウム提案、研究活動支援プログラムとして、(1) 研究会主催、(2) QLC セミナー、(3) 共同研究支援、などの支援プログラムを実施しています。

●今後の予定

第 12 回 QLC 若手コロキウムをオンライン開催します。

講演者：第 5 回 QLC 若手研究奨励賞、受賞者 2 名

日時：2024 年 2 月 19 日 (月) 13:30~14:30

講演者 1：藤本大仁 氏 (ハーバード大学 / 東京大学)

講演者 2：高橋龍之介 氏 (兵庫県立大学)

*Zoom によるオンライン開催

*最新情報は下記 HP 掲載先をご確認ください。

(HP 掲載先) <https://qlc.jp/2024/01/10/12thqlcseminar/>

担当：和達大樹 (兵庫県立大学)

The 22nd Japan-Korea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (JKT22) を鹿児島大学にて開催します。

日時：2024 年 3 月 15 日 (金) ~17 日 (日)

場所：北海道大学 (郡元キャンパス) 稲盛会館

*最新情報は下記 HP 掲載先をご確認ください。

(HP 掲載先) <https://okuda812.wixsite.com/jkt22>

●編集後記

ニュースレター Vol.10 をお届けします。本号が最終号となります。今回は 5 年間にわたる本新学術領域研究の成果を一望できるよう、計画研究と公募研究 (第 2 期) のメンバー全員に 1 ページずつの研究ハイライトを執筆頂きました。どうぞ御覧ください。

年に二度発行するという計画で開始したニュースレターですが、予定どおり Vol.10 まで発行することができました。ひとえに寄稿して下さった関係者の皆様のお陰です。ご協力に感謝申し上げます。

本ニュースレターは永崎洋先生と岡崎浩三先生と私 (小林) の 3 人で編集してきました。私は進行管理をさせていただき、実際の編集作業は永崎先生と岡崎先生が担当されました。御礼を申し上げます。事務局の兼子芳枝さんにも掲載情報の提供・確認で毎回お世話になりました。ありがとうございました。

本新学術も残すところあとわずかとなりました。本ニュースレターを通じて多くの皆様と交流できましたことを嬉しく思っています。今後も何らかの形でこのご縁を紡いでいければと願っています。

(文責：小林研介)

量子液晶ニュースレター編集局：

小林研介(東大理) kensuke@phys.s.u-tokyo.ac.jp

永崎洋(産総研) h-eisaki@aist.go.jp

岡崎浩三(東大物性研) okazaki@issp.u-tokyo.ac.jp

量子液晶の物性科学

文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究」（令和元年度～5年度）

新学術領域研究

「量子液晶の物性科学」ニュースレター 第10号

2024年2月 発行

領域事務局：office@qlc.jp

領域ホームページ：<http://qlc.jp/>