

ASYMMETRY

NewsLetter

#03

2024.09

Unveiling, Design, and Development of Asymmetric Quantum Matters



CONTENTS

巻頭言

News Letter第3号 巻頭言

鬼丸 孝博 01

公募研究紹介

A01

スピン分解ARPESによる空間反転対称性を欠いた反強磁性体の波数空間スピントクスチャーの可視化

木村 昭夫 02

X線で探るアシンメトリ量子と拡張磁気多極子

山崎 裕一 03

放射光X線回折で可視化するアシンメトリ量子物質の電子軌道

鬼頭 俊介 04

A02

物質の熱的性質における非対称性の開拓

水上 雄太 05

バルク超伝導体を用いた巨大超伝導交差応答の研究

石原 滉大 06

大きさと方向を制御できる「ベクトル圧力」で物質を非対称にしたい

池田 敦俊 07

アシンメトリ量子物質における新現象・新機能

小野瀬 佳文 08

アシンメトリ量子の検出・可視化手法の開発と人工アシンメトロニクスへの展開

松原 正和 09

電流下で顕在化する多極子アシンメトリ応答の光技術観測

米澤 進吾 10

B01

準結晶と近似結晶における奇パリティ結晶場と多極子の開拓

渡辺 真仁 11

ミクロな非対称性が誘起する超伝導非相反現象

大同 暁人 12

Cross-coupled ferroic orders in chiral magnets Harald O. Jeschke 13

D01

電子自由度のアシンメトリによるトポロジカル相制御

上田 健太郎 14

軸性アニーリングによる強相関非対称物質の創製

志村 恭通 15

アシンメトリに着目したウラン化合物の物質探索

青木 大 16

カイラルハニカム量子物質の開発

石川 孟 17

原子レベルで制御された空間アシンメトリに起因する磁気相互作用

松野 丈夫 18

表面非対称電子軌道の制御による非相反伝導特性の最大化

金澤 直也 19

交替磁性揺らぎによる超伝導発現の実証

打田 正輝 20

今号の研究成果

らせん型結晶構造を持つ半導体Teにおける磁場誘起リフシツ転移と非相反磁気抵抗

木俣 基 21

NbMnPで観測された磁気トロイダル四極子と異常ホール効果

小手川 恒 24

極性-非極性構造相転移を示すトポロジカル半金属SrAuBiでの新規超伝導の発見

高橋 英史 30

遍歴磁性体UCoAlの臨界終点近傍に現れる不思議な弾性異常

吉澤 正人 34

若手紹介

ユーロビウム化合物の研究と結晶育成の挑戦

比嘉 野乃花 36

奇周波数クーパー対から多極子が織りなす物理へ

佐藤 匠 37

多極子と私~自己紹介に代えて

桐越 研光 38

学会・研究会

APS March Meeting 2024

小林 夏野 39

国際会議参加報告:ICM2024

北澤 崇文 40

ICM2024に参加して

鈴木 大斗 42

初参加の国際会議ICM2024

新井 祐樹 43

会議報告:「アシンメトリ量子」令和6年度領域全体会議・公募研究キックオフ会議

野村 悠祐 44

アウトリーチ

日本語からはじめよう

大原 繁男 46

アウトリーチ活動を探究する

吉田 紘行 48

コラム

将棋に潜むアシンメトリ

石渡 晋太郎 50

アシメ★通信

51

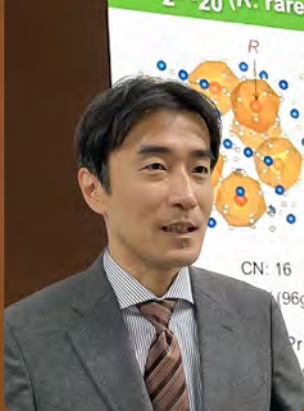
事務局からのお知らせ

2024年10月からの関連行事

52

事務局からのお知らせ

53



News Letter第3号 巻頭言

領域代表

鬼丸 孝博

広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授

今年度から採択された公募研究の皆さんに加わっていただき、学術変革領域研究(A)「アシンメトリ量子」の2年目がスタートしました。5月29日～31日には、東広島芸術文化ホールにて令和6年度 領域全体会議・公募研究キックオフ会議を開催し、領域内外から147名の方々にご参加いただきました。各計画研究による成果報告と計画などの概要説明に加えて、公募研究19件の研究代表者からは、挑戦的なテーマやそれを実現するための戦略が示され、領域内の研究連携に向けた提案もありました。これらを踏まえて、「お互いの得意なことを活かしつつ連携を深めることで新たな研究テーマを生み出し、学術変革へとつながる研究へと展開する」という領域としての方針を共有できました。また、今回の会議では、77件のポスター講演（うち学生のポスター講演59件）もあり、活発な意見交換がありました。このうち、博士部門の3名、修士部門の6名に、発表賞が授与されました。幅広い世代の方々に参加していただき、本研究領域で軸となる新物質の開発と新機能の開拓に向けて、重要な議論の場となりました。今回の会議を契機として、トピカルミーティングの開催や大学院生・若手研究者の相互派遣など、人的交流を通して研究領域としての活動を一層加速していきます。

9月20日（金）～23日（月）には、今年度のメイン企画の一つである「アシンメトリ量子若手秋の学校」を、自然豊かな北海道・美瑛の国立大雪青少年交流の家にて開催します。新進気鋭の若手研究者10名を講師として迎え、3泊4日の合宿形式で行います。講師の方々には、しっかりとしたテキストを執筆していただいております。学生や若手の方にとっては、研究テーマの近い同世代で集まって学習できるよい機会になるでしょう。この秋の学校が、次世代の物質科学を担う若手研究者・大学院生の交流の場となり、それぞれが研究者として成長するきっかけとなることを期待しています。

さて、研究領域で導入した共用機器の運用も始まっています。無冷媒低温材料物性自動測定システムが広島大学大学院先進理工系科学研究科に設置され、磁場中での電気抵抗や比熱が簡便に測定できるようになりました。また、高出力集束イオンビーム (FIB) 加工装置が今年度中に導入され、単結晶試料を微細加工するための環境も整います。領域内の皆様の積極的な活用をお願いします。（詳しくは領域HPの「共用備品」をご覧ください。）

本研究領域の研究活動や研究業績については、随時ホームページに掲載しています。ホームページ担当の方々のご尽力もあり、例えば「研究業績」のページでは、原著論文の発行年や計画研究の項目で絞り込む機能など、工夫を凝らした仕様となっています。計画研究ごとのアクティビティや連携なども、分かりやすく表示されます。また、領域の活動や設備を紹介する「アシメ☆動画通信」も新たにアップされました。このように、研究業績や活動実績などの進捗情報を素早く発信してまいります。

本領域の活動に関するご意見やご提案は、secretariat@asymmetry.hiroshima-u.ac.jpまでお寄せください。



スピン分解ARPESによる 空間反転対称性を欠いた反強磁性体の 波数空間スピントクスチャーの可視化

木村 昭夫

広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授

黒田 健太

広島大学大学院先進理工系科学研究科 准教授

今年度より、公募研究として参画させていただくことになりました。どうぞ宜しくお願いいたします。我々の研究目的は「空間反転対称性を欠いた反強磁性体の波数空間におけるスピントクスチャーの可視化」により、反強磁性体の秩序パラメータや諸物性に関わる多極子秩序を明らかにすることです。反転対称性があり、さらに隣り合う反平行スピンの、化学セルの基本並進ベクトルでつながれている場合、スピン縮退は解けません。一方で、反平行スピンの単位格子内の中途半端な並進ベクトルや回転操作で結ばれているコリニア反強磁性体において、大きなスピン分裂が現れることがわかってきました。これはオルタマグネットとも称され、大きく注目されることになりましたが、それよりもいち早く当学術変革領域研究のメンバーにより、このような特殊な反強磁性体において、電子スピンは反強磁的でも、ある多極子は強的に配列し、大きなスピン分裂が出現することが、多極子の概念をもとにすでに予言されていました[1]。さらに、空間反転対称性が欠けると、奇パリティ多極子の出現も可能になり、新奇物性や、スピントクスチャーの解明がますます重要になると期待されます。

さて、我々はスピントクスチャーの可視化をスピン角度分解光電子分光（以降スピン分解ARPESと呼ぶことにする）という実験手法を用いて行います。スピン検出器としてHiSORの奥田太一氏によって開発されたVLEED型検出器を用いますが、これは強磁性Feを検出器のターゲット試料として用いており、磁化反転により、高効率でスピン偏極度の分析を行えるだけでなく、同時に装置の非対称性が完全に排除されます。反強磁性体や非磁性体を測定対象とする際には、これが大変重要になってきます。非磁性体である金ターゲットを用いている有名なモット型スピン検出器は本研究には不向きとなるわけです。ただ、本研究目的を達成するためには、空間分解能を上げて単一のネールベクトルドメインからのシグナルを得る必要があります。共同研究者の黒田健太氏が、レーザーを用いたスピン分解ARPESを装置の開発を行い、現在では高い空間分解能でのスピン分解ARPESを可能にしました。さらには、薄膜も中心的なターゲットとして研究をすすめていく予定です。薄膜は、基板の影響で反強磁性体に歪みが施され、空間反転対称性の制御も可能になるため、奇パリティ多極子などの発生、検出も視野に入ってきます。このように比較的広範囲で自由な制御が薄膜では可能になりますので、我々は大きな興味を持っています。この薄膜作成については、物質・材料研究機構の磁性スピントロニクス研究センターとの共同ですすめる予定です。

反強磁性を発見したネールは、「面白いが、役には立たない」と自身の発見を評していました。そこから50年を超え、いまでは反強磁性体を示す物性が面白く、スピントロニクス分野でも応用研究が進んでいる状況です。上記のように本研究の目的を達成するための準備は順調に整いつつありますので、なるべく早く成果を出して、研究会等でお披露目したいと考えています。どうぞ宜しくお願いいたします。

[1] S. Hayami, Y. Yanagi, and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. 88, 123702 (2019).



X線で探るアシンメトリ量子と 拡張磁気多極子

山崎 裕一

物質・材料研究機構マテリアル基盤研究センター チームリーダー

軟X線吸収と散乱によって拡張磁気多極子の観測手法を開拓することを目標に研究を進めています。軟X線はX線の中でもエネルギーが低く、数百eVから2keVくらいの範囲の電磁波です。この領域には、3d遷移金属のL殻や4f電子系のM殻の吸収端があるため、軟X線吸収や散乱によって物性に直結した電子状態を微視的に観測することができます。

軟X線吸収と拡張磁気多極子を関連付けた研究は、120度反強磁性体 Mn_3Sn におけるX線磁気円二色性の可能性について検討したことがきっかけで始めました。 Mn_3Sn はブリージングカゴメ格子のネットワークにあるMnのスピンの負のスピカイラリティを持つ120度反強磁性体を構成しています。拡張磁気多極子の枠組みでは拡張磁気八極子に分類され、反強磁性体であるにも関わらず観測された異常ホール効果や磁気光学カー効果などの強磁性体の物性を説明されています[1]。X線磁気円二色性(XMCD)も同様に強磁性を検出できる計測手法であり、対称性の観点からはXMCDも許容されます。対称性の議論は常に正しい答えを与えるものの、物理応答の大きさや微視的な起源については説明できません。特に、XMCDは各元素の内殻励起による吸収の空間平均を検出する計測手法であり、複数の元素から成る拡張磁気多極子を検出できるかどうかは疑問が残っていました。

そこで、磁性イオンの置かれた局所的な対称性とX線吸収プロセスを再考しました。特に、Mnイオンが置かれた環境に応じて異なる電子軌道の量子化軸を設定することが重要です。その結果、XMCDの総和則で古くから知られていた磁気双極子項(T_z 項)によってXMCDが発現する可能性があることを見出しました[2]。磁気双極子項は原子の中心にあるスピンの作る磁場を演算子として、各電子軌道の形状に応じて異なる期待値を与える物理量です。棒磁石が作る磁場分布からもわかるように、磁気双極子磁場は異方的ですので、スピンと同じ方向に延びた軌道と縮んだ軌道では異なる期待値を与えます。 T_z 項はMnの各サイトにおけるd電子の軌道形状と120度反強磁性体構造を考慮して計算すると、スピン項とは異なり打ち消されずに残ります。つまり、拡張磁気八極子は微視的には各元素における T_z 項の平均で特徴づけられます。最近では、異常ホール効果などの物性現象も T_z 項を基に理解が進んでいます[3]。

T_z 項はスピンと軌道の形状に関連した物理量であり、スピン-軌道相互作用とも強い関連があります。実際、XMCDの総和則で T_z 項が発現するのは、内殻軌道のスピン-軌道相互作用が大きいことに起因しています。また、価電子帯でもスピン-軌道相互作用が強いII結合描像では T_z 項の期待値は J_z に比例するようになります。このように、拡張磁気多極子やスピン軌道相互作用と強い関連を示す T_z 項を通じて、アシンメトリ量子の電子状態を検出する計測手法の学理構築を目指していきます。

[1] S. Nakatsuji, *et al.*, Nature **527**, 212 (2015); T. Higo *et al.*, Nat. Photonics **12**, 73 (2018)

[2] Y. Yamasaki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 083703 (2020); M. Kimata, *et al.*, Nature Communications **12**, 5582 (2021)

[3] S. Hayami and H. Kusunose, Phys. Rev. B **103**, L180407 (2021)



放射光X線回折で可視化する アシンメトリ量子物質の電子軌道

鬼頭 俊介

東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教

A01 公募班として本領域に参画させていただきます東京大学の鬼頭俊介と申します。2年間どうぞよろしくお願いいたします。

物質の性質を担うのは電子であり、この電子の状態を理解することが物性研究の最大の目的です。電子の状態を調べる方法はいくつかあります。物質に電流や磁場などの外場を印加し、その応答を調べれば伝導性や磁性を知ることができます。近年の計算科学の進歩は目覚ましく、物質の対称性や結晶構造の情報があれば、物性のある程度予想することもできます。また、より直接的には「観る」という手段があります。通常、物性物理学の観点で「観る」というと、実空間もしくは運動量空間のどちらかで観ることになります。私は、電子の中でも特に物性に直接関係する価電子の空間的な分布状態(電子軌道)を「実空間で観る」という研究を行っています。

電子軌道を可視化するプローブとしてはX線が非常に有用です。X線は電子と相互作用するため、物質中の電子によって散乱されたX線には電子に関する様々な情報が含まれています。しかし、実際に電子軌道を可視化するのは容易ではありません。原子番号が大きくなるほど、全電子に比べて価電子の割合は小さくなり、その異方性を抽出するには高い実験精度が求められます。また、電子軌道を可視化するには高い空間分解能が求められます。私は、世界最高性能の放射光が利用できるSPring-8の高エネルギー X線を用いた回折実験によって、電子軌道をサブオングストロームの分解能で可視化する実験手法を提案しています。この方法は良質の単結晶さえあれば、構成元素や物性を問わずあらゆる物質に適用可能です。これまで、有機導体や遷移金属・希土類化合物などの、分子軌道やp, d, f軌道の可視化に成功しており、その価電子密度分布から結晶場、軌道混成、スピン-軌道相互作用などの情報を抽出してきました。

本公募課題では、対称心のない欠損スピネル化合物 GaM_4X_8 (M: 遷移金属, X: カルコゲン)における、遷移金属がつくる分子軌道の可視化を目指します。特に、遷移金属を4d, 5d遷移金属元素にすると相対論的スピン-軌道相互作用によって、分子軌道の多極子状態が実現する可能性が示唆されています。また、圧力下では超伝導が実現しており、分子軌道自由度との関連に興味を持たれます。この公募研究期間では、放射光X線を駆使して GaM_4X_8 系における結晶構造や軌道状態の解明に挑戦したいと思います。

また、A01班として、本領域内の共同研究にも積極的に貢献したいと思います。通常のX線回折実験や電子軌道観測だけでなく、圧力・磁場・電場・電流下でのX線回折実験や、共鳴X線散乱や非弾性X線散乱などの経験があるため、ご興味がある方はお気軽にお声がけください。よろしくお願いいたします。



物質の熱的性質における非対称性の開拓

水上 雄太

東北大学大学院理学研究科 准教授

東北大学の水上と申します。この度は、A02班「精密物性測定によるアシンメトリ量子物質の新機能開拓」の公募研究班として本領域に参画させて頂くこととなり大変光栄でございます。お世話になりますが、どうぞよろしくお願い致します。

私は近年、超伝導体や量子スピン系における相転移や準粒子励起の異方性に興味を持って物性測定を行ってきており、特に微小な単結晶試料を対象とした熱物性測定を得意として研究を進めて参りました。熱測定の多くはバルク測定であるため、結晶中にドメインを形成するような物理現象を対象とする場合、測定結果は各ドメインの性質の足しあわせとなり、本来の性質を議論することが難しくなります。そこで、非常に単純な発想ではありますが、微小な単結晶を対象にした高分解能な測定系を用いることで単一のドメインの性質を反映した熱物性の観測を試みております。具体的には、結晶の回転対称性の破れた電子状態においては、微小な単結晶を用いることで、ドメインの割合のアンバランスが期待されます。近年、私は鉄系超伝導体においてこのような異方性が超伝導状態での比熱の磁場方向の異方性として生ずることを観測致しました[1]。また、キタエフ模型と呼ばれるスピン模型で実現される量子スピン液体においては、低温で磁場方向に依存するマヨラナ励起が理論的に予測されています。その候補物質の微小な単結晶を用いた磁場中の励起の異方性測定により、トポロジースにより説明されるマヨラナ励起の磁場角度依存性を報告しております[2,3]。

本研究では、以上の熱測定を足掛かりとして、空間反転対称性の破れた系における熱および熱輸送現象に取り組みたいと考えております。特に、4f系化合物やハーフホイスラー化合物において空間反転対称性の破れに起因して生ずる非相反な応答について、熱物性の観点から研究を進めていきたいと考えております。単結晶系を舞台とした熱物性における非相反応答の研究例は小野瀬先生のグループによるマルチフェロイック物質の結果[4]等に限られ、電子系においてもスピン軌道相互作用や電子相関の詳細な影響などを調べていく予定をしております。またこのような測定が、空間反転対称性の破れに起因して生ずる新規な量子相を探るうえでの新しい検出手法にもなればと考えております。

本研究において、B01の理論班の方々との連携のもと実際の物質系に基づいた熱的性質の予測や解明、およびC01やC02の物質開発班の方々との連携を積極的に進められたらと考えております。また、本領域には熱物性測定の専門家の方々もおられますので、本研究の測定手法をより深化する上でもA01やA02の測定班の方々との共同研究もぜひ実施していけたらと考えております。

以上、研究方針の概要にはなりますが、少しでもご興味がある方はぜひ議論等お願いできましたらと思います。基本的には枠にとらわれることなく柔軟に研究を進めていければと考えておりまして、お気兼ねなくお声がけ頂けたらと思います。

[1] Y. Mizukami *et al.*, arXiv:2108.13081.

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

[3] K. Imamura, S. Suetsugu, Y. Mizukami *et al.*, Science Advances **10**, eadk3539 (2024).

[4] Y. Hirokane, Y. Nii, H. Masuda, Y. Onose, Sci. Adv. **6**, eabd3703 (2020).



バルク超伝導体を用いた 巨大超伝導交差応答の研究

石原 滉大

東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教

この度は、学術変革領域研究(A)「アシンメトリ量子」A02公募班として研究提案を採用していただき、誠にありがとうございます。この2年間で本領域に貢献できるよう、精一杯研究させていただきます。

私はこれまで、超伝導状態での低エネルギー準粒子励起を精密に測定することにより、様々な超伝導体における超伝導ギャップ対称性の研究を行ってきました。最近の例を挙げますと、重い電子系超伝導体 UTe_2 やカゴメ格子系超伝導体 CsV_3Sb_5 といった物質に対して磁場侵入長測定を行った結果を報告しています[1,2]。また、本研究提案に繋がる物質として、空間反転対称性の破れたハーフホイスラー超伝導体の研究も挙げることができます[3]。空間反転対称性の破れた超伝導体中では、パリティ混成した超伝導状態やヘリカル超伝導、トポロジカル超伝導など多岐にわたる面白い超伝導物性が古くから研究されてきました。その一方で、近年では超伝導状態での巨大な非相反応答や超伝導ダイオード効果など、結晶構造の非対称性（アシンメトリ）を直接反映した新たな超伝導物性開拓が進展しており、新たな超伝導デバイスへの応用も期待されています。私はこれまでの超伝導研究を活かして、本研究では「超伝導アシンメトロニクス」の開拓という点で本学術変革領域研究に貢献していきたいと考えています。

超伝導アシンメトロニクスを開拓していく中で、三つのテーマを提案させていただきました。一つ目は、ハーフホイスラー超伝導体における巨大超伝導非相反応答の微視的起源の解明です。予備測定として LuPdBi における超伝導転移温度直上での非相反電気伝導測定を行ったところ、これまで他の物質で報告されてきた値よりも二桁程度大きい巨大な応答を検出しました。さらに、磁場方向を結晶の(111)面内で回転させて非相反応答を測定したところ、三重回転対称成分が非常に大きいことを明らかにしました。これらの結果は、磁束の運動に依らない本質的な効果によって巨大な非相反応答が生じていることを示唆しているものの、具体的な微視的起源は未だに明らかになっていません。そこで、集束イオンビーム(FIB)を用いた微細加工や電子線照射を用いたキャリアドーピング、構成元素を変えることによるスピン軌道相互作用の制御などを用いて、ハーフホイスラー超伝導体における非相反応答の解明を試みます。

二つ目のテーマとして、試料に部分的な電子線照射を行うことによりハーフホイスラー超伝導体のダイオード構造を導入し、ゼロ磁場ダイオード効果の検出を試みます。三つ目のテーマは、バルク超伝導体を用いてより多角的な超伝導交差相関応答の検出になります。これまでの超伝導交差相関応答の研究はほとんどが電気磁気効果に限られてきましたが、近年では超伝導圧電効果が理論的に提案されたこともあり[4]、結晶の格子歪みと関係する交差相関応答も注目を集めています。

上記のテーマ以外でも多くの方々と共同研究したいと思っております。2年間よろしくお願いいたします。

[1] K. Ishihara *et al.*, *Nature Communications* **14**, 2966 (2023).
[2] M. Roppongi, K. Ishihara *et al.*, *Nature Communications* **14**, 667 (2023).

[3] K. Ishihara *et al.*, *Physical Review X* **11**, 041048 (2021).
[4] M. Chazono *et al.*, *Physical Review B* **105**, 024509 (2022).



大きさと方向を制御できる 「ベクトル圧力」で物質を非対称にしたい

池田 敦俊

京都大学大学院工学研究科 助教

本公募研究の内容は、私にとって新しい分野に挑戦するテーマです。まずは自己紹介として学生時代の研究からお話します。私の今までの研究テーマは「新しい超伝導体の探索」です。とくにトポロジカル物質と呼ばれる新しいバンド構造を持つ物質において超伝導を探してきました。ひとつ目に発見した超伝導体は $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ です[1]。この物質では価電子帯と伝導帯が交差したときのバンド混成が抑制され、ディラック・コーンと呼ばれる線形なバンド分散が存在します[2]。また、 Sn^{4-} という陰イオン状態の金属元素が存在し、化学的にも独特な物質です。ふたつ目に発見した超伝導体は CaSb_2 です[3]。この物質ではバンド交差が波数空間で一点ではなく線上に連なっており、ディラック線ノードと呼ばれる状態が予想されています[4]。面白そうな物質を探して、作って、冷やして、超伝導になるか確かめるとというのが私の研究スタイルでした。

以上のように私は今まで物質合成と新超伝導体探索を行ってきたので、「アシンメトリ量子」という言葉を聞いたときには「アシンメトリ超伝導体って作れるんだろうか?」と思いました。しかし私は今まで対称性によって現れるトポロジカル相に注目しており、非対称がキーワードとなる物質はいまひとつピンときませんでした。そこで特定の物質について考えるのをやめて、私が持っていたもう一つの疑問で公募研究に応募しました。それが公募研究のテーマである、物質の結晶構造を非対称にすることができる一軸圧力です。

私が学生時代と特定助教時代に所属していた研究室では、 Sr_2RuO_4 という超伝導体を長年研究しています。 Sr_2RuO_4 ではある方向に一軸圧力を印加すると、試料を押しても引っ張っても超伝導転移温度が1.5 Kから3 Kに倍増することが知られています[5]。一方、45度ずれた方向に一軸圧力を印加すると、試料を押すと超伝導転移温度が少し下がり、引っ張ると少し上がります。一軸圧力の方向によって、超伝導転移温度の変化量だけでなく、上昇するか下降するかさえ変わってしまうのです。「間の角度では何が起こるんだろう?」というのが最初の疑問でした。しかし現状の装置では一度試料を一軸圧力印加装置に載せると角度を変えることはできず、さまざまな角度に一軸圧力を印加するのは手間がかかり過ぎます。そこで、試料を取り外すことなく一軸圧力の方向を変化させられる装置を開発しようと考えました。試料固定後に一軸圧力の方向も制御できる「ベクトル圧力」を用いれば、 Sr_2RuO_4 を押す角度によって超伝導転移温度が上昇から下降に変化する様子が観測できるはずです。ほかの物質についても、結晶の対称性を任意の方向に崩すことができれば、非対称性によって新しい特性が現れる可能性があると考えています。まずはベクトル圧力印加装置を完成させることを目指し、そのあとはさまざまな物質についてベクトル圧力の有用性を実証していきます。

[1] M. Oudah, A. Ikeda *et al.*, Nat. Commun. **7**, 13617 (2016).

[2] T. Kariyado and M. Ogata, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 083704 (2011).

[3] A. Ikeda *et al.*, Phys. Rev. Mater. **4**, 041801(R) (2020).

[4] K. Funada *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 044711 (2019).

[5] C. W. Hicks *et al.*, Science **344**, 283 (2014).



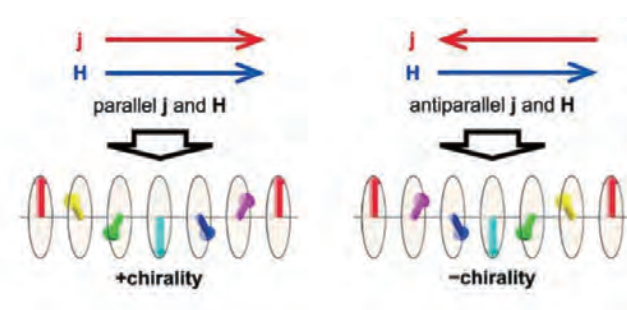
アシンメトリ量子物質における 新現象・新機能

小野瀬 佳文

東北大学金属材料研究所 教授

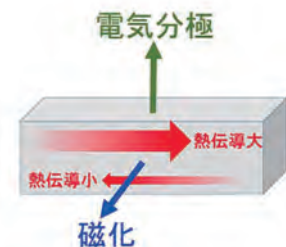
東北大学の小野瀬佳文と申します。何卒よろしくお願いいたします。我々のグループは、近年、対称性の破れた磁性体における新現象・新機能を開拓することを目的に研究を行ってきました。この領域はこれに非常に合致した内容になっていますので、参画させて頂けることを大変感謝しています。自己紹介代わりに、今まで我々がいつてきた新現象をいくつかで紹介させていただきます。

(1) 金属らせん磁性におけるキラリティ制御[1,2]



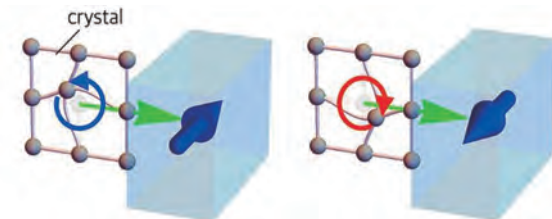
らせん磁性体は文字通り磁気モーメントがらせんを描く物質で、らせんの巻き方（キラリティ）の違う2状態は結晶の対称性が破れていなければ縮退しています。このキラリティの制御法は、金属の場合には最近まで分かっていませんでした。我々は、金属らせん磁性体に電流と磁場を同時印加するとそれらが平行か反平行かに依存してキラリティがそろうことを見出しました。

(2) マルチフェロイクスにおける非相反熱伝導[3]



時間反転対称性と空間反転対称性が同時に破れた物質では、電流の正負で抵抗が異なる非相反伝導のように、外場の進行方向の正負で応答が異なる非相反応答が様々なプローブで観測されています。我々は、最近、熱伝導の非相反性を観測しました。測定に用いたのはTbMnO₃というマルチフェロイクス物質で、磁化と電気分極の外積に熱流が平行か反平行かで熱伝導度が異なることを見出しました。

(3) フォノン角運動量による磁化制御[4]



空間反転対称性が破れた物質におけるフォノンにおいては、原子が楕円を描く軌道を示し有限の角運動量を持ちます。このようなフォノンの角運動量が強磁性体の電子スピに移行出来ればフォノンによる磁化制御が期待されます。我々

は、有限の角運動量を持つフォノンである表面弾性波を用いて強磁性体の磁化制御を達成しました。

今後もこのような新現象・新機能を開拓していきたいと思っております。皆様との共同研究が出来ればその大きな助けになると考えております。2年間どうぞよろしくお願いいたします。

[1] N. Jiang, Y. Nii, H. Arisawa, E. Saitoh, Y. Onose, Nat. Commun. **11**, 1601 (2020).

[2] H. Masuda *et al.*, Nat. Commun. **15**, 1999 (2024).

[3] Y. Hirokane, Y. Nii, H. Masuda, Y. Onose, Sci. Adv. **6**, eabd3703 (2020).

[4] R. Sasaki, Y. Nii, Y. Onose, Nat. Commun. **12**, 2599 (2021).



アシンメトリ量子の検出・可視化手法の開発と人工アシンメトロニクスへの展開

松原 正和

東北大学大学院理学研究科 准教授

この度、A02班の公募研究に採択していただき、大変光栄に思います。私は光物性を専門とし、磁気光学分光、非線形光学分光、超高速分光などを駆使して、磁性体や誘電体、マルチフェロイクス、メタマテリアルなどの多彩な物質の機能解明と新機能の創出に取り組んできました。今回の公募研究では、特に以下の2つのテーマに取り組むつもりです。

まず一つ目は、物質機能を生み出す多彩な秩序と電子自由度の非対称性（アシンメトリ量子）を直接検出・可視化する光技術の開発です。世の中に存在する多くの機能性物質において、その機能の多くは物質における対称性の破れ（アシンメトリ）に起因し、その機能的電子物性を理解するうえで、如何なる対称性の破れが生じているか、また、結果として生じる時間・空間的な不均一構造であるドメイン構造を明らかにすることが重要です。しかしながら、本研究領域で対象としているアシンメトリ量子物質の多くは、どのような対称性が破れているのか、その検出と評価が著しく難しいという問題があります。この微小な対称性の破れを検出する強力な手法の1つが、光第二高調波発生（SHG）を主とした非線形光学測定です。我々はこれまで、独自開発した非破壊・非接触のSHG顕微鏡を用いて、多くの機能性物質の対称性を同定し、電場・磁場・光などの外場下でのドメインの実空間ダイナミクスを可視化し、その電子機能制御過程を解明することに成功しています[1-3]。本研究ではこれらをさらに発展させ、空間反転対称性や時間反転対称性の破れを伴わないアシンメトリ量子の検出・可視化も含め、本研究領域で開発される様々なアシンメトリ量子物質の精密評価を目指します。

二つ目は、数十ナノメートル～数マイクロメートルスケールで人工的にアシンメトリ量子を実現・制御し、アシンメトリ量子科学の本質の理解・スケール普遍性の検証・新機能創出に挑戦する「人工アシンメトロニクス」への展開です。具体的には、人工アシンメトリ量子を用いた新規な光機能の創出を目指します。また、アシンメトリ量子物質の深化（C01班）や開拓（C02班）を行うグループとも連携を取りながら、希望があれば人工アシンメトリ量子物質を領域内研究者に提供し、班内および班間の協力を深めていきます。

以上の研究をベースとしつつも、本研究領域における様々なニーズに対応することで、空間スケールシームレスなアシンメトリ物質科学の新たなフロンティア開拓に貢献できればと思います。2年間どうぞよろしくお願い致します。

[1] M. Matsubara *et al.*, Science **348**, 1112 (2015).

[2] 松原正和, 望月維人, 木村剛, 固体物理 **51**, 173 (2016).

[3] D. Sekine, M. Matsubara *et al.*, Phys. Rev. Mater. **8**, 064406 (2024).



電流下で顕在化する 多極子アシンメトリ応答の光技術観測

米澤 進吾

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻 教授

物質の示す興味深い物性・機能性の多くは、アシンメトリの典型である対称性の破れと密接に関わっています。その中でも物質科学において根本的に重要な時間反転対称性 (Time-reversal-symmetry; TRS) や空間回転対称性 (Space-rotational symmetry; SRS) の破れについて、私達の研究室ではこれらを高感度かつ直接的に検出する光測定手法を導入してきました。まず、SRSの破れを検出するには、光ファイバーベースのひずみゲージであるFiber Bragg grating (FBG) 技術を使うことができます[1] (図1)。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。最近私達はこの手法を用いて測定した強磁性体におけるピエゾ磁気効果を報告しました[2]。また、TRS破れは、物質の磁気的性質と光の相互作用である磁気光学効果で測定することができます。私たちは、ナノラジアン級の超高感度で磁気光学カー効果 (図2) を検出できカイラル超伝導などの測定にも使えるLoop-less Sagnac干渉計[3]を用いた研究にも取り組んでおり、カゴメ金属の研究などを進めています[4]。

これらの独自性のある手段を用いて、対称性の破れを伴う新奇アシンメトリ応答を研究していくのが本公募研究のミッションになります。私が特に興味を持っているのが「奇パリティ多極子」秩序の示す電流応答です。この状態では電流の印加によるTRS破れやSRS破れを伴う新奇量子、例えば電流誘起の磁化発現であるEdelstain効果[5]、電流誘起のネマティシティーであるMagneto-piezo-electric効果[6]などが顕在化すると予想されています。

これらの新奇現象について、高感度で直接的な光ベースの観測手法で研究し、詳細を明らかにしていきたいと考えています。また、電流下の現象に限らず、これらの対称性破れに関連する共同研究にもぜひ取り組みたいとも思っています。2年間どうぞよろしくお願いいたします。

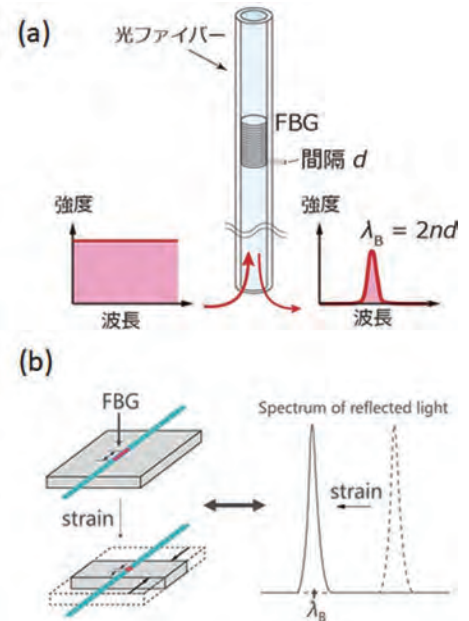


図1: Fiber-Bragg grating (FBG) によるひずみ測定の様式図。

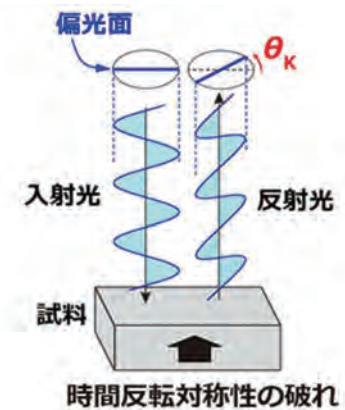


図2: 磁気光学カー効果の様式図。

[1] 最近の Review として、M. Jaime *et al.*, *Sensors* **17**, 2572 (2017).
[2] M. Tomikawa, SY *et al.*, arXiv:2403.19998 (2024).
[3] J. Xia *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 167002 (2006).

[4] Y. Hu, SY *et al.*, arXiv:2208.08036 (2022).
[5] V. M. Edelstein, *Solid State Commun.* **73**, 233 (1990)
[6] H. Watanabe & Y. Yanase, *Phys. Rev. B* **96**, 064432 (2017).



準結晶と近似結晶における 奇パリティ結晶場と多極子の開拓

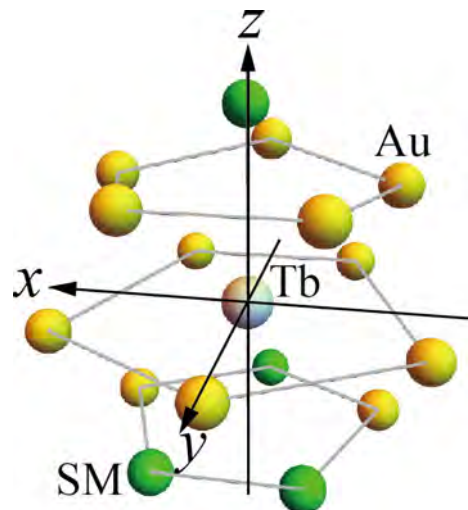
渡辺 真仁

九州工業大学大学院工学研究院基礎科学研究系 教授

準結晶は原子が非周期的かつ規則的に配列した固体であり、5 回回転対称性など周期結晶では許されない特有の回転対称性をもつ。並進対称性に基づいたブロッホの定理が適用されないため、準結晶においてどのような電子状態が実現し、物性を発現するか、その解明は物質科学のフロンティアである[1]。

準結晶と共通の局所原子配置をもち、かつ周期性をもつ固体を近似結晶とよぶ。これまでに20面体準結晶および近似結晶 Cd_6R , Au-SM-R ($\text{SM}=\text{Al, Ga, Si, Ge}$ など, $\text{R}=\text{希土類原子}$) などが合成され、量子臨界現象[2]や強磁性長距離秩序[3]を初めとする興味深い物性が観測されており、強相関電子系の新しい研究の舞台として注目を集めている[4]。強相関電子状態を理解する第一歩は、希土類サイトの結晶場を明らかにすることである。右図に、準結晶 Au-SM-Tb の Tb 原子の周りの局所原子配置を示す。 Tb 原子の周りに 5 角形の原子配置をもつことがわかる。5 回回転対称性は結晶の並進対称性と両立しないため、これまでによく確立している結晶点群に基づく結晶場の理論がこの系に適用できず、強相関電子状態、特に磁性の理解を妨げていた。そこで、準結晶および近似結晶一般の結晶場の理論を点電荷モデルに基づいて構築した[5]。これにより結晶場の微視的な理論解析が可能となった[6]。最近、 Tb 系の結晶場の理論解析が行われ、結晶場基底状態はユニークな磁気異方性を示すことが明らかとなり、渦巻き状態を初めとする多彩な非共線・非共面磁気構造が実現し、ヘッジホッグ状態などのトポロジカル磁気構造も見出された[7,8]。

また、新しい 1/1 近似結晶 $\text{Au}_{62}\text{Al}_{23}\text{U}_{16}$ が C02 班の芳賀らによって最近合成された[9]。今後アクチノイド系準結晶・近似結晶の物質開発が進むことが期待される。これらの強相関準結晶・近似結晶において偶パリティのみならず奇パリティの結晶場および多極子を理論解明し、新規物性を開拓していきたいと考えている。



[1] 渡辺真仁, 化学と教育 **70** No.12 (2022) 598.

[2] S. Watanabe and K. Miyake, "Quantum critical phenomena of valence transition -Heavy fermion metals and related systems", Springer (2023).

[3] R. Tamura *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **143**, 19938 (2021).

[4] N. K. Sato *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 072001 (2022).

[5] S. Watanabe and M. Kawamoto, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 063701 (2021).

[6] 渡辺真仁, 固体物理 **58** No.4, (2023) 195.

[7] S. Watanabe, Proc. Natl. Acad. Sci. **118**(43), e2112202118 (2021).

[8] 渡辺真仁, 日本物理学会誌 **77** No.9, (2022) 616.

[9] 芳賀芳範, トピカルミーティング「アシンメトリ量子物質の開発～現状と展望～」1/6 午前半セッション-3, 於九州工業大学 (2024).



ミクロな非対称性が誘起する 超伝導非相反現象

大同 暁人

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一教室 凝縮系理論グループ 助教

公募B01班として本領域に参画させていただくことになりました、京大柳瀬研助教の大同と申します。エキゾチックな超伝導やその非自明な応答に興味を持って研究しています。どうぞよろしくお願いいたします。

近年空間反転対称性がない系における非相反現象が注目を集めていますが、本課題ではその中でも特に超伝導体の非相反現象に注目した研究を行います。非相反性とは「電子などが順方向に進む様子と逆方向に進む様子が異なる」ことであり、超伝導体は非相反現象を研究するうえで重要な舞台の一つです。超伝導非相反現象について既存の理解を深化すること、また新現象を探索することによって、超伝導体におけるアシンメトリ効果の全貌解明に繋げることを目的としています。

一般に非相反現象には空間反転対称性の破れが必須ですが、私が特に興味を持っているのはミクロな結晶構造や電子系の秩序といった内因的な非対称性に起因した非相反応答です。ミクロな空間反転対称性の破れ（アシンメトリ）がどのように非相反現象を引き起こすかを解明することで、物質の機能性開拓やミクロ状態のプロブとしての活用が可能になります。たとえば、私たちは超伝導ダイオード効果や非相反ゆらぎ伝導度といった非相反応答が、ヘリカル超伝導と呼ばれるエキゾチックな超伝導状態のプロブとして活用できることを明らかにしてきました[1,2]。ヘリカル超伝導はCooper対が自発的に有限の重心運動量を獲得する興味深い超伝導相で、空間反転対称性の破れた超伝導体に磁場を印加することで出現することが理論的に知られていました。いわゆる(Fulde-Ferrell-)Larkin-Ovchinnikov状態とは異なり、ヘリカル超伝導は超伝導ギャップの空間変調を伴わないため、ヘリカル超伝導の実験的同定は長年の課題でした。私たちは磁場の増大に伴ってCooper対の重心運動量が急激に変化する様子が非相反応答を使って検出できることを指摘し、またこれを示唆する結果も実験的に得られました[3]。ヘリカル超伝導の例のように、非相反応答測定によって従来の実験手法ではアクセス困難なミクロ情報が得られる可能性があります。ミクロな非対称性に誘起された非相反応答の研究は、この意味で非常に魅力的だと感じています。

以上のような背景のもとで、本課題ではまず超伝導ダイオード効果の理論の高度化に取り組めます。超伝導ダイオード効果は超伝導体の臨界電流が非相反になる現象であり、これを実現するには時間反転対象性を破ることが必要です。多くの実験では外部磁場がこの役割を担いますが、外部磁場なしの超伝導ダイオード効果も報告されており、時間反転対象性がどのように破れているのか解明することが重要な課題です。自発的な秩序や、あるいは非平衡性を考慮することでこの問題に取り組めたいと考えています。また、超伝導ダイオード効果以外にもさまざまな非相反応答を用いて、トポロジカル超伝導などを含むエキゾチックな超伝導状態のプロブとしての非相反応答の可能性を探っていきたいと考えています。

[1] A. Daido, Y. Ikeda, and Y. Yanase, PRL **128**, 037001 (2022).

[2] A. Daido and Y. Yanase, Phys. Rev. Research **6**, L022009 (2024).

[3] T. Asaba *et al.*, Nat. Commun. **15**, 3861 (2024).



Cross-coupled ferroic orders in chiral magnets

Harald O. Jeschke

Research Institute for Interdisciplinary Science, Okayama University Professor

The focus of my research group is quantitative material specific microscopic parametrization, analysis and design of complex magnets and superconductors. I have joined the B01 research area with a project of understanding and predicting ferroic orders in chiral magnets. The motivation for this project arose from my recent study of BaCoSiO_4 [1]. This material has a chiral crystal structure and neutron diffraction detects a very complex ordering pattern of Co^{2+} $\mathbf{S}=3/2$ moments. Our analysis of the magnetic Hamiltonian using density functional theory (DFT) based energy mapping leads to deep insight; the magnetic order of BaCoSiO_4 can be understood as three interpenetrating ordered sublattices which only weakly couple with each other. Each sublattice carries a toroidal moment, and Dzyaloshinskii-Moriya interaction imparts a small ferromagnetic moment. The unusual consequence is that switching between ferritoroidal and ferrotoroidal states is possible in this material by applying modest magnetic fields. DFT energy mapping was a crucial tool to understand BaCoSiO_4 , and it is generally very valuable in magnetic compounds where many exchange paths compete, as for example in the three-dimensional $\mathbf{S}=1$ spin liquid candidate $\text{K}_2\text{Ni}_2(\text{SO}_4)_3$ [2]. Very recently, in the context of asymmetry, we have studied the new material $\text{CuAg}(\text{SO}_4)_2$ and demonstrated that it is an altermagnet [3]. The role of energy mapping is here to elucidate the Hamiltonian which can then be solved to demonstrate a collinear antiferromagnetic ground state. We have also investigated an example of the quasi-kagome magnets with ZrNiAl type structure which are studied in several asymmetry projects. CrRhAs is metallic and has a magnetic Hamiltonian which is dominated by second neighbor exchange interactions but has also important ring exchange terms [4].

This asymmetry project involves two classes of magnets that present exactly the situation of highly complex low symmetry crystal structures where a precise study of subleading exchange paths is the starting point for all further analysis. One class of materials are langasites like $\text{Ba}_3\text{NbFe}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ where triangles of Fe^{3+} ions with $\mathbf{S}=5/2$ form tubes that support a helical magnetic order due to a chiral alternation of exchange couplings. We will analyze the magnetic Hamiltonian and ground state of several iron langasites before investigating cross-coupled ferroic orders. The other family of materials we will focus on are square cupola orthophosphates. They are characterized by square plaquettes of Cu^{2+} $\mathbf{S}=1/2$ ions carrying a magnetic quadrupole moment.

[1] L. Ding *et al.*, Nat. Comm. **12**, 5339 (2021).

[2] I. Živković *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 157204 (2021).

[3] H. O. Jeschke *et al.*, Phys. Rev. B **109**, (2024) L220412.

[4] Y. N. Huang *et al.*, npj Quant. Mater. **8**, 32 (2023).



電子自由度のアシンメトリによる トポロジカル相制御

上田 健太郎

東京大学大学院工学系研究科 講師

東大工の上田と申します。この度D01班「アシンメトリ量子物質の創出」の公募研究に参画させていただきました。二年間どうぞよろしくお願いいたします。

D01班は、アシンメトリ量子物質の深化を担うC01班、開拓を担うC02班を補填する役割を期待されていると令和六年度領域全体会議・公募研究キックオフ会議でお聞きました。私は、空間反転対称性の破れたハーフホイスラー型金属間化合物 RTX を舞台に、アシンメトリ量子機能の深化と未踏物質の開拓を並行して行い、役割を果たしていきたいと思っています。

私がこの物質群を選んだ理由は以下の通りです。(i)希土類元素 R 、遷移金属元素 T 、14,15族元素 X から構成され、電子構造や磁性の制御性が高いこと；(ii)トポロジカルに自明な半導体からバンド反転した非自明な半金属まで豊富な電子状態を示すこと；(iii)磁気秩序や多極子秩序、超伝導など種々の対称性の破れを示すこと；(iv)局在磁性と遍歴電子の結合が強いこと。この物質群が注目されたのは(ii)の性質故で、2本の論文が相次いでNature Materialsに掲載されたのは10年以上前になります[1]。しかし、磁場誘起ワイル半金属 $GdPtBi$ に研究が集中し、この物質群の持つポテンシャルは十分に引き出されていませんでした。

そこで私は、結晶合成による未踏電子相の開拓を目指しました。最近、自明な電子相に区分されている $HoAuSn$ の単結晶合成に初めて成功しました[2]。そして、四桁以上もの巨大な負の磁気抵抗効果を観測しました。これは、磁場によって偏極した Ho 磁気モーメントが強烈なバンド分裂を誘発し、異常に高い移動度の担体を生み出したことに由来すると考えられます。この事実は、未踏物質には思いもよらぬ物性が潜んでいること、希土類 $4f$ 電子のもたらすアシンメトリとトポロジカル電子との結合が劇的な現象を起こしうることを示唆しています。現在は、 Sn が Pb に置換された、バンド反転した新物質 $RAuPb$ の単結晶育成に取り組んでおり、芽吹きつつあります。

今後、電子の内部自由度がもたらすアシンメトリという切り口から、この物質群の未知なる量子物性を引き出すことで、強相関トポロジカル物性分野を牽引、ひいては新しい分野を打ち立てていければと考えています。そのためには、C01,C02班だけでなく、A01,A02,B01班の方々との連携による微視的機構の解明や新しい交差相関応答の開拓が不可欠と考えています。もし御興味がありましたら、お気軽にお声がけください。積極的に試料を提供し、本領域の発展に貢献したいと思います。

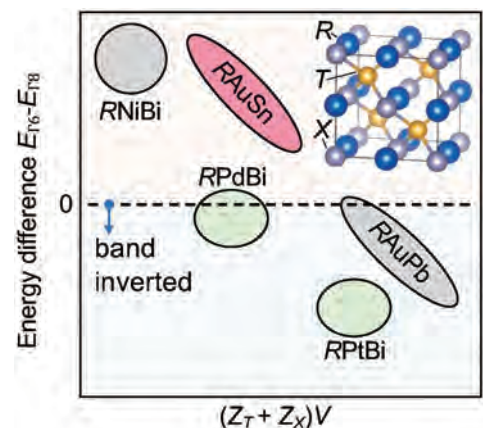


図1 ハーフホイスラー型金属間化合物の結晶構造と電子相図の模式図[1]

[1] S. Chadov et al., Nat. Mat. **9**, 541 (2010); H. Lin et al., Nat. Mat. **9**, 546 (2010).

[2] K. Ueda et al., Nat. Commun. **14**, 6339 (2023).



軸性アニーリングによる 強相関非対称物質の創製

志村 恭通

広島大学大学院先進理工系科学研究科 准教授

この度は公募研究に採択いただきありがとうございます。広島大学の志村 恭通(やすゆき)と申します。まずは簡単に自己紹介をいたします。私は北海道の札幌市と旭川市で育ち、2008年に北大を卒業しました。4年生に上がる時の研究室配属で、網塚先生(A01)と柳澤さん(A02)の研究室と、現在の吉田さん(C02)の研究室と悩みに悩んで、後者に決めたことを覚えています。その後、修士課程から東大の物性研究所に移り、榊原俊郎先生と橘高さん(A02)の下で2013年に学位を取得した後、当時、同じ4階におられた中辻知さんの研究室を拠点とし、アメリカに行き来しながらポスドクを4年半続け、2017年に広島大学に参りました。

広島大の私の居室のとなりの部屋には鬼丸領域代表がいらっしゃいます。鬼丸さんに“アシンメトリ量子って何ですか? なんでもありじゃないですか?”と聞いてみたところ、“アシンメトリ量子の意味はこれから作っていけばいいんじゃない”というフンワリとした答えが返ってきました。正直、この学術変革領域がみんなで熱く、体育会系部活的なノリだったらどうしようと不安だったので、このいい意味で緩い響きはとても心地良く感じました。だからこそ、デキる方が結集し、たくさんの公募研究の応募があったのだらうと思いました。

さて、今回の公募研究の内容について紹介します。私は、もともと結晶の対称性を制御できる一軸圧力に非常に興味を持っており、自身も取り組んだことがありました。しかし対象としている強相関4f電子系に必要な極低温かつ一軸圧下での測定は大変で、その割に明瞭な一軸圧効果も現れにくいと感じておりました。一方で、私たちの研究グループでは希土類化合物の合成から極低温物性測定までを幅広く行っております。どちらもそれだけを専門とする方々には敵わないと思いつつ、逆に双方を活かせるような研究をしたいと考えておりました(私はその一環として極低温用の金属磁気冷凍材料の開発を進めています)。

そこで、本研究課題である“軸性アニーリング”を考案しました。軸性アニーリングとは、アシンメトリ量子に負けないくらいの造語で、一軸圧力を印加した状態の単結晶試料の温度を融点に近い高温まで上げた後に急冷して、試料に人工的に歪を導入するというチャレンジングな物質の制御法です。温度を上げるため、一軸圧力セルは融点が高いステンレスを用いて、試料が酸化しないように圧力セルごと石英管に封入します。加熱して急冷後には圧力セルから歪んだ試料を取り出し、極低温物性測定などに使うという手筈です。

このように書くと簡単に見えますが、まだ圧力セルができてテストをした段階で、スタートラインに立ったばかりです。しかし、幾何学的に磁気相互作用が競合するフラストレート磁性体、わずかなdisorderに敏感な軌道(電気四極子)秩序系、磁性イオンの低次元配置に由来する磁気揺らぎが発現機構とされる非従来型の超伝導体など、一軸圧力による対称性の低下に敏感と期待される系はたくさんあります。ゆえにどう転ぶかは私にもわかりませんが、夢が膨らむテーマであることは確かかなと思っています。

最後に、鬼丸領域代表のお膝元に、変わった奴がいるなあ皆様覚えていただけるよう、そして、皆様と協力しながら、本学術変革領域の進展に貢献できるよう精一杯務めさせていただきます。



アシンメトリに着目した ウラン化合物の物質探索

青木 大

東北大学金属材料研究所 教授

この公募研究課題では、ウラン化合物に焦点をしばって、局所的に空間反転対称性の破れた構造やカイラル構造など、結晶構造の「アシンメトリ」に着目した物質開発を行い、その新奇現象を探索することを目的としています。ウランの5f電子は局在と遍歴の中間的な性質を持ち、また強いスピン軌道結合を持ちます。このため、磁性と超伝導の共存、「隠れた秩序」、強磁性超伝導に現れる磁場誘起超伝導など、魅力的な物性物理の宝庫です。超伝導に関して言うと、多くの非従来型超伝導体がスピン三重項超伝導の候補として考えられています。本課題では、取り上げませんが、ネプツニウム化合物 NpPd_5Al_2 やプルトニウム化合物 PuTGa_5 (T:遷移元素)も5f電子による反強磁性磁気秩序寸前の重い電子系超伝導や「高温」超伝導を示すことが知られています。このように魅力的な物性が知られているアクチノイド化合物ですが、放射性物質であるために試料育成を含めて取り扱いができる施設は限られています。本研究を行う東北大金研・大洗センターはこのような放射性物質を安全に取り扱うことができる世界でも珍しい共同利用施設です。私の研究室では、引き上げ法、フラックス法、ブリッジマン法、気相成長法などによる単結晶育成が可能であり、単結晶構造解析、粉末X線回折、CCDカメラによるラウエ写真による方位出し、放電加工機、ワイヤーカッターによる切り出しなど、単結晶育成後の試料評価、準備がきわめて効率的に行えるようになっていきます。また、自作ADRによる0.1 Kまでの電気抵抗測定や比熱測定、磁化・磁化率測定、希釈冷凍機温度でのdHvA効果測定、磁気抵抗測定も行えます。最近、集束イオンビーム(FIB)加工装置も導入して、微細加工した試料の輸送現象測定の準備も整えつつあります。1つの研究室で、物質開発から極低温の精密物性測定まで行える研究環境がここまで整っている例はあまりないのではないのでしょうか。これらの装置は、共同利用装置としても提供されていますので、申請書を出して採択されれば誰でも利用可能です。共同利用のための旅費もサポートされますので、ぜひ大洗に来てください。ウラン化合物である必要はありません。本学術変革領域「アシンメトリ量子」に参画するにあたり、自身の研究を進めることはもちろんですが、共同利用を通じた若手人材育成や研究者コミュニティの醸成にも貢献したいと考えています。

最後に、本研究課題における私自身の研究内容について少し述べたいと思います。スピン三重項超伝導体 UTe_2 の研究は、超伝導の発見からすでに5年を超えています。この間、35Tまでの磁場再突入型超伝導や多重超伝導、メタ磁性やそれに呼応した60テスラを超える H_2 など、玉手箱のように次から次へと驚くような結果が報告されて来ました。とくに、最近は残留抵抗比が500~1000に到達するような超純良単結晶が得られるようになったことで、スピン三重項超伝導の本質に迫る結果が得られつつあります。この研究を更に進めます。最近、液相輸送法による単結晶育成法を開発しました。フラックス法と気相成長法の「良いところ取り」をしたような方法であり、 UTe_2 に限らず多くの物質開発に適用できると思います。このような手法を用いて、カルコゲナイドやプニクタイトを含むウラン化合物の物質探索も進めます。2年間、よろしくお願いします。



カイラルハニカム量子物質の開発

石川 孟

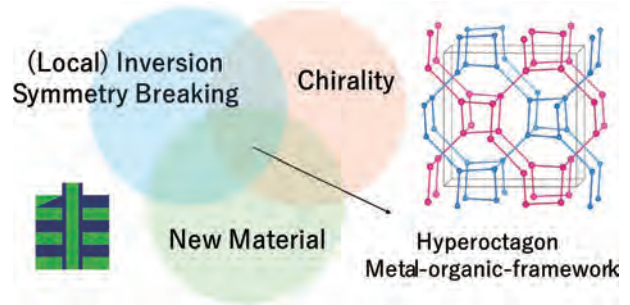
東京大学物性研究所 助教

公募D01班に参加します石川孟です。2年間よろしく
 お願いします。私は2019年から東京大学物性研究所、
 国際超強磁場科学研究施設の金道研究室の助教として
 働いています。学生の際は同じ研究所の広井研究室で
 $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (PRL114, 227202, 2015)などカゴメ
 磁性体の研究で学位を取得しました。その後、ドイツ
 Stuttgartの高木グループで5d多極子物質 Cs_2TaCl_6 (PRB

100,045142,2019)などスピン軌道結合系の新物質開発を行いました。現在は試料合成を継続しながら、パルス
 強磁場を使い、新しい磁場誘起相転移を示す物質を探索しています。

アシンメトリ量子では、カイラリティの自由度をもつ有機無機ハイブリッド物質の研究に取り組みます。特に、
 ハイパーオクタゴン格子という、三次元ハニカム格子をもつMOF(Metal-organic framework, 有機金属構造体)
 に着目しています。アシンメトリ量子では、(局所的な)空間反転対称性の破れとカイラリティがキーワードと考
 えています。また、公募D01班では新しい物質を提案することが重要です。ハイパーオクタゴン格子は、三次元ハ
 ニカムとよばれる格子の一つで、二次元ハニカムと同様に局所的な空間反転対称性を持たない格子です。空間
 群は $I4_132$ で、構成元素がカイラルなネットワークを形成します。このようなネットワークは一般的な無機化合物
 で現れることは稀ですが、MOFではしばしば現れます。以上のような特徴から、アシンメトリ量子の研究対象とし
 て最適と考えました。

現在研究している $[(\text{Me}_2\text{NH}_2)_3(\text{SO}_4)]_2[\text{Co}_2(\text{ox})]$ というMOFは、 $[(\text{Me}_2\text{NH}_2)_3(\text{SO}_4)]_2$ と $[\text{Co}_2(\text{ox})]$ という二種類のネッ
 トワークが入れ子になった面白い構造をもちます。 $[(\text{Me}_2\text{NH}_2)_3(\text{SO}_4)]_2$ では、配向のdisorderがある SO_4 四面体が、
 $[\text{Co}_2(\text{ox})]$ では磁性を持つCoイオンが、それぞれハイパーオクタゴン格子を形成しています。このため、 SO_4 四面
 体の電気双極子とCoイオンのスピンのハイパーオクタゴン格子上で秩序化する様子を調べることができます。
 磁性に関しては第一報の論文が出版済みで、bipartiteなハニカム格子系であるにも関わらずフラストレート磁
 性体のように複数の磁気相が競合することが分かりました (PRL 132,156702,2024)。今後、どのような磁気秩序
 が実現しているか、別の金属イオンの場合どのような磁性が現れるかに着目して研究を行いたいと考えていま
 す。 $[(\text{Me}_2\text{NH}_2)_3(\text{SO}_4)]_2$ 内でも何らかの相転移があることが最近分かってきており、誘電率などを調べる予定です。
 最近研究してきた物質を振り返ると、MOFだけでなくスター格子ハイブリッド物質 (PRB 109,L180401,2024)、ヨ
 ウ化物超伝導体 (PRMaterials,7,054804,2023)、4f磁性体 (PRMaterials,6,064405,2022) など、ハニカム系が多い
 ことに気づきました。アシンメトリ量子をきっかけに、ハニカム物質関連で様々な共同研究を開始することがで
 きれば大変光栄です。





原子レベルで制御された空間アシンメトリに 起因する磁気相互作用

松野 丈夫

大阪大学大学院理学研究科 教授

我々の研究室では遷移金属酸化物の薄膜合成を通して物質の対称性・次元性を制御し、新物質開発・新規物性開拓を行っています。二種類の薄膜が接する界面は多様な物性の舞台であり、単一の物質からは期待できないような物性と機能が生じる可能性があります。例えば p 型Siと n 型Siからなる p - n 接合はダイオードとなり、現代社会を支える半導体デバイスの中核となっていることは良く知られています。ダイオードは界面で必ず空間反転対称性が破れることの帰結として現れることを考えると、量子物質からなる界面は空間アシンメトリを活かした物性研究の格好の舞台です。我々は強相関電子系を用いて原子レベルで制御された界面を作ること、半導体デバイスにはない物性・機能を実現することを目指しています。

本領域での我々のターゲットは、ナノスケールのトポロジカル磁気構造である「スキルミオン」です。磁性体中のトポロジカル欠陥であるこのスキルミオンは、微小な電流で駆動できることから省電力デバイスの構成要素として期待されています。スキルミオンを生成する機構の中で最も有力視されているの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物質を組み合わせた界面では界面での反転対称性の破れに由来するDM相互作用が期待できます。我々は強いスピン-軌道相互作用を持つ物質としてイリジウム酸化物を用い、トポロジカルホール効果という新しいホール効果を観測することで界面DM相互作用がスキルミオンを生ずることを提唱しました [1, 2]。ただし、肝心のDM相互作用そのものの定量評価がまだできていませんので、微小な三角構造において面内磁場を印加させつつ面直方向の磁化過程を測定することでDM相互作用を決定し、界面の磁気特性が電子論的にどのように決定されるかを明らかにしたいと考えています。

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以外にも広くスピントロニクス舞台となっています。スピン軌道相互作用の強い物質では電流からスピン流への変換（スピンホール効果）が効率よく行われることが知られています。電流から生じたスピン流を隣接する強磁性体に注入することで発生するスピン軌道トルクは磁化を反転できますので、磁気デバイスの動作原理となり得ます。最近の我々の研究では、イリジウム酸化物・タングステン酸化物などの $5d$ 電子系酸化物と強磁性体金属との界面を舞台として、 $5d$ 電子系酸化物が電流を効率よくスピン流に変換する物質であることを示しました [3-6]。これもまた、量子物質に空間アシンメトリを加えることで生じた現象です。このような界面を利用したスキルミオンやスピン流の学理は本領域に新しい側面を付け加えられると信じております。皆様との議論を楽しみつつ、領域に貢献できればと考えておりますのでよろしくお願いいたします。

[1] J. Matsuno *et al.*, Sci. Adv. **2**, e1600304 (2016).
[2] Y. Ohuchi *et al.*, Nat. Commun. **9**, 213 (2018)
[3] K. Ueda *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 134432 (2020).

[4] K. Ueda *et al.*, Phys. Rev. Appl. **16**, 034039 (2021).
[5] S. Hori *et al.*, Appl. Phys. Lett. **121**, 022402 (2022).
[6] K. Ueda *et al.*, APL Mater. **11**, 061125 (2023).



表面非対称電子軌道の制御による 非相反伝導特性の最大化

金澤 直也

東京大学生産技術研究所 准教授

公募研究に採択いただいた東京大学生産技術研究所の金澤です。私の研究課題では、本学術変革領域でも中心課題となっているアシンメトリ量子状態がもたらす非相反伝導や整流効果に着目しています。非相反現象は、水流や血流、音響やゲルなど多彩な分野に応用されています。固体物理の分野では、pn接合ダイオードの発明により電流制御が可能になっていますが、最近では結晶構造の対称性の破れに注目した非相反現象がホットトピックとなっています。結晶の対称性に注目することで、pn接合を作らなくても電流の非相反性を作り出せたり、熱流や光など多彩な粒子や素励起にも拡張することが可能です。さらに最近では、磁気ドメインや超伝導などの量子相自体を、電流の入力方向で制御できることも明らかになってきました[1,2]。

しかしながら、一般にこれらの非相反特性は信号が小さく、動作範囲も限定的です。そこで本研究では、巨大非相反伝導の実現に向けて、物理的起源の理解と物質設計指針の提案を目指します。特に非相反電気伝導は、磁場や磁化といった時間反転対称性の破れが必要であり、電荷とスピンの交差相関、すなわちスピン軌道相互作用が関わるが多いです。物質設計の観点からは、希少な重元素を必ず使用しなければならないのかについても議論したいと思います。

本研究では、モデル物質として最近発見したFeSiの表面状態に注目します[3]。FeSiはバルクが非磁性絶縁体ですが、表面に強磁性金属状態が現れることを特定しました[図]。この表面状態はトポロジカル絶縁体に由来するものではなく、電気分極のトポロジーで用いられているZak位相で特徴付けられます。Zak位相はブリルアンゾーンを横断するベリー接続の線積分で表され、物理的にはワニエ関数の中心位置に対応しています。Zak位相は電子軌道の位置を定量的に表すため、電気分極の理論で用いられています。本研究では、このZak位相を表面界面の対称性の破れ度合いを表す良い指標として用いることで表面分極由来のスピン軌道物性をデザイン・制御し、重元素フリーでの現実的なデバイス動作の達成を目指しています。

特定の物質を中心とした研究ですが、より一般的な概念に昇華させて、学術変革領域の皆様との新しい研究に発展できるように尽力したいと思います。2023年度に研究室を立ち上げたばかりですので、ぜひ多岐に渡り交流させていただければ幸いです。

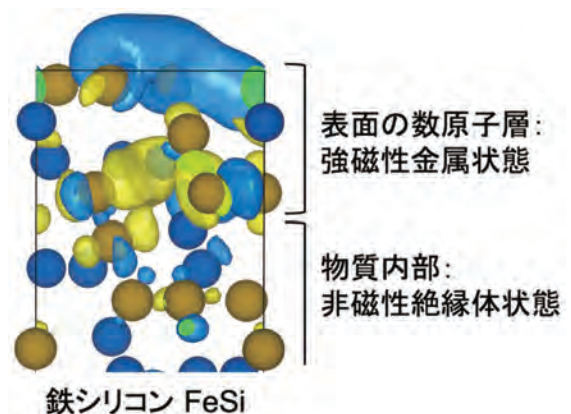


図: Zak位相に由来したFeSiトポロジカル表面の非対称電子軌道。

[1] N. Jiang *et al.*, Nat. Commun. **11**, 1601 (2020).

[2] F. Ando *et al.*, Nature **584**, 373-376 (2020).

[3] Y. Ohtsuka, N. Kanazawa *et al.*, Sci. Adv. **7**, eabj0498 (2021).



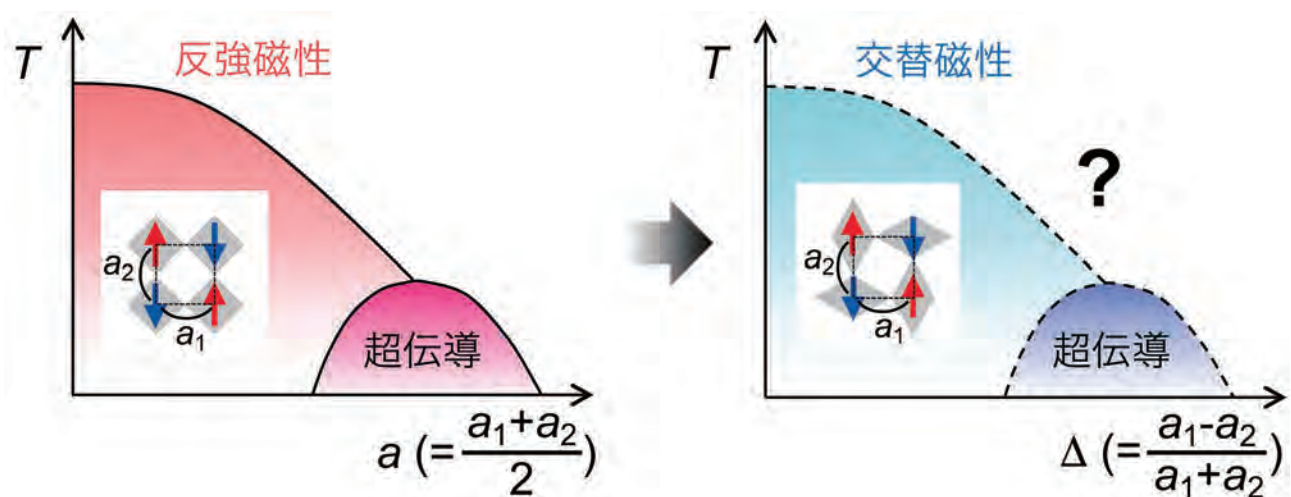
交替磁性揺らぎによる超伝導発現の実証

打田 正輝

東京工業大学 准教授

超伝導と磁性の関係については、長年にわたり様々な物質において研究が進められてきました。特に、強磁性秩序や反強磁性秩序が圧力等によって抑えられると、超伝導が発現する場合があります。これらの超伝導の多くは、磁気秩序温度が絶対零度に近づくにつれ発達する磁気揺らぎによって引き起こされる非従来型の超伝導であると考えられています。一方で、従来の強磁性・反強磁性とは異なる磁気秩序として、交替磁性の概念が注目を集め始めています。これは、マクロな磁化がないにも関わらず時間反転対称性が破れている磁気秩序状態の一種に過ぎませんが[1]、スピンの共線的に秩序化した単純な形で実現される点に特徴があります。例えば、交替磁性体では d 波的にスピン分裂したバンド分散が実現するため[2]、そこで引き起こされる超伝導も異方的な性質を示すと期待されます。

ルチル型酸化物 RuO_2 は、巨大なエピタキシャル歪みによる超伝導が発見され[3]、たまたま同時期に、交替磁性体のモデル物質であることが提案されました[4]。 RuO_2 の磁気秩序状態に関しては様々な実験結果が報告され始めているところですが、薄膜の場合には成長方位及び膜厚に応じて元のルチル型構造から対称性が低下した結晶構造が実現する点に注意が必要です。特に、(110)方向に成長された超伝導を示す RuO_2 薄膜では、薄膜特有の歪みによって対称性が低下し、らせん対称操作で結ばれた二種類のRuサイトの電子状態に強い非対称性(アシンメトリ)が生じていることがわかってきています[5]。本研究では、薄膜特有の歪みによってこの局所的なアシンメトリと超伝導相の変化の関係を明らかにし、さらには磁性相の変化をあわせて調べることで交替磁性揺らぎによる超伝導発現の実証を目指したいと思います。



- [1] T-h. Arima, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 013705 (2013)
- [2] M. Naka *et al.*, Nat. Commun. **10**, 4305 (2019)
- [3] M. Uchida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 147001 (2020)
- [4] L. Šmejkal *et al.*, Sci. Adv. **6**, eaaz8809 (2020)
- [5] C. A. Occhialini *et al.*, Phys. Rev. Mater. **6**, 084802 (2022)



らせん型結晶構造を持つ半導体Teにおける 磁場誘起リフシツ転移と非相反磁気抵抗

木俣 基

東北大学金属材料研究所 准教授

須藤 健太 東京大学物性研究所 博士研究員	柳 有起 富山県立大学 准教授	鈴木 通人 大阪公立大学 教授
小林 夏野 北海道大学電子科学研究所 教授	Kim-Khuong Huynh オーフス大学 博士研究員	谷垣 勝己 北京量子科学研究院 教授

本研究で対象とする単体Teは空間反転対称性が破れた、らせん型結晶構造を持つ半導体である（図1(a)）。またそのバンド構造もよく調べられているため、アシンメトリ量子物質の典型例の一つと考えられる。本稿ではTeにおける非相反磁気抵抗について、特に最近我々が見出した、低温、強磁場下における特異な振る舞いについて紹介する[1]。

らせん構造をもつTeはノンドーブでは0.3 eV程度のバンドギャップをもつ真正半導体であるが、不純物や欠損等により、多くの場合holeがドーブされた結晶が得られることが知られている。価電子帯の上部を拡大した模式図が図1(b)である。特徴はラクダ

のコブのようなふたコブのバンド構造であり、以下に説明するが、これがTeの非相反磁気抵抗の磁場依存性において重要な役割を果たしていることが今回明らかになった。またTeのフェルミ面の形状はキャリア密度に大きく依存し、キャリア密度が小さい（フェルミ準位が浅い）時には、図1(c)のように二つの小さなフェルミ面が存在し、キャリア密度が約 $6.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ よりも大きい時には二つのフェルミ面が一体となり、一つのダンベル型のフェルミ面になることが知られている。また、空間反転対称性の破れに起因して、フェルミ面上に波数に依存したスピン偏極（スピネクスチャ）が生じることが大きな特徴である。Teのスピネクスチャは、一般には波数に平行にスピンが放射状に偏極するラジアル型（またはヘッジホッグ型とも呼ばれる）である。ただしキャリアが少なく二つの小さなフェルミ面が存在するような領域では、 k_x および k_y 方向のスピン成分は小さく、 k_z 方向のみのスピン成分が優勢であることが知られている。

本研究で対象とする非相反磁気抵抗は、磁気抵抗が電流の極性に依存して異なる現象である。この現象は当初、物理的にねじれた構造をもつBiにおいて観測されたが[2]、近年になり、空間反転対称性を破る結晶構造を持つ物質においても観測されている[3]。このような物質では微視的なスピン偏極バンド

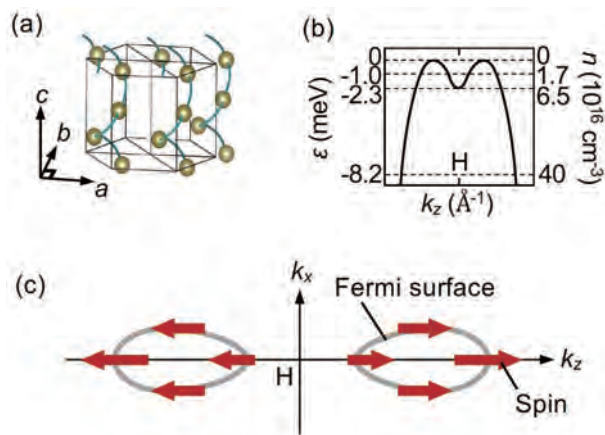


図1: (a)Teのらせん結晶構造、ならびに(b)H点近傍の価電子帯を拡大した模式図。図中の点線はキャリア密度とそれに対応するフェルミ準位を示す。(c)キャリア密度が $\sim 6.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ よりも小さい時のフェルミ面の模式図。二つの小さなフェルミ面が存在し、それぞれ互いに反対向きに k_z 方向にスピン偏極したスピネクスチャを持つ。

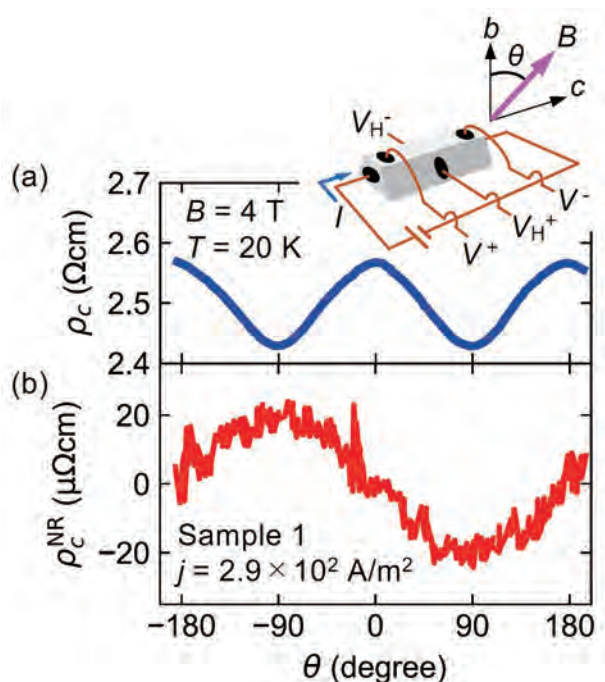


図2: 磁場4 T、温度20 Kにおける(a)磁気抵抗と、(b)非相反磁気抵抗の角度依存性。

構造に基づいて非相反伝導が生じることが特徴である。一般にスピン偏極したフェルミ面に磁場を印加すると、ゼーマン効果により、バンドが非対称に歪むと期待される。そのため、ある特定の方向のフェルミ速度が波数の符号に対して非対称となり伝導に非相反性が生じる。Teの場合、フェルミ面のスピン偏極方向はらせん軸(c軸)と平行であるため、c軸に磁場を印加した場合に、c軸方向の非相反伝導が極大となる。ちなみに、ラシュバ型のスピントクスチャではスピン偏極方向が波数と垂直のため、磁場と電流が垂直の時に非相反磁気抵抗が最大となる[3]。このように、非相反抵抗の大きさはフェルミ面のスピントクスチャと磁場方位によって決まる。したがって一般論ではあるが、結晶方位のさまざまな方向について非相反磁気抵抗の磁場角度依存性を測定することで、フェルミ面上のスピントクスチャ、さらにはその背後にある多極子秩序を実験的に特定することも可能と期待される。

本研究では全ての実験において、電流をc軸(らせん軸)方向に流して実験を行った。図2(a)は磁場をbc面内で回転した時の磁気抵抗の角度依存性を示している。印加磁場は4 T、温度は20 Kである。この図に

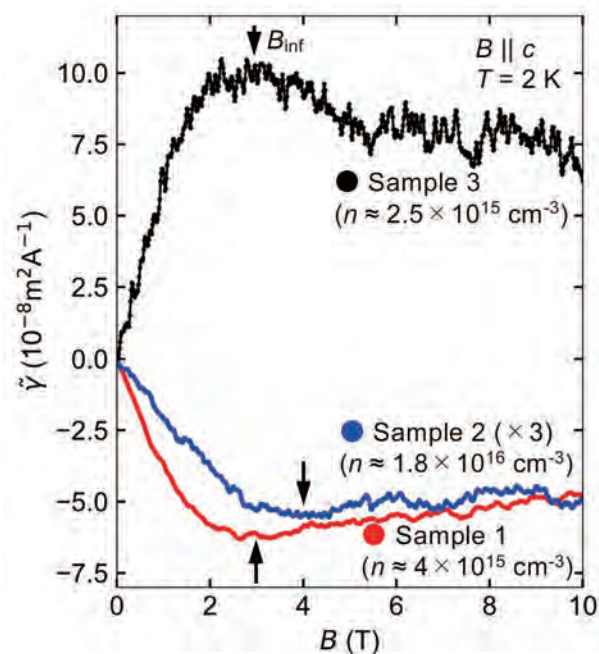


図3: キャリア密度の異なるいくつかのTe結晶における非相反磁気抵抗の磁場依存性。

あるように、電気抵抗は横磁気抵抗配置($B \perp I$)で大きく、縦磁気抵抗配置($B \parallel I$)で小さくなるという通常の磁気抵抗から期待される振る舞いを示している。一方、図2(b)に示すように非相反磁気抵抗は磁場がc軸と平行な $\pm 90^\circ$ で極値をとる。この振る舞いはc軸方向にスピン偏極したフェルミ面のスピントクスチャから期待されるものである。ここまではある意味予想通りの結果ではあるが、以下に、低温、かつ強磁場領域における非従来型の振る舞いについて紹介する。

図3にいくつかの結晶における非相反抵抗の磁場依存性を示す。測定温度は2 K、磁場方位は $B \parallel c$ である。図3には3つの異なる結晶の結果を示しているが、非相反抵抗の符号が異なるのは、結晶カイラリティの違いに起因するものと考えられる。

先述のように、非相反磁気抵抗はバンドの磁場による非対称な歪みにより生じるため、磁場が十分弱い極限ではフェルミ面の歪みも磁場に比例するため、その結果として生じる非相反抵抗も磁場に比例することが一般に知られていた。一方、実際のTeの非相反抵抗は2 T付近で飽和し、それ以上の磁場では減少するという予想外の結果を示した。この結果の起源はすぐ

にはわからなかったのであるが、SPRING-8実験の徹夜明けに解釈を思いつき、モデル計算を行ったところ、定性的には説明できそうだということが明らかになった[1]。そのモデルは図1(c)に示した二つの小さなフェルミ面のうちの一方がゼーマン効果によるバンドの歪みによって消失するもので、今回測定したTe結晶に不純物が少なく、キャリア密度が極めて小さいために現れていると考えられる。図4はTeの価電子バンドの磁場による変化を模式的に示したものである。ゼロ磁場では左図に示すように、互いに反対方向のスピンの偏極を持つ二つのフェルミ面が同じ面積で存在している。その状態に磁場を印加すると、片方のフェルミ面がゼーマン効果のため大きくなり、他方は小さくなると期待される。さらに磁場を印加すると、やがて一方のフェルミ面が消失するリフシツ転移が生じると期待される。リフシツ転移以上の磁場では、フェルミ準位は片方のスピン偏極バンドのみを横切るが、このバンドが磁場の印加でより先鋭化するため、バンドの左右非対称性が抑制され、磁場が増加するにもかかわらず非相反抵抗が減少する。また、フェルミ面がふたコブからひとコブに変化するリフシツ転移磁場はキャリア密度が大きくなる（フェルミ準位が深くなる）と高磁場にシフトすると考えられるが、実際キャリア密度の異なる結晶を測定した結果をみると、キャリア密度の多い結晶ほど非相反抵抗の飽和する磁場（図3中の矢印で示した非相反磁気抵抗の変曲点: B_{inf} ）が高磁場にシフトし

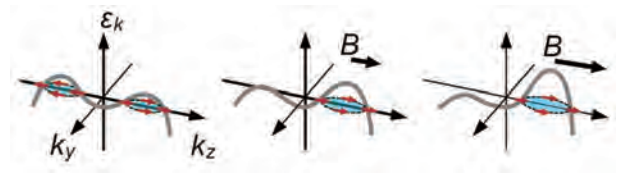


図4: Teのスピンの偏極バンドの磁場依存性を示した模式図。

ており予測と一致する。これらの結果は、今回観測されたTeの非相反磁気抵抗の高磁場での異常がスピン偏極したフェルミ面のリフシツ転移に起因することを示している。

上記のように、本研究ではらせん型結晶構造を持つ単体Teにおいて非相反磁気抵抗測定を行い、特に低温、強磁場領域において非相反抵抗が磁場増加に伴って飽和、抑制される非従来型の振る舞いを観測した。またこの振る舞いがスピン偏極したフェルミ面のリフシツ転移によって説明できることを見いだした。典型物質である単体Teの非相反磁気抵抗において、今回紹介した予想外の結果が観測されたことは、個人的には大変興味深いことであった。今後の本領域の研究によってさまざまな非自明な現象の観測と理解が進むことを期待しています。

[1] K. Sudo, Y. Yanagi, T. Takahashi, K.-K. Huynh, K. Tanigaki, K. Kobayashi, M.-T. Suzuki, and M. Kimata, Phys. Rev. B **108**, 125137 (2023).

[2] G. L. J. A. Rikken, J. Fölling, and P. Wyder, Phys. Rev. Lett. **87**, 236602 (2001).

[3] T. Ideue, K. Hamamoto, S. Koshikawa, M. Ezawa, S. Shimizu, Y. Kaneko, Y. Tokura, N. Nagaosa and Y. Iwasa, Nat. Phys. **13**, 578–583 (2017).



NbMnPで観測された 磁気トロイダル四極子と異常ホール効果

小手川 恒

神戸大学大学院理学研究科 准教授

物理的な応答現象が対称性によって支配されていることを示す好例として、反強磁性体における異常ホール効果が挙げられます。長らく強磁性体の磁化によって出現すると信じられてきた異常ホール効果は、近年ベリー曲率を通してバンド構造、及びその対称性から深く理解できるようになってきました。そうした流れの中で、 Mn_3Sn において反強磁性構造に由来する大きな異常ホール効果が観測され [1]、異常ホール効果は強磁性を許す磁気点群であれば反強磁性体であっても出現することが明らかになりました [2,3]。このことはホール伝導度が反対称テンソルであり、回転操作に対してスピンと同じ変換性を示すことから説明されます [3]。122ある磁気点群のうち、31の磁気点群がその条件を満たしますが、実際に類似の性質を示す物質は多くありません。最近、我々はNbMnPという物質で反強磁性構造由来の異常ホール効果を観測しました [4,5]。本稿ではNbMnPの磁気構造の対称性と異常ホール効果の実験結果について解説し、反強磁性構造由来の異常ホール効果の発生条件について整理したいと思います。

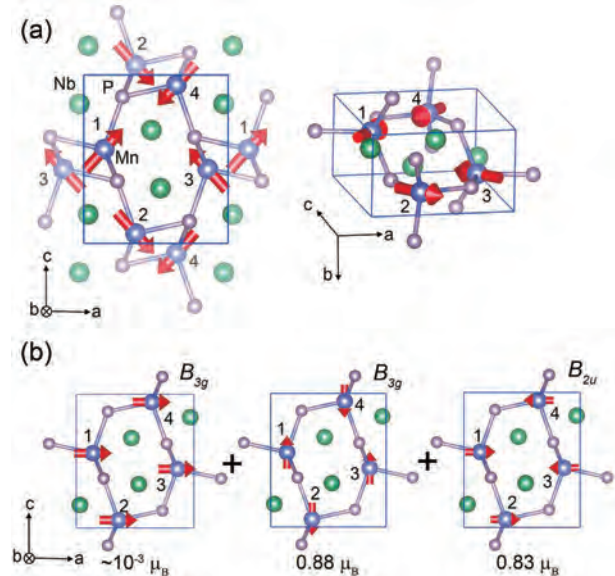


図1：(a) NbMnPのノンコリニア磁気構造。(b) 既約表現で分類した各成分。4つのMnサイトは結晶学的には等価。 B_{3g} は強磁性成分と反強磁性成分を許す。 B_{3g} の主成分である反強磁性構造(中央)は「磁気トロイダル四極子」と見なすことができる。 B_{2u} は反強磁性構造(右)であり、「磁気トロイダル双極子」、「磁気四極子」を含む。

磁気構造の対称性

NbMnPは空間群 $Pnma$ (点群 D_{2h}) の直方晶の物質です。結晶の存在自体は古くから知られていましたが、これまで物性報告はありませんでした。我々はジグザグ構造で発現する特異な磁性や超伝導の探索

IR	E	$2_1[100]$	$2_1[010]$	$2_1[001]$	i	$n[100]$	$m[010]$	$a[001]$	MPG
A_g	1	1	1	1	1	1	1	1	mmm
A_u	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	$m'm'm'$
B_{1g}	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	$m'm'm$
B_{1u}	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	mmm'
B_{2g}	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	$m'mm'$
B_{2u}	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	$mm'm$
B_{3g}	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	$mm'm'$
B_{3u}	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	$m'mm$

表1： $Pnma$ の $Q=0$ 秩序における既約表現 (IR)、及び対称操作との関係。磁気点群(MPG)も記す。

IR	Mn1 $(x, \frac{1}{4}, z)$	Mn2 $(-x + \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, z + \frac{1}{2})$	Mn3 $(-x, \frac{3}{4}, -z)$	Mn4 $(x + \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, -z + \frac{1}{2})$
A_g	$(0, u, 0)$	$(0, -u, 0)$	$(0, u, 0)$	$(0, -u, 0)$
A_u	$(u, 0, v)$	$(-u, 0, v)$	$(-u, 0, -v)$	$(u, 0, -v)$
B_{1g}	$(u, 0, v)$	$(-u, 0, v)$	$(u, 0, v)$	$(-u, 0, v)$
B_{1u}	$(0, u, 0)$	$(0, -u, 0)$	$(0, -u, 0)$	$(0, u, 0)$
B_{2g}	$(0, u, 0)$	$(0, u, 0)$	$(0, u, 0)$	$(0, u, 0)$
B_{2u}	$(u, 0, v)$	$(u, 0, -v)$	$(-u, 0, -v)$	$(-u, 0, v)$
B_{3g}	$(u, 0, v)$	$(u, 0, -v)$	$(u, 0, v)$	$(u, 0, -v)$
B_{3u}	$(0, u, 0)$	$(0, u, 0)$	$(0, -u, 0)$	$(0, -u, 0)$

表2：各既約表現に対する4つのMnサイト（4cサイト）で許される磁気モーメントの成分。 B_{3g} では容易軸がa軸の強磁性とc軸の反強磁性が許される。Mnサイトは反転中心位置になく、奇パリティ成分(添え字にuが入っているもの)では $\mathcal{PT}$ 対称性のために反強磁性構造のみが実現する。

という観点から、この物質の単結晶作製をself-flux法によって行い、 $T_N=233$ Kで反強磁性的な転移を示すことを明らかにしました [4]。実際にはMnあたり $10^{-3} \mu_B$ 程度の微弱な強磁性成分が存在します。中性子散乱実験から伝播ベクトル $Q=0$ のノンコリニア反強磁性秩序が実現しており、その磁気構造は図1に示すように既約表現 B_{2u} と B_{3g} の反強磁性構造の線形結合で表されることが分かりました [4]。その対称性を詳しく見るために、表1に空間群 $Pnma$ における既約表現と対称操作の関係を示します。これは点群 D_{2h} の指標表に部分並進を加えて $Pnma$ に対応させたものです。 $Q=0$ の場合はこの既約表現のどれか、もしくは複数の線形結合で磁気構造が表されます（複数の場合は対称性が $Pnma$ から落ちます）。8つある各々の対称操作に対して、磁気モーメントが磁性サイトと共にそのまま結ばれる場合は「1」、対称操作を加えた上で磁気モーメントの向きが反転するなら「-1」が対応し、その組み合わせで8つの既約表現が可能となります。NbMnPのMnサイトはWyckoff位置が4cであり、単位胞内に等価な4サイトが存在します。それぞれの既約表現はこの4つのMnサイトの磁気モーメントの向き、つまり磁気構造に制限を与えます（表2）。磁気モーメントが軸性ベクトルであることに注意すると、例えば B_{2g} （磁気点群 $m'm'$ ）で許される磁気構造はb軸方向の強磁性状態のみです。一

方で、NbMnPが示す B_{3g} ($mm'm'$) はa軸方向の強磁性成分とc軸方向の反強磁性成分を持つことが出来ます。つまり、このc軸方向の反強磁性構造はa軸方向の強磁性と同じ対称性を持つことを意味しており、異常ホール効果の起源となる対称性の破れを引き起こします。一方、 B_{2u} は反強磁性構造しか実現しません。これは $\mathcal{PT}$ 対称性によって反強磁性が保証されているためです。なお、表2のような既約表現と許される磁気モーメントの成分の対応関係はFullProf Suiteの中にあるBarlrepsというソフトなどで調べることが出来ます。

NbMnPの磁気構造をクラスター多極子で分類すると B_{3g} の反強磁性成分は「磁気トロイダル四極子」、 B_{2u} は「磁気トロイダル双極子」と「磁気四極子」となります。また、微弱な強磁性成分である「磁気双極子」はDzyaloshinskii-守谷(DM)相互作用によって「磁気トロイダル四極子」に付随して発生していると考えることが出来ます [5]。つまり図1のMn1-Mn4、もしくはMn2-Mn3の反強磁性ペアの間には反転中心が無く、それらの磁気モーメントが共に自発磁化が生じる向きに傾いていると理解することが出来ます。よって、強磁性成分が反転すれば「磁気トロイダル四極子」も反転しますので、外部磁場によって反強磁性ドメインの制御が可能となります。

異常ホール効果の観測

図2にNbMnPのホール効果測定の結果を示します。233 Kの転移温度以下でa軸方向の外部磁場に対してヒステリシスを伴うホール電圧が発生します。この外部磁場は微弱な強磁性成分とそれと結合した反強磁性成分を反転させるため、異常ホール効果の電圧も符号反転します。磁場によってドメインが整列していればゼロ磁場でも大きなホール効果が観測されます。そのホール抵抗率 ρ_{zy} の温度変化を見ると120 K程度にピークを持ち、最大で $2\mu\Omega\text{cm}$ 程度のホール抵抗率を生じます。内因性の異常ホール効果の場合、散逸に依らない異常ホール伝導度がバンド構造によって決定されるため、物理的に議論すべ

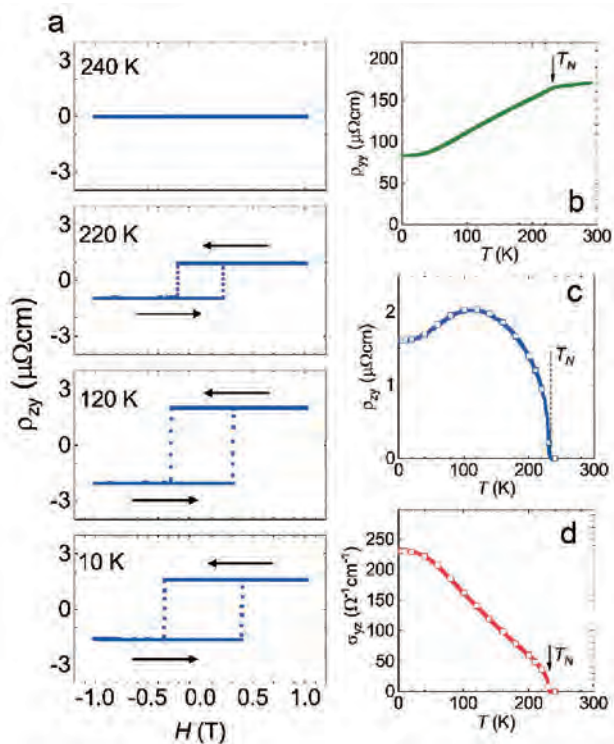


図2：(a) NbMnPの異常ホール効果。磁場による反強磁性ドメインの反転、及びホール電圧の符号反転が起こる。(b) 電気抵抗率、(c) ホール抵抗率、(d) ホール伝導度の温度依存性。

き重要な量はホール抵抗率ではなくホール伝導度です。ホール抵抗率とホール伝導度は以下の式で結ばれます。

$$\sigma_{yz} = \frac{\rho_{zy}}{\rho_{yy}\rho_{zz} - \rho_{yz}\rho_{zy}} \cong \frac{\rho_{zy}}{\rho_{yy}\rho_{zz}}$$

仮にホール伝導度が一定だとすると、ホール抵抗率は電気抵抗率の2乗に比例しますので、試料の電気抵抗率が大きいほど、つまり不純物や温度の影響で散乱が大きいほど観測されるホール抵抗率も大きくなります。(異常ホール効果が不純物由来という意味ではありません。) ρ_{zy} が120 Kという中途半端な温度でピークを持つのは電気抵抗率の温度依存性の影響のためであり、図2(c)に示すホール伝導度 σ_{yz} は低温に向けて単調に増加します。最低温で $\sigma_{yz} \cong 230\text{ }\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ という値が得られますが、これは Mn_3Sn ($\sim 140\text{ }\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$) [1]と Mn_3Ge ($\sim 370\text{ }\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$) [6]の中間程度の値となり、十分に大きな異常ホール伝導度が得

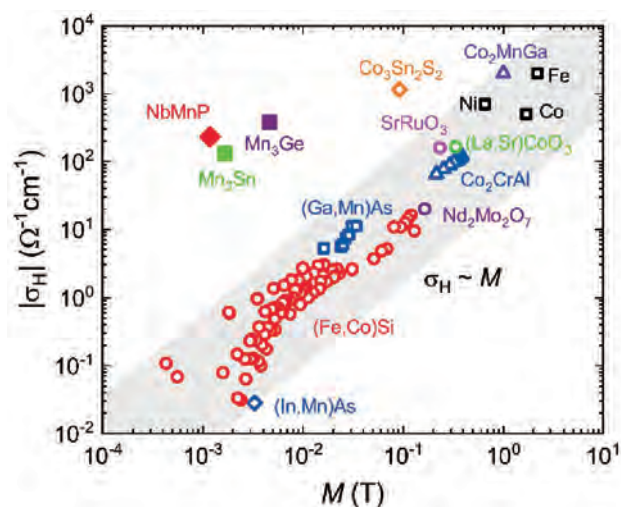


図3：様々な磁性体に対する異常ホール伝導度 σ_H と磁化の関係。強磁性体ではおおそ $\sigma_H \sim M$ の関係が成り立つのに対して [7]、反強磁性構造を起源とする物質では成り立たない [8]。

られていることが分かります。図3に様々な磁性体に対する磁化 (Tを単位とする) と異常ホール伝導度の関係を示します。open symbolで表されているのは強磁性体で、ホール伝導度がおおよそ磁化に比例する振舞いが確認されています [7]。closed symbolは磁化が微弱な「ほぼ反強磁性体」であり、明らかに大きなホール伝導度が磁化を起源としていない事が分かります [8]。

異常ホール伝導度の計算

内因性異常ホール効果はバンド計算を通して、そのホール伝導度を計算することが出来ます。異常ホール効果は電場印加によって発生した横方向の異常速度が起源です。これをベリー曲率で表すと、以下の式で表されます。

$$\sigma_{\alpha\beta} = -\frac{e^2}{\hbar} \int \frac{dk}{(2\pi)^3} \sum_n f[\varepsilon_n(\mathbf{k}) - \mu] \cdot \Omega_{n,\alpha\beta}(\mathbf{k})$$

$\Omega_{n,\alpha\beta}(\mathbf{k})$ がベリー曲率で、 n はバンドの指標、また $\alpha, \beta = x, y, z$ ($\alpha \neq \beta$)です。波数空間に分布する正負

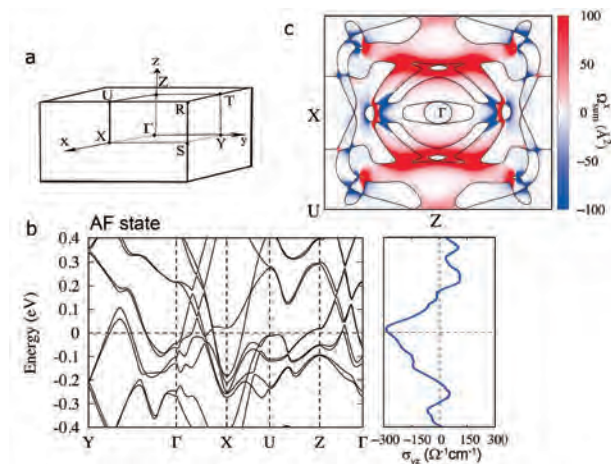


図4: NbMnPの反強磁性構造に対するバンド構造。波数空間におけるベリー曲率、異常ホール伝導度の計算。

のベリー曲率が積分された際にキャンセルしなければ異常ホール効果が発生します。図4に東北大学金研のV. T. N. Huyenさん、鈴木通人さんが行った計算結果を示します [5]。図4(b)が反強磁性状態に対するバンド構造、図4(c)が $k_y=0$ の面におけるバンド和をとった後のベリー曲率の分布です。ベリー曲率はフェルミエネルギーより十分低いところではバンド和によって正負の寄与が打ち消しあいます。また、エネルギー的に近いバンドがあると大きくなります。そのため、バンド和をとった際にはフェルミエネルギー付近のバンド分裂などが大きく寄与します。例えば、 Γ -Zの中間で大きな値が得られることになります。ただし、ワイル点のようなバンド縮退による局所的に大きな寄与は無く、波数空間に広がって大きなベリー曲率を得られています。図4(b)の右に異常ホール伝導度の化学ポテンシャル依存性を示しますが、NbMnPではフェルミエネルギー付近に最大値が来ており、大きな異常ホール伝導度が得られていることが分かりました。計算で得られた値 $273 \text{ } \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ は実験値 $230 \text{ } \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ と良い一致を示しており、NbMnPの異常ホール効果が内因性の機構で生じていることを裏付けています。

Mn₃Snとの比較

NbMnPではMn₃Snと類似の現象が起きていますので、現時点で分かっている比較を挙げておきます。

1. 六方晶と直方晶の違い

Mn₃Snは六方晶、NbMnPは直方晶という違いがあります。ただし、Mn₃Snは磁気秩序した時点で直方晶系に对称性が落ちており、その磁気点群

$m'mm'$ はNbMnPの $B3g$ 成分と同等です(NbMnPの $B3g$ は $mm'm'$) [9]。また、 Mn_3Sn は「磁気八極子」が秩序した系として知られていますが、磁気トロイダル多極子項を考慮すると「磁気トロイダル四極子」とみなせるため [3]、この点もNbMnPと同じです。元々の結晶系の違いが反映されている点として、ドメイン反転に必要な磁場の大きさが挙げられます。 Mn_3Sn は0.05 Tほどの磁場でドメイン反転が可能ですが、NbMnPでは0.3 Tと一桁ほど大きい磁場が必要です。この違いは六方晶と直方晶の磁気異方性に起因していると思われます。

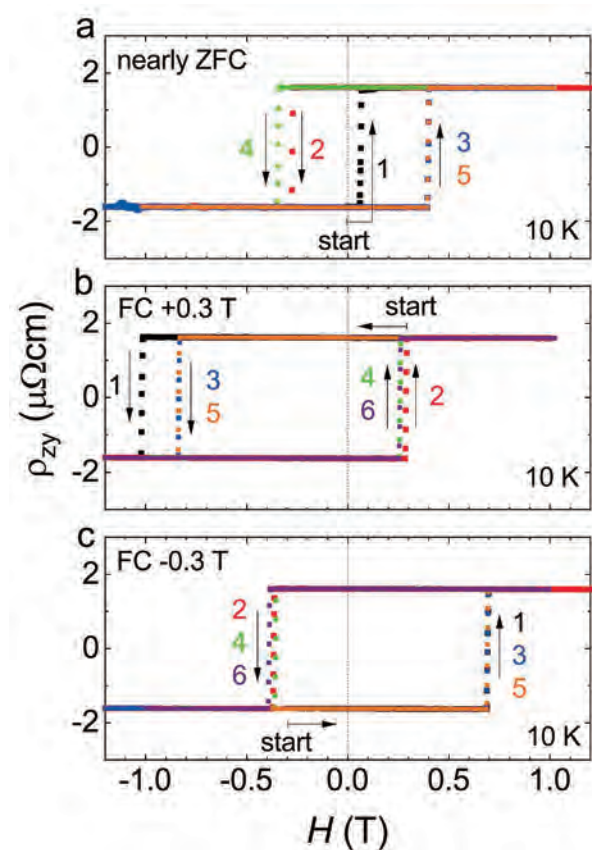


図5：NbMnPにおける交換バイアスに類似したヒステリシスの非対称性。磁場中冷却で現れる。番号は磁場掃引の順番。

2. 奇パリティ成分

NbMnPの磁気構造は異常ホール効果を出す B_{3g} に加えて奇パリティ成分である B_{2u} を含みます。これらの結合の結果、結晶系は $Pnma$ から $Pmn2_1$ に落ち、空間反転対称性も失います。 B_{2u} は「磁気トロイダル双極子」、「磁気四極子」を含みますので、交差相関、非相反電気伝導、パルス電流によるドメイン反転が観測される可能性があります。

3. 純良試料が作製可能

self-fluxで作製したNbMnPのRRRは2程度ですが、最近、Ga-fluxを用いて純良な結晶が作製できるようになりました(RRR=60程度)。純良試料に対する研究から、本稿で紹介したNbMnPの異常ホール効果が散逸に依らない内因性の機構で生じていることや、微小な自発磁化が試料の純良性に関係なく生じていることが分かりました [10]。今後、異常ネルンスト効果などの他の強磁性的な応答に対する不純物散乱の影響を詳細に調べることが出来ると期待できます。

4. 交換バイアス効果

NbMnPでは冷却過程の磁場印加によって図5に示すようにヒステリシスが非対称になることが分かっています [5]。これは磁場中冷却の過程で選択された反強磁性ドメインが、その安定性を保っているメモリー効果です。類似の効果は交換バイアスと呼ばれ強磁性・反強磁性の積層構造で出現しますが、単独の物質で現れる例は非常に珍しいと言えます。最近、強磁性体である $Co_3Sn_2S_2$ で報告例がありますが [11]、詳細な機構は良く分かっていません。

まとめ

本稿では反強磁性構造由来の大きな異常ホール効果を示すNbMnPについて紹介しました。NbMnPのノンコリニア磁気構造の中に「磁気トロイダル四極子」とみなせる反強磁性成分があり、自発磁化が微弱であるにもかかわらず、その「磁気トロイダル四極子」の対称性によって大きな異常ホール効果が発生することが分かりました。

改めて大きな異常ホール効果を示す反強磁性的物質が満たすべき条件を整理すると以下ようになります。1. 磁気構造が強磁性と反強磁性を共に許す3 1の磁気点群[2]に属した上で、強磁性成分がほぼ無いこと。2. さらにフェルミエネルギー付近にエネルギー的に近いバンドを多く持つなどしてベリー曲率の波数空間の積分値が大きくなっていること。

では、新規に類似の物質を見つける戦略はあるでしょうか？1の条件から磁気構造がMn₃Snのような120°構造である必要はなく、ノンコリニアである必要もないことが分かります。*PT*対称性があると該当しませんので、空間反転で結ばれる磁性サイト間に反強磁性相互作用が働く物質は避けなければいけません。磁気転移と共に微弱な自発磁化が発生していれば、条件を満たしている可能性があります。2の条件に関しては磁気秩序状態のバンド計算が必要

です。総合的に考えると、新しい類似物質を見つけるためには理論計算に頼ることがやはり効率的であると言えます。Huyenさん、鈴木さんの計算によるとNbMnPの安定磁気構造として B_{3g} の「磁気トロイダル四極子」が得られます。 B_{2u} が出てこない事は問題ではありますが、NbMnPに関しては、結晶構造の情報だけから理論計算を通して大きな異常ホール効果の予見は可能であったと言えます。磁気構造の計算は物質探索において有効的に使える状況になってきていると感じます。本学術変革研究領域では理論による設計を通じた機能性物質の創出をゴールに位置付けています。異常ホール効果などベリー曲率に関連した応答はかなりゴールに近づいていると思います。

(謝辞)

本研究は桑田祥希氏、新井祐樹氏、菅原仁氏、太田仁氏、櫻井敬博氏、藤秀樹氏(神戸大学)、松田雅昌氏、Depei Zhang氏、Qiang Zhang氏(オークリッジ国立研)、林純一氏、武田圭生氏(室蘭工科大)、Vu Thi Ngoc Huyen氏、鈴木通人氏(東北大学金研)との共同研究です。また、貴重な助言を頂いた柳瀬陽一氏(京都大)、播磨尚朝氏(神戸大)に感謝いたします。

[1] S. Nakatsuji *et al.*, Nature **527**, 212 (2015).

[2] 例えば L. Šmejkal *et al.*, Sci. Adv. **6**, eaaz8809 (2020)の Supplementary Materials.

[3] 鈴木通人 他、固体物理 **55**, 561 (2020).

[4] M. Matsuda *et al.*, Phys. Rev. B **104**, 174413 (2021).

[5] H. Kotegawa *et al.*, npj Quantum Mater. **8**, 56 (2023).

[6] N. Kiyohara *et al.*, Phys. Rev. Appli. **5**, 064009 (2016).

[7] N. Manyala *et al.*, Nat. Mater. **3**, 255 (2004).

[8] T. Chen *et al.*, Nat. Commun. **12**:572 (2021).

[9] M.-T. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 094406 (2017).

[10] Y. Arai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 063702 (2024).

[11] E. Lachman *et al.*, Nat. Commun. **11**:560 (2020).



極性—非極性構造相転移を示す トポロジカル半金属SrAuBiでの 新規超伝導の発見

高橋 英史

大阪大学大学院基礎工学研究科 講師

BCS理論で記述される従来型のs波超伝導では、フォノンを媒介として超伝導電子対（クーパー対）が形成されており、この電子対は時間反転対称性と空間反転対称性を持ちます。このため、これらの対称性を破る磁性や極性は、一般にs波超伝導と相容れない関係にあります。一方で、時空間反転対称性が破れた物質で実現する超伝導は、非従来型となることが期待されます。特に空間反転対称性が破れた系では、シングレットとトリプレットが混成した超伝導電子対の存在が提案されています[1,2]。また近年では、バンド構造に非自明な幾何学的性質を有するトポロジカル物質において、その特異な表面状態に起因した表面超伝導の可能性も指摘され、トポロジカル物質における超伝導探索が精力的に行われています[3,4]。本稿で取り上げる3元系化合物SrAuBiは、Srの2次元層とAu-Biのハニカム層が交互に積層した層状構造を持つトポロジカル半金属です。我々のグループではこの物質の単結晶合成に成功し、2.5 Kでの超伝導転移を初めて観測しました。さらにこの物質は、214 Kにおいてハニカム格子を形成するAuとBiイオンが面間方向に交互に変位する極性構造相転移を示す興味深い物質であることを明らかにしました[5]。本稿では詳しい紹介は省きますが、SrをEu変えたEuAuBiも、室温から極性構造を示し、2 K付近で超伝導転移が発現します。さらに、EuAuBiは4 KでEu²⁺のスピンの反強磁性転移を示し、超伝導と反強磁性が共存する大変珍しい系です[6]。

本研究で対象とした3元系材料XYZ (X: アルカリ土類金属や希土類金属、Y: 遷移金属、Z: 14、15属元素)は、Xのイオン半径とY+Zの金属結合半径の比に

よって様々な構造をもつことが知られています[7]。代表的なものにハーフホイッスラー型の構造が知られ、この構造をもつYPtBiでは $T_c = 0.77$ Kにおいて超伝導が観測されています[8]。このような多彩な構造の中で我々のグループでは、非極性構造であるZrBeSi型(図1右)と極性構造であるLiGaGe型(図1左)の構造の相境界に位置することが期待されるSrAuBiに注目しました。極性構造ではSrの2次元三角格子層に挟まれたハニカム格子が図1のように歪むことで面間方向に分極を持つ構造です。一方SrAuBiは半金属であり、強いスピン軌道相互作用と結晶の反転対称性の破れに起因して、バンド構造にラッシュバ型のスピン分裂が生じ、これが電気伝導や超伝導に影響を与える可能性があります。

SrAuBiの単結晶はBiフラックス法を用い、アルミナ坩堝に原料を入れ、石英管で真空封入し合成することで、最大で数mm角の大型単結晶を得ることに成功しました。図2にSPring-8 BL02B1の放射光を用いた単結晶X線回折の結果を示します。c軸長の温度依存性において、214 K付近から傾きの変化が見られます。さらに詳細な解析から、214 K以下でハニ

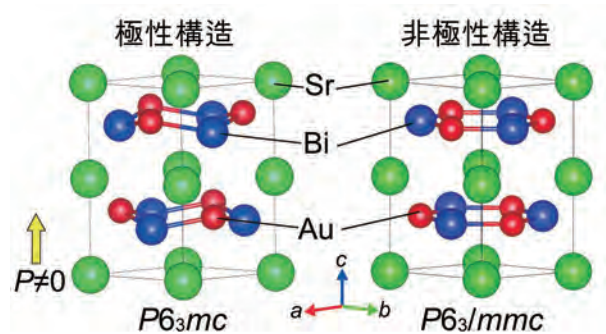


図1: (a)SrAuBiの結晶構造。左が214 K以下での極性構造、右が214 K以上の非極性構造

カム格子を構成するAuとBiの原子位置がz軸(c軸)の上下方向に変位し、非極性構造から極性構造へ相転移していることが明らかとなりました。

図3に電気抵抗率と磁化率の温度依存性を示します。電気抵抗率の温度依存性は金属的な振る舞いを示し、214 K付近に構造相転移に伴う異常が見られます。さらに低温2.5 K付近において超伝導転移が観測されました。この超伝導転移により磁化率にも、マイスナー効果が観測されました。一方で、マイスナー効果を測定したときの磁場は0.008 mT程度と大変小さく、0.1 mTの弱磁場でマイスナー効果が消失してしまいます。このことから、極めて弱い磁場で完全反磁性を示さなくなると考えられます。このような、弱磁場でのマイスナー効果の消失は類似物質であるYPtBiにおいても報告され、半金属的な電子構造による極めて小さい状態密度に起因すると議論されています[9]。実際、低温の比熱測定からSrAuBiの電子比熱係数は0.8 mJ/molK²程度と見積もられます[5]。

次に、面間磁場($H//c$)と面内磁場($H//ab$)での電気抵抗率の測定から作成した、超伝導臨界磁場の温度依存性を図4(c)(d)に示します。面間磁場下における最低温の超伝導臨界磁場は、5 Tと比較的大きな値を示します。この臨界磁場はBCS理論で予想される臨界磁場である $H_p = 4.5$ T($T_c = 2.5$ K)を超えており、特殊な超伝導状態の実現を示唆しています。さらに面内磁場の場合には、臨界磁場は4 T程度と小さな異方性を示します。一般的な2次元系の材料では、面間磁場での超伝導臨界磁場は面内磁場に比べ小さく、SrAuBiとは対照的な振る舞いを持つため、

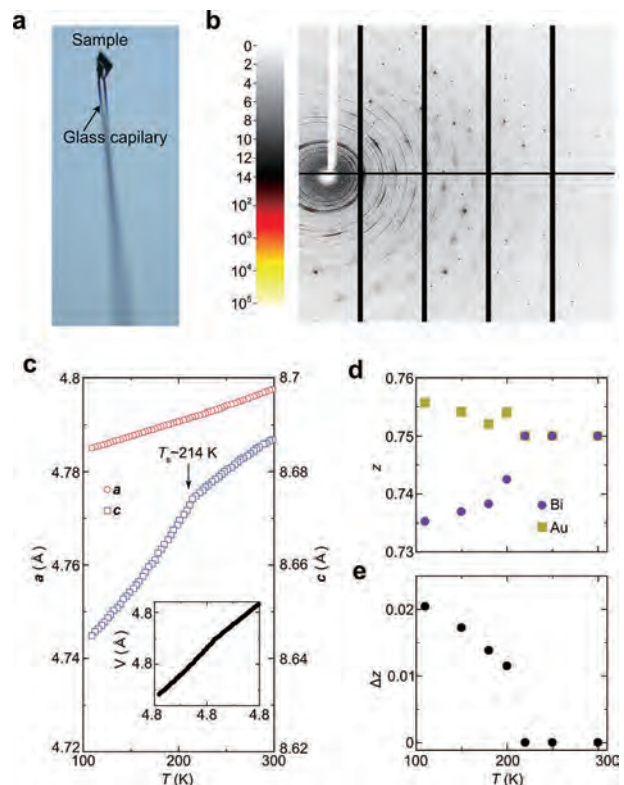


図2: (a) 単結晶X線写真。(b) X線回折結果。(c) 格子定数の温度依存性。(d) BiとAuのz方向の原子位置と(e) その差の温度依存性。

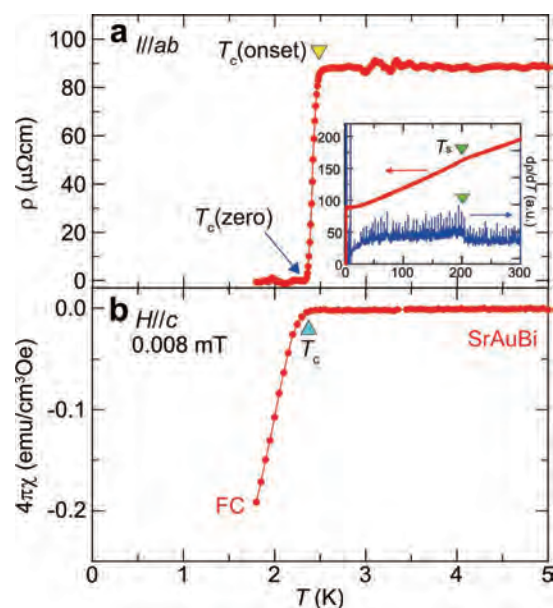


図3: (a) 電気抵抗率の温度依存性。(b) 磁化率の温度依存性(マイスナー効果の測定)。

SrAuBiでは一般的な2次元超伝導とは異なる特殊な超伝導状態が実現していることが示唆されます。

この特異な超伝導特性の起源を探るため、極性構造での第一原理によるバンド計算を行いました。図5aにスピン軌道相互作用を考慮した場合(赤線)と考慮しない場合(黒線)でのバンド分散と状態密度の結果を示します。フェルミエネルギー近傍では、状態密度が小さく、半金属的なバンド構造が実現しており、電子比熱係数が小さいという比熱の結果と整合します。さらに Γ 点付近では、スピン軌道相互作用を考慮しない場合、 Γ -M方向(面内方向)のフェルミ面付近にディラック的なバンド分散が存在します。そして、このディラック点はスピン軌道相互作用を考慮することでギャップが開き、極性構造に由来したラシュバ的なスピン分裂が生じます(図5b)。一方で面間方向である Γ -A方向でもスピン軌道相互作用を考慮しない場合にA点でディラック点が存在します。このディラック点は、スピン軌道相互作用を考慮した場合でもc軸周りの回転対称性により保護されるためギャップが開きません(図5c)。このようなラシュバ型のスピン分裂したバンド構造やディラック的なバンド構造に由来した、特異な超伝導が実現している可能性があります。さらに、 Γ 点近傍のバンドはBiのp軌道とAuのs軌道の混成によるバンド反転に起因したトポロジカルなバンド構造が期待されます。そのため、トポロジカルなバンド構造に由来した表面バンドによる超伝導の可能性も秘めています。実際にこの物質の超伝導は試料表面の状態に敏感であり、目の細かいラッピングフィルムで表面を磨くことで転移温度が変化します。また超伝導臨界電流の厚み依

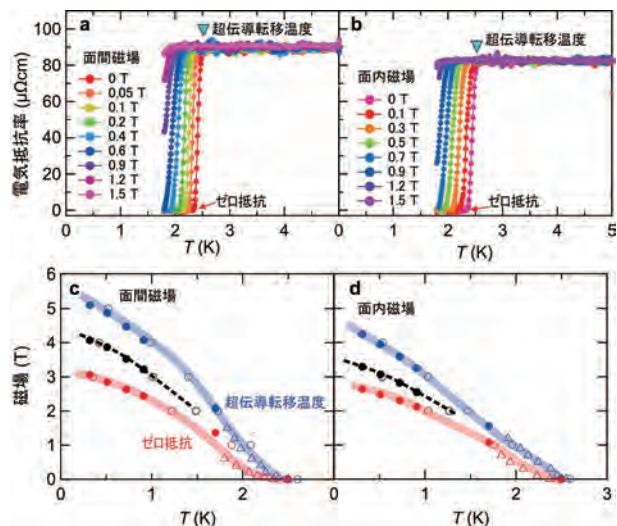


図4: (a)面間磁場と(b)面内磁場での低温での電気抵抗率の温度依存性。(c)面間磁場と(d)面内磁場での臨界磁場の温度依存性。

存性から表面超伝導の可能性が示唆されました[5]。

以上のようにこの系では、極性構造と超伝導が共存する大変珍しい物質であり、トポロジカルなバンド構造をもつため、表面超伝導の実現や、バルク超伝導と表面超伝導の共存の可能性があります。さらに、類似系のYPtBiでは、強いスピン軌道相互作用と反転対称性が破れた結晶構造に由来して、トリプレットを越えた、クインテットやセプテットといった特殊な超伝導対称性が期待されており[10]、SrAuBiでも同様な超伝導対称性が実現している可能性があります。

本研究では、極性構造を持つトポロジカル半金属SrAuBiにおいて、特異な超伝導が生じることを初めて明らかにし、その特異性を大きなスピン軌道相互作用を考慮したバンド構造に基づいて議論しました。さらに本稿では省略しましたが、Srを磁性イオンであるEuに変えたEuAuBiでも超伝導が生じることが明らかになっており、極性構造と磁性に由来した、新

しい外場応答を示す超伝導スピントロニクス材料への展開も期待されます。ただし、これらの系の超伝導とトポロジカル表面状態や極性構造の詳細な関係性は明らかになっておらず、今後の研究の進展が期待されます。

謝辞

本研究は大阪大学の石渡晋太郎教授、佐々木友博氏、高橋優之氏、メイヨーアレックス浩氏、小野瀬雅穂氏、岡山大学の秋葉和人助教、小林達生教授、名古屋大学の中埜彰人助教との共同研究によるものです。この研究は日本学術振興会科学研究費助成事業 (No. JP20K03802、JP21H01030、JP22H00343、JP23H04871、JP23H04868)、公益財団法人高輝度光科学研究センター (Proposal No. 2021B1198、2022A1158)の支援を受け実施されました。

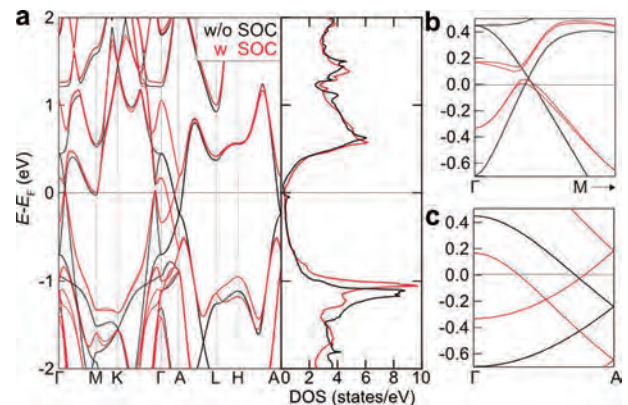


図5: (a) スピン軌道相互作用を考慮した場合 (赤線) と考慮しない場合 (黒線) でのバンド計算結果。 (b) Γ -M 方向 (面内方向) での拡大図。スピン軌道相互作用を考慮することでフェルミ面近傍のディラック的なバンドにギャップが開き、さらに極性構造を反映してラッシュバ型の分裂が見られる。 (c) Γ -A 方向 (面間方向) での拡大図。スピン軌道相互作用を考慮した場合でもフェルミ面近傍にディラック的なバンド構造が存在する。

- [1] E. Bauer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 027003 (2004).
- [2] M. Smidman *et al.*, Rep. Prog. Phys. **80**, 036501 (2017).
- [3] M. Sato and Y. Ando Rep. Prog. Phys. **80**, 076501 (2017).
- [4] M. Alidoust *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 155124 (2017).
- [5] H. Takahashi *et al.*, npj Quantum Materials **8**, 77 (2023)
- [6] H. Takahashi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 013701 (2023).
- [7] L.S. Xie *et al.*, Solid State Sciences **30**, 6 (2014).
- [8] N. P. Butch *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 220504 (2011).
- [9] T. V. Bay *et al.*, Solid State Commun. **183**, 13 (2014).
- [10] H. Kim, *et al.*, Sci Adv **4**, eaao4513 (2018).



遍歴磁性体UCoAlの臨界終点近傍に現れる 不思議な弾性異常

吉澤 正人

岩手大学理工学部 客員教授

水や炭酸の臨界終点 (CEP: Critical Endpoint) 近傍には、気相と液相が渾然一体となる超臨界状態が出現する。この不思議な状態は、材料の洗浄、コーヒーからのカフェインの除去という工業的応用から、生命の起源に関係する有機物合成の舞台、素粒子物理学におけるハドロン・クォーク相転移など、多様な分野で人々の関心を引きつけてきた[1,2]。

物性物理においては、磁気系でも気液系と同様の臨界終点が見られることが知られている。図(a)は、温度、圧力、磁場の関数として、三重臨界点(TCP)を起点とした磁気系の相図である。図のCEP wing [その形状からButterflyとも呼ばれる] 上の各点が磁氣的臨界終点である。気液系では圧力を体積で微分した物理量に相当する弾性率は臨界終点で極小、その逆数である圧縮率が極大となる。磁氣的臨界終点では、気液系における圧力と体積を磁気系の磁場と磁化にそれぞれ置き換えると、対応する物理量である磁化率が増大する。本稿では、遍歴磁性体UCoAlで発見された臨界終点の不思議な性質を紹介したい[3,4]。

UCoAlは常磁性体であるが、元素置換や小さな一軸圧により強磁性状態に移るので、量子臨界点や三重臨界点の近くに位置する物質と考えられている。 c 軸方向に磁場を印加すると、低温では約0.6 T近傍でメタ磁性転移が観測される。この転移は温度の上昇と共に高い磁場に移行し、転移での磁化の不連続も小さくなり、10 K、0.9 Tで臨界終点に到る。古くから多くの優れた研究によって物性も明らかにされてきたが[5]、近年、NMRによって磁気モーメントの縦揺らぎの存在が報告され、その特異な性質が注目されている[6, 7]。

気液の臨界終点近傍の弾性的性質は詳しく調べられているのに対し、磁性の臨界終点での弾性的性質は明らかではなかった。本研究では、UCoAlの c 方向の縦波弾性定数 C_{33} の測定を主に行った。この弾性モードに着目した理由は、臨界終点では対称性の変化が起こらないので、対称性の変化を検知する横波弾性定数よりも、六方晶の対称性を保存するこの縦波弾性定数にその特徴が見れるのではないかと予想と、NMRによって観測された磁気モーメントの縦揺らぎが、この弾性モードに見れるのではないかという期待からである。図(b)には、温度と磁場の関数として C_{33} を表示した。低温でのメタ磁性転移での小さな異常は、臨界終点に近づくにつれて増大し、臨界終点ではあたかも特異点のような振る舞いが出現する。 C_{33} のプロブである ε_{zz} は c 方向の縦歪 (図(b)) であるので、 C_{33} の異常はNMRで報告された揺らぎと関連した現象であると考えられる。

超音波測定では、物質中を伝搬する音波の速度から弾性定数を、減衰の様子から超音波吸収係数が求められる。弾性歪は電氣的四極子と同じ対称性を有するので、弾性定数は電氣的四極子の揺らぎ (四極子感受率) の反映である。図(c)に示すように、今回の研究で得られた弾性異常の臨界指数は1であり、磁歪結合を通じた磁性の随伴効果では説明できない。磁性に加えて四極子の揺らぎがこの物質に起きていると考えられる。その起源として、ネマティック機構、軌道由来の磁気モーメント、この物質のウランのサイトが空間反転対称性を持たないことに起因する効果などが考えられ、本学術変革領域の研究と大いに関連する。

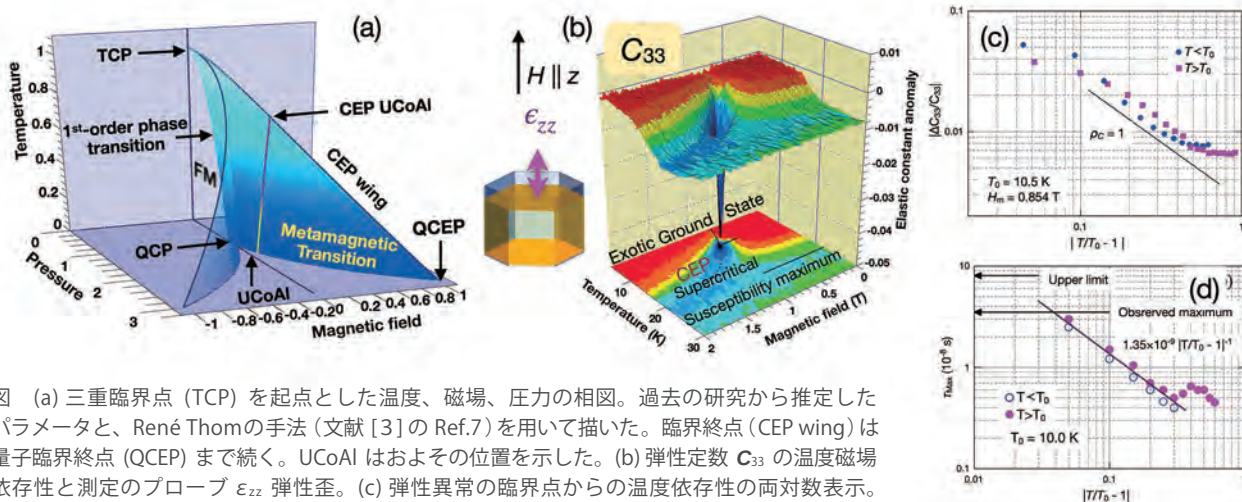


図 (a) 三重臨界点 (TCP) を起点とした温度、磁場、圧力の相図。過去の研究から推定したパラメータと、René Thomの手法 (文献 [3] の Ref.7) を用いて描いた。臨界終点 (CEP wing) は量子臨界終点 (QCEP) まで続く。UCoAl はおよその位置を示した。(b) 弾性定数 C_{33} の温度磁場依存性と測定のプロブ ϵ_{zz} 弾性歪。(c) 弾性異常の臨界点からの温度依存性の両対数表示。臨界指数は 1 である。(d) 緩和時間の両対数表示。緩和時間の臨界指数も 1 である。図は文献 [3] と [4] から転載した。

本研究では、 C_{33} に極めて強い周波数依存性 (超音波分散) が出現することが発見された。臨界終点での弾性異常は、測定周波数 12 MHz では約 5%、34 MHz では約 1 % と周波数の増加と共に小さくなり、106 MHz では痕跡しか残らないほどになった。実験から観測された臨界緩和時間は臨界終点に向かって 3.5×10^{-8} 秒にまで増大する (図 (d))。この緩和時間の値はこれまで固体で観測された中で最も長く、固体というよりは、むしろ、液体や液晶のスケールに近い。この超音波分散の機構は明らかではないが、三重臨界点近傍の普遍的な現象ではないかと考えている。三重臨界現象を生み出すモデルとして有名なスピン 1 イジングモデルでは、スピン ± 1 と 0 の状態を考える [8]。高温では ± 1 のスピン状態が安定ではあるが、低温になるに従い、スピン 0 の状態が安定となる。この 2 つの状態の競合が三重臨界現象を生み出す。2 つの状態の移行は磁化率の極大などのクロスオーバー現象として観測される。低温におけるこの 2 つのスピン状態の共存と競合が極めて長い緩和時間の機序ではないかと考えている。ちなみに、

計算ではあるが、UCoAl では緩和時間が 8×10^{-8} 秒 (図 (d) の Upper limit) より長くなると、静的弾性定数は 0 となり結晶の安定性は崩壊する。

三重臨界点近傍に位置する UGe₂ や URhGe では超伝導が発現する [9]。UCoAl で明らかになったスピンと四極子の多重な揺らぎや長い緩和時間は、超伝導の発現やその他の興味深い現象とどのように関係するのだろうか? さまざまな興味は尽きない。さて、今回発見された臨界終点での不思議な弾性的性質は、UCoAl の特殊性に起因している部分もあるとはいえ、一般の臨界終点の普遍性に関係した効果もあるのだろうか? さまざまな分野の交流により臨界終点の物理とその理解が深まることを期待したい。

謝辞 本稿で紹介した研究成果は、東北大学・清水悠晴、本間佳哉、仲村 愛、青木 大、九州大学・本多史憲、岩手大学・中西良樹各氏との共同研究です。最後に、本執筆の機会を与えてくださった編集委員の皆様にご心より感謝します。

[1] T. Shibuya and K. Takai, Prog Earth Planet Sci. **9**, 60 (2022).
 [2] 浅川正之, 日本物理学会誌, **74**, 360 (2019).
 [3] M. Yoshizawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 104603 (2023).
 [4] M. Yoshizawa, JPS Hot Topics **3**, 037.
 [5] T. Combier, Dr. Thesis, University Grenoble (2016) と [3] の文献を参照。

[6] H. Nohara *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 093707 (2011).
 [7] K. Karube *et al.*, Phys. Rev. B **91**, 075131 (2015).
 [8] [3] の文献 22, 31, 40 – 45 を参照。
 [9] D. Aoki *et al.*, Phys. Soc. Jpn. **88**, 022001 (2019).



ユーロピウム化合物の研究と 結晶育成の挑戦

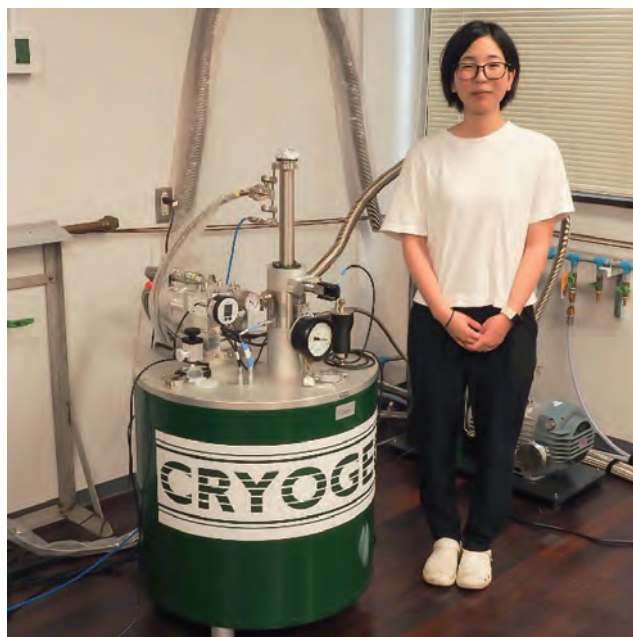
比嘉 野乃花

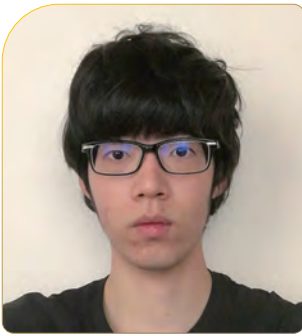
広島大学大学院先進理工系科学研究科 特任助教

広島大学の比嘉と申します。特徴的な苗字なのでよく聞かれますが、生まれも育ちも沖縄で、日本の村の中で一番人口の多い読谷村出身です。博士課程では、希土類元素ユーロピウム (Eu) を含む化合物に対して核磁気共鳴法 (NMR) を用いた研究を行い、琉球大学にて学位を取得しました。その後、原子力研究開発機構 (JAEA) に博士研究員となり、翌年に広島大学の助教として採用されました。現在は、広島大学でアシンメトリ量子C01班の特任助教をしています。博士課程在籍時には中城村(人口3位の村)に住んでおり、JAEAは東海村(人口2位の村)でしたので、意図せず人口の多い村トップスリーに居住していたようです。

わたしはこれまでEu化合物を多く研究対象としてしました。Euは化合物中で、大きな有効磁気モーメント ($\mu_{\text{eff}} = 7.94 \mu_B$) を持つ2価($4f^7, S=7/2, L=0, J=7/2$)と非磁性の3価($4f^6, S=L=3, J=0$)、2価と3価の間の中間価数状態をとります。磁性—非磁性間でゆらぐのはCeやYbと同様です。しかし、非磁性の3価のEuはスピン軌道結合でモーメントが消失したように見えるだけで、実際にはスピン磁気モーメントも軌道磁気モーメントも存在しているという部分で異なり、複数個のf電子が絡むため、CeやYb化合物と異なる物性が期待できます。また、磁気的な2価においても、磁場中でスキルミオンとなるEuPtSiをはじめとして、複雑な磁気構造をもつ物質が多数報告されています。わたしはこれまで、中間価数状態のEuNi₂P₂や非磁性のEuCo₂Si₂、磁気的なEuPtSiやEuCo₂P₂などをNMRを用いて研究してきましたが、今後も精力的に研究を進めていきたいと思います。

広島大学に赴任してからは比熱や磁化等の物性測定をメインで行いながら、結晶育成も始めています。はじめはキラルな結晶構造をもつYbNi₃Al₉の中性子実験用の大きな試料を育成することが目的でしたが、キラルな構造の右巻き・左巻きの作りわけにもチャレンジしてみたり、そのほかのYb化合物の探索もあわせて行ったりしています。結晶育成への興味の根底は、近くは大貫先生がいらしたことはもちろんのこと、学生時代の「大洗夏の学校」での実習や、J-Physics主催の「ものづくり学校」での学びがあったからに思えます。様々な経験を積む機会や支援をいただいていたことに、改めて感謝しております。また、作った試料の物性評価をするため、共用機器として導入された「無冷媒低温材料物性自動測定システム (CFMS)」の管理もしています。今後、さまざまな測定ができるように、整備を進めています。アシンメトリ量子のホームページやYoutubeに掲載されていますので詳細は省きますが、測定はオンラインで実施も可能ですので、ぜひ共用機器としての利用をお願いします！





奇周波数クーパー対から 多極子が織りなす物理へ

佐藤 匠

北海道大学大学院理学研究院 博士研究員

2024年度からB01班の博士研究員としてお世話になります、北海道大学の佐藤匠と申します。どうぞよろしくお願いいたします。

私は大学院生であった昨年度まで北海道大学工学部で超伝導現象に関する研究を行ってきました。超伝導に関する研究といってもいろいろありますが、私はこれまで主に奇周波数クーパー対というものに関して理論研究を行ってきました。

クーパー対はペア相関関数と呼ばれるもので記述されますが、だいたいの超伝導/超流動を担うクーパー対のペア相関関数はスピン一重項偶パリティかスピン三重項奇パリティの対称性を持っています。電子はフェルミ統計に従うために、上の二つ以外のクーパー対は存在できそうにありませんが、電子の時間自由度を考慮するとスピン一重項奇パリティやスピン三重項偶パリティのクーパー対が存在しても良いこととなります(表1)。これらのクーパー対は、ペア相関関数が

	Frequency	Spin	Parity
ESE state	Even- ω	Singlet	Even
ETO state	Even- ω	Triplet	Odd
OSO state	Odd-ω	Singlet	Odd
OTE state	Odd-ω	Triplet	Even

表1: クーパー対の分類。第一列のESE, ETO, OSO, OTEはそれぞれ偶周波数スピン一重項偶パリティ、偶周波数スピン三重項奇パリティ、奇周波数スピン一重項奇パリティ、奇周波数スピン三重項偶パリティを表す。

周波数に対して奇の対称性を持ちます。これが奇周波数クーパー対です。奇周波数クーパー対は同時刻の電子が対を組まないというなんとも奇妙な電子対ですが、私はこの奇妙なクーパー対が引き起こす物理に強い魅力を感じ、これまで研究を行ってきました。奇周波数クーパー対は多くの人にとってなじみのない研究対象かもしれませんが、しかし実は多くの場合において、奇周波数対称性をもつペア相関関数は超伝導平均場理論の基礎方程式であるゴルフコフ方程式の解の一部を構成しています。これまでの研究で、奇周波数クーパー対とは、超伝導現象を合理的、統一的に理解するために有用な物理描像の一つであるということがわかりました。(ここで誤解のないように記しておきますが、私が研究対象としていたのは奇周波数「超伝導秩序」ではなく、奇周波数「対相関」です。)

さて、本学術変革領域研究で重要となるのは、電子系などにおける複合自由度によって生じる非対称性(アシンメトリ)です。この複合自由度の系統的な記述には、四つの多極子自由度(電気多極子、磁気多極子、磁気トロイダル多極子、電気トロイダル多極子)が適しています。物理現象を合理的かつ見通し良く記述できるという点では、私がこれまで主に調べてきた「奇周波数クーパー対」と本研究領域の「多極子自由度」は、対象とするものの違いこそあれ、共通点がある気がしています。学ぶべきことは多いですが、新しい研究対象にわくわくしながら研究を進めている毎日です。このような大きな研究コミュニティで活動させてもらえることに感謝しつつ、いろいろなことに挑戦していきたいと考えております。これからどうぞよろしくお願いいたします。



多極子と私～自己紹介に代えて

桐越 研光

岡山大学異分野基礎科学研究所 助教（特任）

2024年4月より本学術領域の研究員として、岡山大学異分野基礎科学研究所のJeschke・大槻研究室に在籍しています。自己紹介を兼ねて、これまでの研究および現在進行している研究について述べます。

私は2022年3月に北海道大学で学位を取得した翌年度から2年間、現在北海道大学に在籍されている速水賢准教授の下で研究員として研究に従事していました[1]。J-Physicsの時代から「多極子」の概念に興味を持っていたのですが、私自身が実際に多極子の研究を始めたのはこのときが初めてとなります。速水研では非共線型の磁気秩序やフェロアキシャル秩序の下で生じる交差相関応答の研究を行いました。前者は磁気トロイダル双極子や磁気四極子のような奇パリティの磁気多極子が活性化系で、その下では量子計量に起因した内因性非線形Hall効果(INHE)が生じます。INHEは反強磁性金属のNéelベクトルの方向を特定する応答現象としてスピントロニクス分野でも注目を集めており、我々はこの応答現象に対する微視的理論の構築を行いました[2]。他方、後者のフェロアキシャル秩序は電気トロイダル双極子の強制的秩序とみなすことが出来ませんが、この秩序は空間反転及び時間反転の対称性を破らないため、電磁場とは直接結合しません。しかし、電気トロイダル双極子は鏡映対称性を破る軸性ベクトルであるため、従来の強制的秩序とは異なる応答現象を示すことが期待されます。我々は、フェロアキシャル秩序に特有の応答現象として二次の非線形磁気歪みを調べ、この秩序を実験的に特定する方法を提案しました[3]。その他、多極子基底による超伝導状態の分類に関する研究も行っていました[4]。

速水研では主に、「対称性」に立脚して多極子に関わる研究をしてきました。他方、今年度より在籍している大槻研では現実物質を対象として、「第一原理計算」と「多体効果」に基づいて多極子研究を進めています。

現在我々が取り組んでいるテーマの一つは、希土類化合物 HoAgGe の交差相関応答です。この物質は4f電子を持つ Ho^{3+} イオンが擬カゴメ格子を形成しており、低温で中間相の部分秩序状態と低温相のスピンアイス状態という二つの異なる磁気秩序を示します。拡張多極子の観点から、どちらも有限qの磁気トロイダル双極子秩序とみなされるため、この磁気秩序の下では二次の非線形電気伝導が生じると考えられます。我々は、第一原理計算に4f電子の局在性から生じる相関効果を取り込むことで非線形電気伝導を定量的に評価し、各々の磁気秩序における応答現象の振る舞いを多極子の観点から微視的に理解することを目指して研究に取り組んでいます。

今後も「対称性」・「第一原理計算」・「多体効果」をキーワードに多極子秩序下における交差相関応答の研究を進めてまいります。実験グループの皆様とは、モデル計算・第一原理計算を問わず、共同で研究が出来れば幸いです。よろしくお願いいたします。

[1] 私が研究員として配属された当初、速水さんは東大に在籍されていたため私も東京に引っ越したのですが、配属した年の6月に北大に移動されたため、2ヶ月後にまた北大に戻る形になりました。

[2] A. Kirikoshi and S. Hayami, Phys. Rev. B **107**, 155109 (2023).

[3] A. Kirikoshi and S. Hayami, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 123703 (2023).

[4] A. Kirikoshi and S. Hayami, Phys. Rev. B **109**, 174510 (2024).



APS March Meeting 2024

小林 夏野

北海道大学電子科学研究所 教授

2024年3月4-8日にミネソタ州ミネアポリスで行われた American Physical Society (APS) March meeting 2024に参加しました。2020年の結局キャンセルになったDenverでのAPS March meeting 以来の参加だったので、懐かしさと驚きであつという間の一週間でした。

APS March meetingは多くのセッションがあり、興味がある発表をうまく見つけて時間が重ならないように組み立てるのが難しい会議です。今回初めてちゃんとAPSで提供されている会議用のアプリを使ってみたのですが、とても便利でした。ただしアプリで時間と場所が管理できても、広い会場で移動に思ったより時間がかかりセッションによってずれた時間と合わせて、着いてみたら聞こうと思っていた発表が終わっているなどのMarch meetingらしい経験は相変わらずでした。

個人的な印象ですが最後に参加した2019年March meetingと比べるとセッションの構成が変化してきているようでした。人気のトピックをセッション数として見ただけなので大まかな印象ではあるのですが、圧倒的に人気のあるトピックはなく、これまで人気だったトピックを中心とした複数のセッションが存在しているように見えました。例えば、鉄系超伝導体、 UTe_2 、 AV_3Sb_5 など、人気のある物質で複数のセッションが組まれているけれども、新しく研究が盛んになって進んだ物質・概念はなさそう、など。他にも以前捻り2層グラフェンで超伝導が発現したときに比べると2次元積層系関連のセッションも落ち着いていて、異なる組み合わせを試した、のような発表が多かったこともあり、新しい物理が出てきそうな雰囲気はなかつ

たように思います。今回初めて見かけたセッションとして本領域でも関連する研究が多いAltermagnetismがあったのですが、私の行ったセッションは部屋に対して人数が多すぎて廊下まで人があふれていたもので、これが一番新しい流行と言ってもいいのかもしれませんが。しかし、他のセッションで「今後どのような物質を探したらAltermagnetismが出るか」という内容で発表していた人との質疑応答を聞いている限りでは、定義が曖昧で人によって異なっていることと、本質的に何が新しいかについてはあまり明確ではないということ、そのためどうやって該当する物質を判断するかははっきりと言えない、といった内容だったので、今後の発展としては難しそうなのではないかと思いました。

皆さんは既にご存じかもしれませんが、私は今回初めてAPS March meetingにはchairがいて様々な委員会を束ねていることに気付きました。ポスドク時代のボス(Paul Chaikin、ニューヨーク大学)がトップページに出ていて初めて気付いたので、今までどれだけ自分が必要最低限だけ見ていたかがわかります。今は生物物理を研究しているのでセッションで会うことはないのですが、今回Chairになって会場で歩き回っていたので久しぶりに挨拶することが出来ました。偶然にも私がポスドクになるのと入れ違いで卒業した古い知り合いにも20年ぶり(!!)の再会で、来年こそは同窓会をしようと話したりもしました。発表を聞いたり共同研究の議論をするなどの研究にすぐに役立つような経験だけでなく、思いがけない経験が出来るのも対面の研究会に参加する良さであると再確認できるような会議でした。



国際会議参加報告：ICM2024

北澤 崇文

日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター 博士研究員

2024年6月30日から7月5日の期間にイタリアのボローニャで磁性の国際会議International Conference on Magnetism 2024(ICM2024)が開催されました。磁性分野で最大規模の国際会議であるICMは3年に1度開催されますが、2021年は中止となったため、ICMの開催は2018年のサンフランシスコ以来6年ぶりとなります。本記事では、開催初日から閉会式までの会場の様子を中心に私の視点からご報告させていただきます。

開催地であるボローニャはイタリア北部にある都市で、ボローニャ中央駅の南側は中世の街並みが残っています。私は開催初日の朝に現地に到着し、開会まで時間があつたので、ホテルに荷物を置いてから中央駅の南側を散策しました。この日は丁度ボローニャがツール・ド・フランスの2日目のゴール地点ということで、街中はロードバイクで走る人や多くの観客で賑わっていました。選手の到着する夕方頃にはICMが始まっていたため、そのときの様子は見ておりませんが、午前中に見たゴール地点周辺の活

気から、ツール・ド・フランスの偉大さを感じ取れたのは貴重な経験だったと思います。ちなみに、現地の物価は日本の倍程度という印象を受けました。格安で泊まるため、アパートの1室を客室にしたB&Bに泊まりましたが、それでも素泊まりで1泊あたり104.7ユーロ支払いました。決済に関しては、路線バスも含めてすべてクレジットカードのタッチ決済で済んだので非常に便利でした。

ここから先は、本題であるICM2024の会場の様子をお伝えします。会場の建物に入ると、正面にチェックイン機が複数台あり、予めメールで受け取ったQRコードをかざすと、自分の名前が書かれた名札が印刷され、その場で受付完了という効率的なシステムが整っていました。さらに感心したことは、名札の裏側にあるQRコードをスマートフォンで読み取ると、専用のサイトに移動し、直近の講演プログラムや自分の講演時間・場所、最新のお知らせを確認できた点です。ボローニャの空港でストライキが計画されており、帰りの飛行機に大幅な遅れが出る恐れをこのサイト



ICM2024の会場となったBologna Congress Center



ICM2024の開会式

で初めて知った参加者は、私も含めて多かったかと思います。このようなサイトは既に2018年のICMには実在していたようで、今回のICMにも継承したもののと思われます。ICMに限らず、パラレルセッションが行われるような大規模な国際会議や学会でも取り入れて欲しいなと思いました。

初日は、大野英男先生、Hae-Young Kee先生の順で、それぞれ磁気トンネル接合素子の開発と量子スピン液体の候補物質に関するチュートリアル講演がありました。ボローニャの歴史ある合唱団のコンサートを挟み、18時半からはWelcome partyがあり、ワインやチーズを片手に参加者同士で歓談しました。

2日目は、開会式とネオジム磁石を発明した佐川真人氏によるIUPAP(国際純粋応用物理学連合)受賞講演の後、最終日までPlenary講演・パラレルセッション・ポスターセッションが続きました。全体的に見ると、altermagnetism、カゴメ格子超伝導体や UTe_2 の超伝導状態に関する講演が近年の研究トピックスとして注目を集めているように感じました。また、個人的な研究分野の感想にはなりますが、強相関電子系における近藤効果の研究は、国内の学会や研究会ではそれほど講演を聞いてこなかったため、精力的に研究されている欧米の方々の講演を聞いたことは非常に有意義でした。理論分野では、スピン軌道相互作用や磁性サイト間の磁気相関を考慮に入れた複雑な近藤格子系をモデルとして、量子ビーム実験で得られ

るマグノン分散などの微視的物性を定量的に説明しようとする研究が印象的でした。圧力や磁場といった外場を加えたときの計算は今後の課題ということで、これからの展開が楽しみです。実験分野では、ARPESを利用した二次元の近藤格子系における重い電子状態の観測や、硬X線光電子分光・X線吸収分光・非共鳴X線非弾性散乱を利用した CeRh_2As_2 における近藤効果に起因した擬4重縮退の形成の実証など、近藤物理において放射光が強力なプローブであることを痛感しました。この他にも、(これまた放射光実験ですが、)テンダーX線を用いたRIXS実験によるウラン化合物のウラン価数の決定、一軸性圧力を加えたときの試料の温度変化(弾性熱量効果)から YbPtBi の結晶場準位を決定した研究など、強相関電子系における新たな実験手法の開発も印象的でした。

閉会式は予定通り17時頃に終わり、大きなトラブルなく解散となりました。会場で働くスタッフの人数が非常に多く、ICMの規模の大きさを初めて実感できました。入口の他にポスターセッションの部屋にも受付スタッフの方が朝から晩まで複数名おり、私自身、ポスター賞を審査する際に度々お世話になりました。会議の運営に携わったすべての方々に深く感謝を申し上げます。また、渡航費の一部はアシンメトリ量子の若手研究者派遣助成から支援をいただきました。この場をお借りして御礼申し上げます。



著者が発表しているときの会議室の様子。写真は撮影者である堀文哉氏(京大)から提供いただきました。



5日目の夜にSavoia Hotel Regencyで行われたSocial dinner。円形のテーブルに座り、イタリアンのコース料理を味わいました。



ICM2024に参加して

鈴木 大斗

広島大学大学院先進理工系科学研究科 博士後期2年

本領域の助成を受けて、イタリア、ボローニャで開催されたICM2024に参加しました。ボローニャはボロネーゼをはじめとした美食の街であると同時に、ボローニャの斜塔や1088年設立のヨーロッパ最古の総合大学であるボローニャ大学、サン・ペトロ・ニコ大聖堂などを擁する歴史ある素晴らしい街でした。

私の発表では逐次相転移を示すEu化合物についてポスター発表を行いました。様々な方に興味を持っていただき、有益な議論もしていただくことができました。物理以外の話もでき海外の研究者と交流を深めることもできました。また、他の方の発表を聞き、自分の研究の立ち位置を再認識しました。総じて発表のレベルは高く、私もより一層努力せねばならないと強く感じました。

ネオジム磁石の開発者である佐川真人博士の講演は非常に印象に残りました。当時所属されていた富士通を辞めてまで自身のアイデアを実現させる決断力と行動力に感銘を受けました。私も物質開発を行う者の端くれとして自分のアイデアを大切に、やり抜きたいと感じました。

他にも、会場では昨年グルノーブルで行われたH-Physics Workshopで知り合った大学院生や、昨年まで私たちの研究室に滞在していた留学生とも再会ができ、国際学会ならではの交流は、今後の研究のモチベーションになりました。

最後になりますが、鬼丸先生をはじめとした関係者の皆様にこの場を借りてお礼申し上げます。この経験を今後の研究に生かしていきます。



会議のロゴマークにも採用されていたボローニャの斜塔

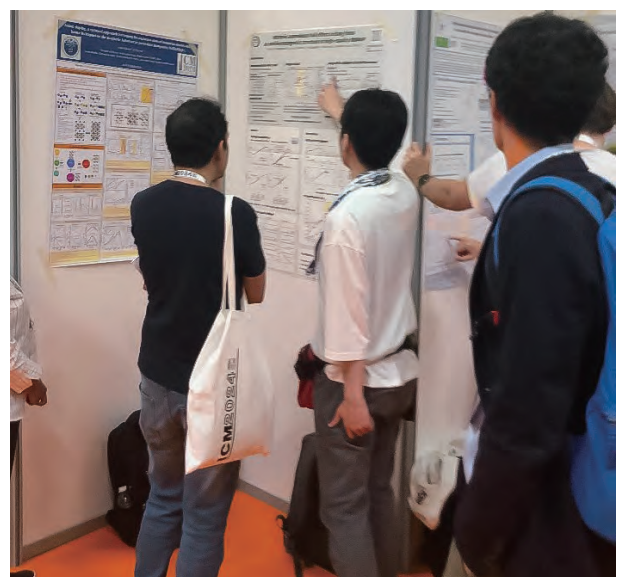


初参加の国際会議ICM 2024

新井 祐樹

神戸大学理学研究科物理学専攻 博士後期課程1年

神戸大学理学研究科物理学専攻の新井祐樹です。私は低温物性学研究室に所属しており、反強磁性由来の異常ホール効果・異常ネルンスト効果というテーマで研究を行っています。今回、私は2024年6月30日から7月5日まで開かれたICM 2024に参加し、反強磁性構造を持つNbMnPにおける異常ホール効果の純良度依存性についてのポスター発表を行いました。初めての海外で国際会議だったので緊張していたのですが、開催地イタリア・ボローニャに着くと日本と変わらない暑さで安心感を覚えました。また、アシンメトリ量子の領域代表でもある鬼丸先生らが事前に英語でプレゼンをする機会を与えてくださったこともあり、発表の際には英語でもなんとか乗り越えることができました。ありがとうございました。同時に少し困ったこともありました。発表中の写真を見てもらうと分かるようにポスター設置場所が狭く、隣の人も同時に発表していたので、場所を譲り合わなければならなかったことです。会議ではこのようなこともありますが、同じテーマで研究されている研究者も多く、もっと研究せねばと刺激を受けました。特に異常ホール効果や異常ネルンスト効果の測定をやられている方も多く、海外の研究者の方とも交流することができました。また、意外と英語で話すことができ、次に海外に行くときには積極的に話しかけて、友達が作れるように英語力を鍛えておきたいです。





会議報告： 「アシンメトリ量子」令和6年度 領域全体会議・公募研究キックオフ会議

野村 悠祐

東北大学金属材料研究所 教授

2024年の5月29日から5月31日にかけて東広島芸術文化ホール（くら）小ホールにて、令和6年度領域全体会議・公募研究キックオフ会議が開催されました。会議の前日には大雨の影響で交通機関にトラブルがあり、東広島に移動するのに苦労された方もいたようですが、全体として大きなトラブルもなく、研究の議論も盛り上がりを見せて無事終了しましたのでここに報告させていただきます。



図1：鬼丸代表によるオープニング。

オープニングにおいて鬼丸代表から公募研究に参画してくださった方々を歓迎するとのお話がありました。評価委員の小形先生もおっしゃっていたように、公募班の方々が参画していただいたことで対象物質も扱う手法・現象の幅も格段に広がったことは歓迎すべきことです。これからの共同研究などを通じてどのような研究の展開を見せるのかが楽しみになってきました。

さて、会議ですが、領域内外から147名の方が参加され、熱気にあふれたものとなりました。その中身を私個人の観点からレビューする前に、本領域の構成についておさらいしておきたいと思います。

本領域の題目となっている「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」にもあるように、本領域の構成は大きく分けて可視化担当班(A01,A02)、設計担当班(B01)、創出担当班(C01,C02,D01)に分かれています。可視化担当班と創出担当班は主に実験の研究者の方々からなり、それらをつなぐ設計担当班に理論の研究者が参画しています。

まず初日はマクロ物性開拓を担当するA02班とミクロな解析を担当するA01班の発表が主にありました。様々な実験プローブ、新手法にも目を惹かれましたが、昨年度の領域会議と比べて大きく印象的だった点は、初日の時点で f 電子系のみならず d 電子系やメタマテリアルに至るまで、幅広い物質群が登場したことです。公募班の方々が参加したことによる新たな活力を感じる1日となりました。

二日目は物質開拓を目指すC02班と理論班であるB01班の発表が主に行われました。C02班の発表では、多彩な物質群が登場し、評価委員の鳥養先生もAnderson氏の有名な言葉である「More is different」を感じたとおっしゃっていました。同時に鳥養先生は「More is universal」ともおっしゃっており、アシンメトリ量子の名のもとに、多様性の中から普遍的な物理をいかに抽出するかが、重要な課題と感じました。一方、理論班であるB01班の目標は基礎理論構築から物質設計につなげるのですが、それに向けた進捗状況が報告されました。基礎理論構築については成熟しつつあるので、これからは対称性だけでは議論できないような定量性の面が重要になってきていると感じています。

二日目の口頭発表終了後に、ポスターセッションが

行われました。今回のポスターセッションには工夫が凝らされており、発表者が議論したい計画班メンバーを指名できるようなボードが設定されていたりするなど、総括班のナイスアイデアが光りました。実際、77件ものポスター発表があったポスター会場は大変活気にあふれており、真剣な議論が交わされていました。ポスター賞を受賞された次世代のスターの方々は誠におめでとうございます！



図2：ポスター賞の授賞式の様子。

最終日はあいにくの雨でしたが、研究に関しては湿ることなく、活発な議論が続けられました。登場したのは、アシンメトリ量子のより深い理解を目指すC01班です。理解の深化のためには、C01班の発表やB01班の発表でも言及があったように、典型物質の設定と、その物質に対する実験的・理論的観点からの多角的検証が大事になります。そのため、実験班・理論班のより深い連携が今後重要です。

開拓を目指すC02班と、深化を目指すC01班をつなぐ役割として設置された公募研究から構成されるD01班の方々の発表も二日目から最終日にかけて行われました。やはり、物質があってこそその物性研究な

ので、C01-C02-D01班の連携によって興味深い物質に関する新展開があることを期待します。

個人的感想となりますが、多くの学生の方がポスター発表をされていた（全部で59件）ことが素晴らしく、二日目の夜に開催された意見交換会でも若い世代での情報交換があったように見受けられました。日本物理学会の後に開催されるアシンメトリ量子若手秋の学校において、より絆を深めていただけたらと思っています。

クロージングにおいて、鬼丸代表が言及されたキーワードは、連携とチャレンジということで、NHKの番組「プロジェクトX」を想起させる面がありますが、その「X」の文字の形に似た挑戦者（研究者）たちの集合写真が撮れましたので、その写真を提示し、会議報告の締めとさせていただきます。



図3：全体写真。



こんなアウトリーチやりました

日本語からはじめよう

大原 繁男

名古屋工業大学大学院工学専攻 教授

日 時：2023年12月11日（月）

2・3限（9：55～12：15）2，3，4組

4・5限（12：55～15：15）1，5組

場 所：愛知県立一宮高等学校 桃陵館

対 象：2年生理系クラス（1～5組、約200名）

「日本語からはじめよう」と題するアウトリーチ活動を行いました。論理文の書き方を高校生に学んでもらう講義です。冒頭「日本語から何を始めるのか、なぜ物理学者が日本語を教えに来たのか、謎ですよ」と高校生を講義へ誘います。

導入では、物理学者をはじめ技術者など、理科系であっても文章を書く能力が求められることを知ってもらいます。論文、予算申請書、技術報告書、取扱説明書など、書くことの必要性を例示して、格言「Publish or Perish」を紹介します。理科系だから文系科目は不要などと思ってはだめですよ、ということを高校生に意識させることをねらって話していきます。予算申請書の話ではアシンメトリ量子も含め、大きなプロジェクトについても紹介しています。その中で、若手支援の話もしながら、10年後には若い研究者として活躍することを想像してみて、と高校生に将来像を見せるようにしています。

日本語から「何が」はじまるかについては、論理的な文章を書くことで論理的な思考力が養われること、また正しい日本語を書くことは外国語で文章を書くことにも繋がることを紹介します。もともとこの講義はアシンメトリ量子の前身であるJ-Physicsのニュースレター [1]で紹介された石黒鎮雄『日本語からはじめる科学・技術英文の書き方』（丸善、

1994）という本に端を発しています。英文の書き方の本だけど、7割が日本語について解説されていることや、石黒鎮雄博士の紹介（海洋物理学者としての活躍やノーベル文学賞受賞者カズオ・イシグロの父親であること^{注1}）も挟んで、飽きないように講義を進めます。ここまでが書くことへの動機づけです。

引き続いて、ワークシートで演習しながら、文章を書く際の点検項目リストを完成させていきます。ワークシートでの最初の問いかけは「私たちはなぜ文章を書くのか」です。これに対して高校生たちは、すぐに「誰かに自分の考えを伝えるため」と答えます。このことは、これまで教えたどの高校でも例外がありません。ほとんど全員がそう答えます。「では、文章を書くときに読み手を想定して、相手に伝わるように書いていますか」と指摘します。こわいくらい、シーンとします。そういう姿勢をとったことがないと気づいたことが伝わってきます。

論理文の書き方は、その全体の構造からはじめて、文章を分解していき、一つの文の書き方まで教えています。主題（問い）と主張（答え）とその論拠からなることや、パラグラフ・ライティング、事実と意見の違い、日本語の曖昧さ（主語や目的語の欠落、修飾関係のわかりにくさ）などを説明しています。

パラグラフ・ライティングの例には清少納言の「春はあけぼの」を利用しています。トピックセンテンス（そのセンテンスの内容が要約されている1文。通常、パラグラフの冒頭にある。）を探させると、すぐに春夏秋冬のパラグラフの冒頭だと生徒たちは指摘してくれます。トピックセンテンスだけ読むと「春はあけぼの 夏は夜 秋は夕ぐれ 冬はつとめて」と美しい七五調になり、文章が要約されます。パラグラフ・ライティングの例にする一方、原文（写本）をみても、元の文章には句読点もなく、日本語にはパラグラフの概念がないことがわかります。文としても省略が多く、日本語の曖昧さの例にもなっています。他に、修飾関係のわかりにくさの例として、有名な「黒い目のきれいな女の子がいた。」を紹介しています[2]。この文は八通りに読めます。

授業の後半は、実際に高校生の書いた文章を改訂していきます。今回は、物化部の生徒たちが書いた概要を教材にさせていただきました。著作物の利用に関しての許諾も授業に入れています。作業を単純にするために「不足を補い、重複や過剰を取り除き、簡潔に書く。」ことだけやります。長文はわかりにくいことにも気づいてもらい、連なった短い文に直します。

改訂を通して、論理的な文章を書くには論理的な思考が必要であること、研究計画や内容の不十分な点が見えてくることに気づいてもらえると大成功です。

今回は改訂体験がうまくいったように感じます。講義後に質問も多く出ました。生徒へのアンケートでも質問が25（分類すると19）でできましたので、文書で回答しました。

この講義はとても重要で役に立つと私は思っています。始めて4年になりますが、今後も継続していくつもりです。^{注2}



注1：2024年6月に天皇陛下が訪英され、25日夜にバッキンガム宮殿で開かれた晩餐会でテムズバリア見学と関連して「英国における高潮予測の発展には、日本人研究者の石黒鎮雄博士、日系英国人でノーベル文学賞受賞者の作家カズオ・イシグロ氏のお父上が重要な役割を果たされました。」と述べられました。

注2：2024年8月21日愛知県STEAM教育「知の探究講座」、9月6日兵庫県立長田高校「SSH特別講義」ほか、2024年も「日本語からはじめよう」の講演を予定している。

[1] 播磨尚朝, J-Physics News Letter 5, 2 (2018) —日本語からはじめる。

[2] 木下是雄『理科系の作文技術』（中央公論新社, 1981）。



アウトリーチ

アウトリーチ活動を探究する

吉田 紘行

北海道大学大学院理学研究院 教授

日 時：2024年5月1日（水）

場 所：奈良県立奈良高等学校 体育館

対 象：1年生（361名）

奈良高校で、アウトリーチ活動「1年探究講演会」を行いました。1年生（361名）を対象とする授業「SSP基礎 奈良タイム」の一環として行われたものです。この授業では、年間を通して探究活動に必要な基礎知識を学習し、グループごとに課題研究を進め、最終的に生徒や大学教員を含む評価委員の前で成果発表を行います。奈良という場所柄、科学だけでなく、歴史や文化なども探究活動のトピックになる大変興味深い活動です。

講演の前半では、世界が非対称性に溢れていること、物質の中の対称性、そして対称性の破れによって発現する様々な機能性について説明し、アシンメトリ量子のプロジェクトや研究例について紹介しまし

た。探究活動を始める生徒たちに向けて、どのように研究目的を設定したか、実験計画の立て方、得られた結果を実験計画にフィードバックさせる重要性、さらに目的を達成した際の喜びや感動についても意識してお話しました。生徒にも比較的身近な磁性体や超伝導体を取り上げ、新物質探索研究の実際について説明し、それらの現象を分かりやすいイメージも交えて紹介することで、物性物理学に親しんでもらうよう工夫しました。対称性の説明では、アシンメトリ量子のロゴマークや奈良高校の校章、唐招提寺の形を題材にして、これらがどのような対称性を有しているか、生徒に考えてもらいました。

後半では、これからの探究活動の参考になるよう、

研究や探究活動の意義、面白さや心構え、実施にあたっての注意点、チームワークの重要性等についてお話しました。特に、「学びの意味」や「知識を得たその先に何があるのか」という問いについて、自分なりの考えを紹介しました。体育館に集まった生徒たちはメモを取りながら熱心に耳を傾けてくれました。

これまで大学のオープンキャンパスや出張講義、SSHプログラム等でアウトリーチ活動を重ねてき



ましたが、「どうしたら多くの方に物性に興味を持ってもらえるか」をいつも念頭に置き、自問自答しています。素粒子・宇宙に関する講演は、いつも人気があるようです。講演を聞いて、目に見えない粒子の織りなす世界や遙か宇宙に思いを馳せる事で、あたかもSF映画を一本見終わったような感覚になるのではないかと想像します。一方、物性物理の現象も実に多様で面白いものですが、これらの現象をどのように伝えていくか



という点には、より多くの工夫が必要だと感じています。超伝導転移、強磁性転移、金属絶縁体転移を駆動力としたピタゴラコースは、如何に物性に興味を持ってもらい、楽しみ親しんでもらうかということを考えて生まれた一つの企画です（北海道大学サイエンスグローブ2018）。物性の強みの一つは、液体窒素等を用いることで、物質の性質がダイナミックに変化する様子を目の前でデモンストレーションすることができることでしょう。色々な切り口の活動があるはずで、超伝導や磁性などの多彩な現象をミクロ・マクロな視点から分かりやすく伝えることも大切です。アシンメトリ量子物性等の最先端の研究成果を紹介することも重要です。素粒子・宇宙に倣って、我々の研究の先にある夢を語り、聴衆に希望を持ってもらえるような講演を行おうと思います。

様々なアイデアをひねり出し、将来の物性科学をリードする人材を一人でも増やせるよう、これからも

草の根の活動を続けていきたいと考えています。奈良高校には、成果発表会の際にも伺うことになっています。若い発想を持つ生徒たちと交流を重ね、私もアウトリーチ活動のあり方を探究していきたいと思っています。

日本の将棋は、チェスなどの他の将棋類にはない特異なルールがあり、それによってゲームとしての魅力が増しているように思われる。将棋のルーツは、インドで生まれたチャトランガにあるという説が有力で、そこからロシアや中国に伝来したものがチェスや象棋（シャンチー）として独自の発展を遂げたと言われている[1]。これら以外にも様々な将棋の類いが知られているが、実現可能な局面数は、将棋のそれ（ 10^{220} 程度）とは比べものにならない程少ない（チェスは 10^{120} 程度）。ただし、単に局面数が増えればゲームの魅力が増すということにはならない。親しみやすいゲームであるためには、適度な単純さが求められるはずだ。つまり、システムが単純でありながら奥が深い（局面数が多い）、これがゲームとしての将棋のもつ魅力の真髄であり、他の将棋類にはない特異性だと言えそう。

では将棋はどのようにしてこの特異性を獲得したのだろうか。現在の将棋は、 9×9 マスの盤上に8種類・40枚の駒を並べて指されており、チェスなどの他の将棋類のそれと大差はない。一方、鎌倉時代には 15×15 マスの盤上に29種類・130枚の駒を並べて遊ぶ大将棋をはじめとした大型なものが存在していたことが分かっている。どのようにして現在の将棋の形へと進化したのかという点に関しては諸説あるが、ここでは進化の過程で相手の駒を再利用できる持ち駒ルールの導入が行われたという事実に着目しよう。これはチェスなどの他の将棋類にも存在しない希有なルールであり、その起源に関しても様々な説がある。例えば哲学者の梅原猛氏は、怨霊思想をもつ戦国時代の武士は敗者の生き残りを味方につけることが一般的であった、という史実との関係を指摘している[2]。

以上のように、日本独自の文化や思想が将棋の発展に影響を与えた可能性は高いが、ここでは駒の対称性に注目して持ち駒ルールの起源を捉え直してみたい。まず持ち駒ルールが成立するためには、敵味方で

駒が同一でなければならない（チェスは色分けされている）。その上で駒に所属の違いをもたらす最も簡単な方法が、駒の反転対称性を破ることで向きの自由度を与えることなのである。文字の書かれた駒の向きを変えれば敵味方が入れ替わるということは、誰でもすぐに思いつくことだろう。小型の将棋盤でも奥の深いゲームができるようにと、自然発生的に持ち駒ルールが導入され、その後視認しやすいように反転対称性が破れた五角形の外形が出来上がった、という仮説が筆者には自然に感じられる。ちなみに、将棋の駒の外形はmm2という方向性をもった点群対称性をもっており、敵陣に入ると駒を裏返して進化する「成り」のルールは、文字による表裏の鏡映対称性(m)の破れを利用したものである。また、将棋の進化の過程で（飛車と角によって）駒の初期配置の左右対称性が失われた点も特筆すべきである。

本稿では、アシンメトリ（非対称性）をうまく活用することで、単純なシステムでも深遠な世界を生み出すことができるということの例として、将棋を取り上げた。ただし、駒の動きなどの基本的なルールの多くは対称性に支配されているという点を忘れてはいけない。我々が研究対象とする量子物質も様々な対称性に支配されており、その中の一部の対称性の消失が機能発現と結びついている。例えば、強誘電体として知られる BaTiO_3 は高温で高対称な結晶構造をもつが、室温ではある方向の鏡映対称性が失われ、駒と同様な方向性をもつことで強誘電性を示すようになる。本研究領域において我々は、様々な対称性の破れに注目することで、一見複雑に見える量子物質の性質を支配するシンプルかつ普遍的なルールを理解し、それに基づいて革新的機能を開拓することを目指している。

[1] 日本将棋連盟公式サイト

[2] 教養としての将棋 梅原猛、羽生善治、尾本恵市 講談社現代新書

アシメ★通信

第3話

「カイラルは電気トロイダル
単極子の夢をみるか？」



芽芽量子

鬼丸センセイ！Asymmetryっていう言葉を辞書で調べてみたんよ。

おお！何かわかりましたか？

ギリシャ語系の言葉で、否定を意味するa-がついて、
～でない、になっとなることがわかった。
ほじゃけん、AsymmetryはSymmetryじゃないって意味になるじゃと思う。

なるほど！ それではSymmetryはどういう意味だと書いてありますか？



ほい、ちょっとまってね（大きな辞書を取り出す）

わー！ デジタルじゃない！



紙の本がええんよ。 S, y, m...あった、あった。
Symmetryは「対称、形の対称的規則性」とあるね。
ももとの意味は「釣り合いのとれていること」。
そこから「対称」という意味になったって書いてあるね。

（良い学びだなあと感心）このあいだのコロネパンの時に出来た
Chirality（カイラリティ、キラリティ、左右性）も
確かギリシャ語だった気がします。調べてもらえますか？

それはぶち、いたいけえAIさんにきいてみるわ！
Chiralityの語源、と。tap-tap...（スマホをいじる音）

（ええー...紙の本がええんよ、はどこへ（汗））それは噂のChat GP...

でた！ ふむふむ。「掌（てのひら）」のことを
ギリシャ語で $\chi\epsilon\iota\rho$ （カイル/キイル）というじゃね。
それでカイラルになったみたい。ケルビンさんが命名したと。
あっ。やっぱり！ カイラルの反対はアカイラルじゃって。

やっぱりそうでしたか。カイラルはアシンメトリですが、
アカイラルは「カイラルではない」のだから、えーっと

シンメトリってことじゃね。
「～でない」から「ア」がつくの、アシメではなくてシンメトリなんじゃね。

ということは、アシメリョウコの反対は シメリョウコってことだね！

それはないけー！

うろたんの豆知識コーナー

「自身とその鏡像が重ならない形態」を「カイラリティ」と命名したのはケルビン卿。その後、バロンらによりカイラルの真の定義が「空間反転（パリティ）P対称性を破るが、純粋回転と時間反転の組み合わせRTは破らない」[1]と更新された後、125年後の2018年に速水・楠瀬らにより「（電気トロイダル単極子）がある」という新しいカイラルの定義が提唱されたニョロ。[2]

[1] 岸根順一郎, 日本物理学会誌Vol. 71, No. 5 (2016), 294.

[2] S. Hayami, M. Yatsushiro, Y. Yanagi and H. Kusunose, Phys. Rev. B **98**, 165110 (2018).

鬼丸

鬼?

鬼

鬼

鬼

鬼

鬼!



2024年 10月からの関連行事

■ SUPERMAX: International Workshop on Superconductivity & Magnetism in f-Electron Quantum Materials under Extreme Conditions

日時：2024年10月14日(月)～18日(金)

場所：Université Toulouse III - Paul Sabatier, Toulouse, France

アシンメトリ量子共催

■ 第18回物性科学領域横断研究会

日時：2024年11月26日(火)～27日(水)

場所：神戸大学百年記念館六甲ホール（兵庫県 神戸市）

アシンメトリ量子共催

■ C02 トピカルミーティング

「アシンメトリ量子物質の開発：交差相関応答を求めて（仮）」

日時：2024年12月6日(金)～7日(土)

場所：神戸大六甲台第2キャンパス 理学研究科

アシンメトリ量子主催

■ 日本物理学会

日時：2025年3月18日(火)～21日(金)

場所：オンライン開催

事務局からのお知らせ

■ 謝辞記載のお願い

本学術変革領域に関する業績には、以下の謝辞の記載をお願いいたします。

■ 記載例は次のとおりです。

【英文】: This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JPXXXXXXXX.

【和文】: 本研究はJSPS科研費 JPXXXXXXXXの助成を受けたものです。

(※XXXXXXXXは課題番号)

■ 計画研究の課題番号と課題名の対応は次のとおりです。

23H04867 A01:量子ビームによるアシンメトリ量子物質のミクロ解析

23H04868 A02:精密物性測定によるアシンメトリ量子物質の新機能開拓

23H04869 B01:アシンメトリ量子物質の基礎理論と設計

23H04870 C01:アシンメトリ量子物質の深化

23H04871 C02:アシンメトリ量子物質の開拓

23H04866 X00:アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出の研究総括

(※ 共用機器の利用。国内旅費援助・海外派遣で得られた成果の場合、こちらも含めてください。)

■ 公募研究の課題番号と課題名の対応は次のとおりです。

24H01670 顕微スピンARPES でプローブする反強磁性秩序の実空間・波数空間相関

24H01685 軟X線吸収・散乱による拡張磁気多極子観測手法の開拓

24H01644 対称心のない欠損スピネル化合物における分子多極子軌道の直接観測

24H01640 非対称な熱流とその交差相関の開拓

24H01646 バルク超伝導体を用いた巨大超伝導交差応答の研究

24H01659 ベクトル圧力:一軸圧力回転装置の開発と実証

24H01638 量子アシンメトリ物質における熱・弾性交差相関現象の開拓

24H01639 アシンメトリ量子の検出・可視化手法の開発と人工アシンメトロニクスへの展開

24H01663 電流下で顕在化する多極子アシンメトリ応答の光技術観測

24H01675 準結晶と近似結晶における奇パリティ結晶場と多極子の開拓

24H01662 ミクロな非対称性が誘起する超伝導非相反現象

24H01668 Microscopic theory for cross-coupled ferroic orders in chiral magnets

24H01649 電子自由度のアシンメトリによるトポロジカル相制御

24H01673 軸性アニーリングによる強相関非対称物質の創製

24H01641 局所的に空間反転対称性の破れたウラン化合物の物質探索と超伝導

24H01650 カイラリティ自由度をもつ拡張ハニカム型無機有機ハイブリッド物質の開発

24H01666 原子レベルで制御された空間アシンメトリに起因する磁気相互作用

24H01652 表面非対称電子軌道の制御による非相反伝導特性の最大化

24H01654 交替磁性揺らぎによる超伝導発現の実証



編集後記

田端千紘編集委員長のご指示のもと、#3の編集を担当しました。まずは記事をご執筆いただいた皆様に感謝いたします。さて、「今年の夏は暑い」と例年言っている気がしますが、実際にとても暑かったようです。だんだん年齢とともに、暑さが身に堪えるようになっていのですが、加えて今年は7月下旬にコロナウィルスに感染し、すっかり調子を崩し8月初旬から既に夏バテという有り様で、健康のありがたさをしみじみ感じた夏となりました。おまけに、典型的な後遺症の味覚・嗅覚障害にもなり、とても新鮮!?!な感覚を体験することができました。単純に無味というよりは、特定の味覚を失っているようで、味覚のバランスが崩れました。その結果、本来は美味しいはずのものでも、とても不味く感じるというのは、新しい発見でした。とってつけたようですが、研究も色々な方向性をもった方が集うことで、面白味も意義も生まれてくるのかなと思います。本号では公募班の紹介記事もありますが、本領域の活動が多様でバランスの取れたものとして、ますます発展することを願っております。私も研究テーマの嗅覚だけは鈍らせないように学生達と頑張りたいと思います。

(松田 達磨)



A S Y M M E T R Y

Unveiling, Design, and Development of
Asymmetric Quantum Matters

アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出

文部科学省科学研究費補助金「学術変革領域研究（A）」（令和5年～9年度）

領域番号：23A202

学術変革領域研究（A）

「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」ニュースレター 第3号

2024年9月 発行

編集人 田端 千紘

発行人 鬼丸 孝博

発行所 広島大学大学院先進理工系科学研究科

TEL：082-424-7027

事務局 岡山大学異分野基礎科学研究所

大槻 純也

TEL：086-251-7804



領域ホームページ

<https://asymmetry.hiroshima-u.ac.jp/>