

A S Y M M E T R Y

NewsLetter

#02

2024.03

Unveiling, Design, and Development of Asymmetric Quantum Matters

CONTENTS

巻頭言

News Letter第2号 巻頭言	鬼丸 孝博	02
--------------------------	-------	----

領域メンバー紹介

A01

中性子・放射光X線回折によるアシンメトリ量子の観測	田端 千紘	04
ウラン系化合物におけるハイブリッド奇パリティ多極子の可視化	網塚 浩	05
「アシンメトリ量子」観測のための共鳴X線散乱の手法開発	中尾 裕則	06
アシンメトリ量子物質における奇パリティ多極子の観測	松村 武	07
「物質 + 中性子 + 放射光X線 = アシンメトリ量子」を目指して	岩佐 和晃	08
内殻光電子線二色性を中心とした 偏光依存光電子分光による強相関軌道対称性の可視化	関山 明	09

A02

超音波による交差相関応答の多角化	柳澤 達也	10
アシンメトリとの出会い	小林 達生	11
アシンメトリ量子物質の可視化：開拓と深化	井澤 公一	12
FIB微細加工を用いたアシンメトリ量子物性の開拓	木俣 基	13
磁場角度分解歪み・熱物性測定によるアシンメトリ量子物質の新機能開拓	橘高 俊一郎	14

B01

多極子秩序の再現と予測	大槻 純也	15
非対称性の織りなす舞台の有効理論模型の構築と解析	服部 一匡	16
アシンメトリ量子物質に対する基礎理論の構築	速水 賢	17
アシンメトリ物質の定量記述に向けて	野村 悠祐	18
第一原理計算に基づくアシンメトリ量子物質の設計にむけて	是常 隆	19

C01

結晶合成環境の最適化と拡充	大原 繁男	20
希土類化合物の多彩な相転移が創り出す機能物性の開拓	鬼丸 孝博	21
積層を用いた反転対称性の制御と電子物性	小林 夏野	22
カイラル構造を持つ物質の高純度単結晶がもたらす物性応答研究	松田 達磨	23
ウラン系アシンメトリ量子物質の探索	清水 悠晴	24



C02

アシンメトリの概念で眺める物質開発	吉田 紘行	25
アクチノイド5f電子系の物質探索	芳賀 芳範	26
イリジウム酸化物における電気トロイダル秩序および新奇相転移の研究	松平 和之	27
多極子の辺縁で、アシメ量子をさがす	石渡 晋太郎	28
Mn系化合物を中心としたクラスター型アシンメトリ量子物質の開拓	小手川 恒	29

研究成果紹介

偏光依存内殻電子分光による重い電子系超伝導体 CeNi ₂ Ge ₂ のCe 4f基底状態の決定	藤原 秀紀	30
希土類金属磁性体GdNi ₃ Ga ₉ における反強磁性カイラルらせんの発見	中村 翔太	35

研究会・滞在報告

国際会議参加報告：SCES2023	藤原 秀紀	39
2023年夏の学校ミニ（多極子編）に参加して	日比野 瑠央	40
国際研究会H-Physics Workshop開催報告	宮本 大輝 大石 遼平 今 布咲子 須藤 健太 鈴木 大斗	41
第17回物性科学領域横断研究会	大原 繁男	45
アシンメトリ量子物質の開発～現状と展望～	松田 達磨	47

アウトリーチ報告

物質探査と超伝導が拓く未来	大原 繁男	48
---------------------	-------	----

受賞

速水 賢さん凝縮系科学賞受賞	網塚 浩	50
凝縮系科学賞を受賞して	速水 賢	51

共用設備紹介

共用設備備品「無冷媒低温材料物性自動測定システム」の導入	鬼丸 孝博	52
------------------------------------	-------	----

コラム

アシメ★通信 Vol.2		53
--------------------	--	----

事務局からのお知らせ

2024年4月からの関連行事		54
事務局からのお知らせ／編集後記		55

News Letter第2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

令和5年4月から本研究領域の活動がスタートして、まもなく1年が経とうとしています。キックオフ会議を岡山大学津山キャンパスで6月10-11日に開催し、対面形式による現地開催にもかかわらず、領域内外から多くの方々にご参加いただきました。ながらく新型コロナウイルス感染症拡大の影響で対面形式の会合が制限されていたので、直接会って話ができる貴重な研究交流の機会となり、よいスタートになったと思います。その後、領域の活動が本格的に始まり、初年度で慣れないことも多々ありましたが、領域メンバーで協力して取り組んでまいりました。9月には、編集委員や関係者の方々のご尽力もあり、News Letter第1号を発刊することができました。各計画研究の代表による領域紹介の記事は、領域として何をを目指すのか、まさに決意表明ともいえる熱意が伝わってくる内容となっています。そして、今回第2号の発刊となります。最近の研究成果に関する解説記事や各領域メンバーの研究紹介、イベント情報など、本領域のリアルタイムの情報が盛り込まれています。また、領域のホームページも新たに開設しました。<https://asymmetry.hiroshima-u.ac.jp> ホームページのトップビジュアルは、領域ロゴをモチーフとしたもので、本領域が目指す方向を「非対称性から生まれる物語」の文言とともに表現しています。これらの媒体を通して、本領域で得られた研究成果はもちろん、領域としての様々な活動、そして領域メンバーや若手研究者、大学院生の活躍を、広く領域内外へ発信していきます。

本領域の本旨である研究の交流も、着々と進んでいます。令和5年8月に北海道大学で開催されたA01・A02共催のトピカルミーティングとB01による夏の学校ミニ（多極子編、ハイブリッド形式）、令和6年1月に九州工業大学で開催されたC01・C02共催のトピカルミーティングには、領域内外の多くの方々にご参加いただきました。最新の研究成果や挑戦的なテーマに関する講演もあり、活発な意見交換がなされました。領域としてのテーマの広がりを感じるとともに、今後新たなブレイクスルーが生まれることを期待せずにはられません。10月には、フランス・グルノーブルで開催されたH-Physics Workshop（アシンメトリ量子共催）に領域メンバー9名が参加し、若手支援の一環として大学院生5名を派遣しました。海外の研究者との交流を通して、アシンメトリ量子物質の概念がどのように活かせるのか、様々なアイデアも出てきましたし、国際的な共同研究も広がりを見せています。（各イベントについての詳細は、本号の別記事をご参照ください。）また、「アシンメトリ量子セミナー」と銘打ったハイブリッド形式のセミナーを開催し、関連するテーマの情報共有と議論の場としています。これらの研究交流を通して、領域としての連携を意識しつつも、個々のオリジナリティを活かして、先進的なテーマの創出へとつなげます。

来たる令和6年度の最も重要なイベントの一つとして、公募研究の方々に加わっていただくことがあります。本領域に新たな方々をお迎えできることを、とても楽しみにしています。それに関連して、5月29日(水)～31日(金)、東広島芸術文化ホールにて、領域全体会議・公募研究キックオフ会議を開催します。そこでは、これまでに得られた研究成果と今後の研究計画を共有し、領域としての研究方針をさらに明確にするべく、議論を深めたいと考えています。もう一つは、9月20日(金)～23日(月)に北海道・美瑛で開催する「アシンメトリ量子秋の学校2024」です。新進気鋭の若手研究者を講師としてお招きして、大学院生向けに講義をしていただきます。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、研究者としてそれぞれが成長するきっかけとなれば、と思っています。北海道大学での物理学会年次大会に続けての開催となります。多くの皆様のご参加をお待ちしております。

さて、巻頭言は第1号だけ、と勝手に思いこんでいたのですが、編集委員長からの圧もあり、ここに寄稿することとなりました。この半年間を振り返るだけでも、多くの方々にお会いしてお話できたこと、そして様々なところでお力添えをいただけたことを、大変ありがたく思います。いよいよ2年目が始まります。決意も新たに、「領域としての連携」と「新たなテーマへのチャレンジ」を合い言葉として、本領域の活動をさらにアクティブなものにしたいと考えております。ご支援・ご協力のほど、よろしくお願いいたします。

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。



中性子・放射光X線回折による アシンメトリ量子の観測

研究代表者 田端 千紘

日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター 研究員

計画研究A01では、量子ビームを用いてアシンメトリ量子物質で活性となる多極子を可視化することがミッションである。量子ビームを用いた解析手法は多岐にわたるが、本研究課題では、中性子とX線による回折を駆使して電子の秩序にアプローチする。

回折実験では対象となる系の周期構造を観測する。このとき使用するビームの種類によって、散乱体が異なるため、相補的な情報を得ることができる。中性子の場合、原子核と電子磁気モーメントが主要な散乱体であり、結晶中の原子位置と磁気密度分布の情報が得られる。一方、X線では、電気的な相互作用を通じた散乱が支配的であり、電荷密度分布の周期配列、すなわち結晶構造がわかる。

量子ビームの偏極性を制御・解析することで、系の周期性に加えて、秩序変数の異方性の情報が得られる。例えば、スピンの偏極した中性子ビームを用いると、カイラル磁気秩序をはじめとした非共線な磁気秩序を、より直接的に検出可能である。偏光した放射光X線で共鳴散乱を用いると、元素選択かつ軌道選択的に電子状態の異方性、すなわち多極子を検出できる。

これらの回折実験で得られる結晶構造・磁気構造の情報は、アシンメトリ量子物質の物性の鍵を握る対称性の議論のベースとなるため、計画研究C01およびC02で合成される新物質はもちろん測定対象である。例えば、我々は最近発見されたU系ハニカム磁性体 $\text{U}_2\text{Pt}_6\text{Ga}_{15}$ について、共鳴X線散乱と中性子回折から磁気構造を明らかにした[1]。この物質は超構造による多ドメインを有する結晶構造をしているが、共鳴X線散乱の偏光依存性からハニカム層に垂直な磁気モーメントが、中性子散乱強度の波数依存性から積層方向に強的なスピン配列が明確に示され、磁気構造の特定に至ることができた。同型化合物である $\text{U}_2\text{Pt}_6\text{Al}_{15}$ についても、ごく最近、偏極中性子を用いて磁気秩序の観測に成功している[2]。

アシンメトリ量子物質の候補は、過去に調べられている磁性体の中にも潜在的に多数存在する。例えば、 UNi_4B は90年代から存在が知られていた反強磁性体であるが、最近行われたX線回折実験によって結晶構造がより低対称なものであることが判明した[3,4]。この物質では電流が磁化を誘起する交差相関現象が初めて観測されたが、その本質を担う多極子について議論が続いており、更新された結晶構造に基づいた多極子秩序構造の再考が必要である。最近、我々が行った共鳴X線散乱実験では、結晶構造の低対称性を反映した磁気構造の微小な変調の検出に成功した。この変調の信号は主要な磁気散乱の1/100程度の強度しかないため、過去に行われた中性子散乱では検出されていなかった。今回の共鳴X線散乱で検出できたのは、UのM4吸収端で得られる非常に強い共鳴信号の恩恵によるものである。

これらU系化合物の中性子実験については、国内ではJAEAの中性子実験施設JRR-3でしか実施できない。3d電子系と4f電子系の中間の性質を示し、両者をつなぐ重要な位置を占める5f電子系の秩序を可視化することは、本研究の眼目の一つである。中性子と放射光を相補的に活用し、これらの電子秩序の精密な可視化を推し進めていきたいと考えている。

[1] C. Tabata *et al.*, submitted to Phys. Rev. B

[2] K. Ota *et al.*, New Physics: Sae Mulli **73**, 1170 (2023).

[3] Y. Haga *et al.*, Physica B **403**, 900 (2008).

[4] C. Tabata *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 064601 (2021).



ウラン系化合物における ハイブリッド奇パリティ多極子の可視化

研究分担者 網塚 浩

北海道大学大学院理学研究院 教授

本領域の活動を通じて、J-Physicsを基盤として明らかになりつつあるウラン系の5f電子による物性の本質的な理解をさらに深めていきたいと考えている。J-Physicsにおいて焦点を当ててきた伝導系における多極子自由度の役割に関する探求から、従来はあまり注目されていなかった奇パリティの多極子の重要性が浮き彫りとなった。この奇パリティ多極子の結晶中での存在形態としては、「ハイブリッド型」、「クラスター型」、「ボンド型」に分類され、速水らを中心に、結晶の対称性に依存してどのような多極子が活性化し、どのような交差相関応答が予見されるかが理論的に整備された[1,2]。

特にウラン化合物においては、空間反転対称性を欠いたサイトでのパリティ混成によりハイブリッド奇パリティ多極子が活性化することが予見される。典型的な重い電子系超伝導体の UBe_{13} や UPt_3 、強磁性（もしくはその揺らぎ）と超伝導が共存する UCoGe 、 URhGe 、 UGe_2 、 UTe_2 、隠れた秩序を示す URu_2Si_2 （秩序に伴い局所的パリティ対称性が破れる可能性が議論されている）やごく最近見出された URhSn など、未解明の電子状態を持つ興味深い物質は全てUイオン広義のジグザグ構造を組むという共通の特徴を持っており、局所的パリティ混成がこれらの異常物性に本質的役割を果たしていることが期待される。

このような背景を踏まえ、ウラン系に焦点を当て、ハイブリッド型の奇パリティ多極子が活性化する典型例を実験的に観測することを目指している。その手始めとして現在、正方晶 CaBe_2Ge_2 型構造をとる UPt_2Si_2 に注目している。この系ではUサイトに1次の結晶場が作用し、また、Ptの原子層に室温付近で格子不整合なCDW秩序が生じる。このCDWを利用し、通常は制御できない配位子状態の変化が5f電子状態に与える影響をUやPt吸収端

での共鳴X線散乱および中性子散乱を用いて波数分解して調べることで、5f電子状態に関する情報を得ることを狙っている。これまでの実験から、5f電子軌道のCDWによる変調を観測し、局所的パリティ混成の傍証を掴みつつある（図1）[3-5]。今後は領域内連携を通じて測定手法を工夫するとともに、理論家との議論を深めることで、5f電子物性のブレークスルーを目指したい。

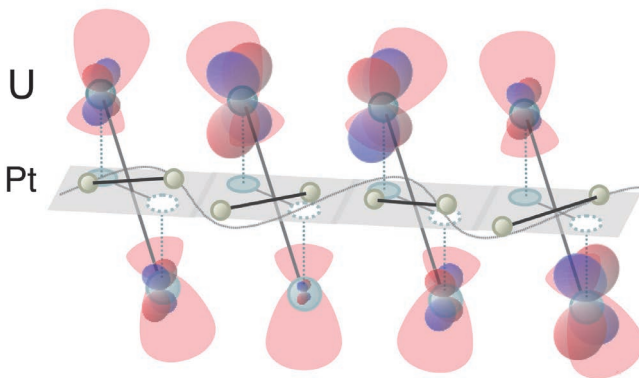


図1 共鳴X線散乱実験によって観測された URu_2Si_2 におけるCDW秩序によって誘起された電気四極子密度波と予想される局所的パリティ混成状態の概念図 [5]

- [1] S. Hayami and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033709 (2018).
- [2] M. Yatsushiro, H. Kusunose, and S. Hayami, Phys. Rev. B **104**, 054412 (2021).
- [3] F. Kon *et al.*, SciPost Phys. Proc., **11**, 011 (2023).
- [4] F. Kon *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. in press.
- [5] 今 布咲子, 北海道大学, 2024, 博士学位論文.



「アシンメトリ量子」観測のための 共鳴X線散乱の手法開発

研究分担者 中尾 裕則

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 准教授

放射光を用いた共鳴X線散乱(RXS)手法は、前世紀に日本で開発され、それまで観測が困難とされていた軌道・電荷の秩序状態が観測できるということで、世界的に利用されるようになった。さらに今世紀に入ると、本領域の研究対象でもある $3d$, $4f$ 電子系の $3d$, $4f$ 電子状態が直接観測可能($3d: L_{2,3}$ 吸収端 $2p \rightarrow 3d$ 遷移、 $4f: M_{4,5}$ 吸収端 $3d \rightarrow 4f$ 遷移)となる軟X線領域での研究展開が進んだ。その結果、単に直接的に狙いの電子状態の観測ができるというだけでなく、その共鳴信号は桁違いに強く、容易に磁気信号が観測されることが報告されるとともに、非弾性散乱実験へと更なる発展をし、スピン波や電子励起の分散関係の観測が実現された。これらはRXS研究のスタート時には、全く予想していなかった結果である。

この強い共鳴信号を利用した研究展開として我々が始めた研究の1つが、磁気スキルミオン格子などの磁気テクスチャの観測である。長周期の磁気構造の観測のため、試料を集束イオンビーム(FIB)加工により薄片化し、軟X線が試料を透過する配置での小角散乱の測定を試みた。X線照射した面積 $4\mu\text{m}\phi$ 、厚さ 200nm という微小体積試料であったが、その磁気信号は極めて強いだけでなく、高いQ分解能での観測に成功した。また、この実験を通じて、我々の放射光施設(PF)においても、コヒーレンスを利用した実験も可能であることが明らかとなり、その後のコヒーレント回折イメージング法による磁気イメージング研究に繋がっている。

またRXSは、様々な物性の背後に存在する秩序変数である電気・磁気多極子の観測に有効な手法であるが、双極子遷移(E1)では、rank-2までの多極子、四極子遷移(E2)を用いることで、rank-4までの多極子の観測ができると考えられてきた。ところが最近、X線磁気円二色性(XMCD)によるスピン磁気モーメント・軌道磁気モーメントの定量決定時に邪魔となっていた T_z 項を通じて、高次の多極子がE1遷移で観測可能であることを見い出すとともに、 Mn_3Sn の異常ホール効果の起源と指摘されていたrank-3の磁気八極子が、E1遷移であるXMCDの T_z 項を通じて観測できることを実証した。

このような背景のもと、以下の2つの方向で、RXSの手法開発を目指している。(1) 本領域では新たな交差相関応答の開拓を目指している。すでに、理論的な様々な予言がなされているものの、ドメイン問題により信号が打ち消され観測できなかったり、観測できたとしてもその定量評価が困難だったりする。そこでA02班を中心に、FIB加工で単一ドメインを切り出し、ドメインの選択・制御をした上での精密物性測定が進められる。上述のように、FIB加工された微小試料での小角領域でのRXS測定には成功しているものの、秩序を反映した高角領域の信号を観測するための装置は開発中であり、この装置を利用したマクロ・メゾ領域のアシンメトリ量子(電気・磁気多極子)の可視化を目指す。(2) 序論からRXSの発展の歴史を振り返ってきたように、当初の予想を覆し、様々な研究の可能性が次々と広がってきた。科学の発展の歴史と同じであるが、やはり実験的に確かめ、それを積み重ねていくことが重要である。本領域を通じた共同研究で、様々な実験研究が進み、当初予想もしなかったような発見をすることを願うところである。また、測定しないとそのような発見はあり得ません。ぜひ、お気軽に声をかけてください。



アシンメトリ量子物質における 奇パリティ多極子の観測

研究分担者 松村 武

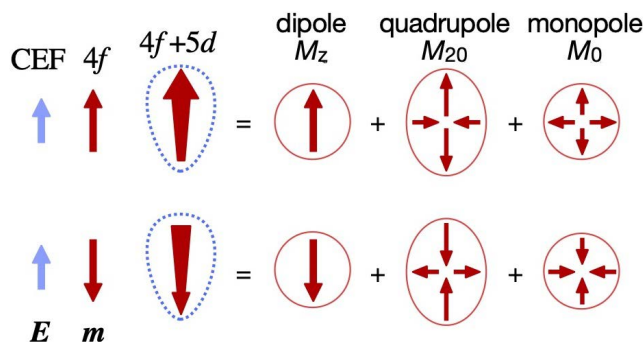
広島大学大学院先進理工学科学研究科 教授

空間反転対称性や時間反転対称性が破れた非対称な空間では、本学術変革領域研究が研究対象とする様々な非対角物性応答が発現します。それを系統的に理解する鍵となる概念が、空間反転に対して奇の変換性をもつ奇パリティ多極子です。

電荷、磁気双極子、電気四極子、磁気八極子など従来型の偶パリティ多極子と合わせれば、物質中の電子が創り出す非対称な電気磁気状態を正確に記述できることがわかっていますが、実測例がほとんどありません。これまで偶パリティ多極子の研究でなされてきたように、物性に対応する秩序変数を直接観測するような形で奇パリティ多極子の実体を秩序変数としてミクロに観測した例がないのです。A01量子ビーム班の目標はこれ、つまり、アシンメトリ量子物質における奇パリティ多極子の観測です。典型例となりそうな物質や、本学術変革領域で見いだされた新規物質を対象に、理論班からは着眼点を学びながら、目標に向かって進んでいきたいと考えています。

放射光を利用した共鳴X線散乱は特に強力な実験手法として期待されています。X線光子と原子内電子の共鳴過程において、p軌道($l=1$)からd軌道($l=2$)へ遷移するような $\Delta l=1$ の遷移をE1遷移、p軌道($l=1$)からf軌道($l=3$)へ遷移するような $\Delta l=2$ の遷移をE2遷移と呼びます。E1遷移で内殻電子が励起されて再びE1遷移で元に戻るE1E1遷移の場合、散乱因子はrank-0 (電荷), rank-1 (磁気双極子), rank-2 (電気四極子) の偶パリティ多極子に対する感度を持ちます。E2E2遷移ではrank-4までの偶パリティ多極子に対する感度があり、観測実績もあります。一方、奇パリティ多極子は非対称な環境で出現するものですから、E1E1遷移やE2E2遷移では観測されず、E1E2遷移を経た共鳴散乱の信号を検出しなければなりません。ここがそう簡単な話ではない難所です。非対称であってもE1E1遷移やE2E2遷移は普通にありますが、E1E2遷移だけを分離抽出し、しかも多極子の同定まで持つていくためにはいろいろな試行錯誤が必要です。ただ、その一端を捉えたと思われる実験結果もいくつかありますので、本研究ではまずそれを入念に検証し、観測手法の確立へとつなげていく計画です。

期待する展開の一つに、カイラルな金属磁性体におけるRKKY相互作用で、反対称項 (DM型相互作用) の元となる奇パリティ多極子の観測があります。典型は三方晶系に属する RNi_3X_9 ($\text{X}=\text{Al}, \text{Ga}$) だと思いますが、結晶構造のカイラリティ (掌性) とらせん磁気ヘリシティ (左巻きか右巻きか) が1対1対応しており、確かにDM型のRKKY相互作用が働いていることがわかります。このらせん磁性の起源をたどると、磁性イオンサイトの非対称性によって局所的にd-fパリティ



非対称な結晶電場中に生じた磁気モーメント

混成が起こっていることが根本にあると思われます。らせん秩序しているのは磁気双極子ですが、各磁性イオンには奇パリティ多極子が付随しているはずで、右結晶と左結晶ではらせん磁気ヘリシティが逆であると同時に、奇パリティ多極子の符号も逆ではないかと思っています。どの奇パリティ多極子の符号が逆なのかまで明らかにできれば、カイラル磁性に対する理解も少し深まるのではと期待しています。



「物質 + 中性子 + 放射光X線 = アシンメトリ量子」を目指して

研究分担者 岩佐 和晃

茨城大学フロンティア応用原子科学研究センター 教授

アシンメトリ量子の可視化を目指すA01計画班員として、量子ビームのマルチ利用に基づく研究を進めています。ミクロな構造対称性を決定する一般的な手法であるX線や中性子線の散乱を主な測定手段としており、本領域に参加して多彩なアシンメトリ量子の物理的性質を明らかにすることが目標です。

本拠地である東海村の近隣にあるパルス中性子施設J-PARC、研究用原子炉中性子施設 JRR-3、およびKEK放射光施設を主な舞台として研究を展開しています。茨城大学では、JRR-3ガイドホールのT1-1ビーム孔に設置されている三軸型中性子分光器HQR (<https://sites.google.com/g.ecc.u-tokyo.ac.jp/t1-1>, 写真参照)の管理運営を、東京大学物性研究所中性子科学研究施設より任していただき、フレキシブルに中性子ビームを扱える環境にあります。入射エネルギーが13.5 meVに固定された装置ではありますが、比較的到低バックグラウンド測定が可能で、1 mm程度の大きさの単結晶Eu化合物や、Gdを含む化合物の平板面からの磁気相転移を捉えることにも成功しています。また本装置を茨城大学大学院理工学研究科量子線科学専攻における実習カリキュラムなど教育にも用いており、微力ながら次世代人材育成の新しい試みを行っております。研究室には6名の学生が在籍しており、彼らとともにこれらの量子ビーム施設を行ったり来たりの日々を送っています。

最近の研究としては、Remeika相物質群 $Ln_3Tr_4X_{13}$ (Ln: rare earth, Tr: transition metal, X = Ge, Sn)におけるカイラル結晶構造相転移による自発的な反転対称性の破れがもたらす電子状態を対象としています。たとえば $Ce_3Tr_4Sn_{13}$ (Tr = Co, Rh, Ir)は重い電子系とされてきた物質ですが、低温ではカイラル対称の結晶構造相に相転移することを放射光X線散乱で見出しました。さらに中性子散乱を用いて、カイラル対称構造相転移によって独立な2サイトに分かれたCe4f電子の結晶場分裂準位を観測しました。その一方が比較的強い近藤効果を示しており、放射光X線光電子分光でもc-f混成効果が明らかとなりました。さらに低エネルギー磁気励起の観測と比熱との比較から、重い電子に見える強相関電子状態がカイラル構造での非反転対称によってもたらされる線型分散をもつWeyl-Kondo半金属状態であることを示すことに成功しました[Physical Review Materials 7, 014201 (2023)]。また、これまで未知であった様々なRemeika相物質群の構造相転移を発見しており、それぞれの低対称構造で特徴づけられる低温相で超伝導や磁気秩序が出現するため、自発的にアシンメトリな格子空間となる物質での物性現象が期待できます。たとえば都立大との共同研究により $Y_3Rh_4Ge_{13}$ のカイラル対称構造での超伝導を報告しました[Journal of Alloys and Compounds 172914 (2023)]。

上記のような中性子と放射光X線散乱を用いた共同研究により、アシンメトリ物質の拡張多極子構造物性や対掌ドメイン構造の可視化などを学術変革領域で推進していこうと思っています。今後ともよろしくお願いいたします。





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

内殻光電子線二色性を中心とした 偏光依存光電子分光による 強相関軌道対称性の可視化

研究分担者 関山 明

大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

A01 班のなかで私達のグループは、内殻光電子線二色性を中心とした偏光依存光電子分光によって、主に単サイトおよび実空間における強相関軌道対称性を解明して可視化する研究を進めています。光電子分光は電子のエネルギー分析を目的として用いられていることは広く知られていると思います。ここで、励起光のX線が直線偏光あるいは円偏光の場合、軌道やバンドの対称性の違いによってスペクトル強度が変化する二色性が観測され、これにより軌道対称性を可視化することが可能です。量子ビームの代表例とも言える放射光はその発生機構から高い偏光性を有します[1]。よって、物質の光物性研究で軌道対称性まで可視化する場合、放射光を用いた実験が必要不可欠となります。

さて、質量 m_e の電子の電荷を $-e$ 、運動量を $\vec{p}$ 、電子系のハミルトニアンを $\mathcal{H}_e$ とします。照射光のベクトルポテンシャルを $\vec{A}$ とすると、光照射下における電子系のハミルトニアンは半古典論の範囲で $\mathcal{H} = \mathcal{H}_e + (e/m_e)\vec{A} \cdot \vec{p} + \{e^2/(2m_e)\}|\vec{A}|^2$ となります[2]。つまり、電子系ハミルトニアン $\mathcal{H}_e$ に加えて光と電子の相互作用の項が出てきて、通常はこれらの項を摂動として扱います。ここで、X線吸収や光電子放出の殆どは一光子過程ですので $(e/m_e)\vec{A} \cdot \vec{p}$ 項だけで現象を記述できます。この項については、電子の座標を $\vec{r}$ 、励起光の波数を $\vec{q}$ 、偏光(電場)方向の単位ベクトルを $\vec{e}$ として $(e/m_e)\vec{A} \cdot \vec{p} \propto e^{i\vec{q} \cdot \vec{r}}(\vec{e} \cdot \vec{p}) = (1 + i\vec{q} \cdot \vec{r} + \dots)(\vec{e} \cdot \vec{p})$ となります[3]。ここで偏光方向を表す e が入ってきますから、単結晶試料のX線吸収や光電子分光を行うときに直線偏光を用いると、偏光方向に対する何らかの角度分布・依存性を生じ得ます。その結果、強相関電子系においては価電子ではあっても元の原子軌道の性質を色濃く残している(その最も端的な例が $4f$ 電子系といえるでしょう)ことから、電子分光の二色性から軌道対称性について議論できます。

私達がこれまで進めてきた内殻光電子線二色性について、詳しいことやこれまでの成果は他のメディア[4, 5]にゆずることとしますが、今回のニュースレターで最近の成果である CeNi_2Ge_2 の電子分光二色性[6, 7]を藤原秀紀さんが紹介してくださっています。内殻光電子線二色性による実空間軌道対称性の解明では、これまで主にCe, Pr, Yb系でいくつか成果を得ることができました([5]でも紹介しています)。本学術変革領域においては、本手法を発展させ、(どこまで可能か現時点でわからないが)いわゆる拡張多極子のように希土類マルチサイトに渡った効果を二色性観測でなんとか可視化できないかも挑戦したいと思います。よろしくお願いします。

[1] 動画「なぜ放射光が偏光性・指向性・短波長性を有するかを説明してみた」<https://youtu.be/24-8Cu9vyU>

[2] 動画「電磁場中電子のラグランジアンとハミルトニアン(板書の改訂版)」<https://youtu.be/Qg0NMZUbBF0>

[3] 動画「光の量子化からフェルミの黄金律まで一気に説明してみた」<https://youtu.be/gLtWR1Ev0EQ>

[4] 関山明ほか, 放射光 **33**, 177 (2020). <http://www.jssrr.jp/journal/33-3.html>からダウンロード可能。

[5] 動画「(角度分解)内殻光電子線二色性を講義してみました: これで「局在電子のカタチ(軌道対称性)」が分かります」
<https://youtu.be/G0MgBus2l4E>

[6] H. Fujiwara *et al.*, Phys. Rev. B **108**, 165121 (2023).

[7] 動画「【字幕付】超伝導になる電子のカタチが見えた! (2023年10月プレスリリースの研究成果を紹介)」<https://youtu.be/8G76Z1lp7hs>



超音波による交差相関応答の多角化

研究代表者 柳澤 達也

北海道大学大学院理学研究院 教授

超音波は金属・絶縁体・超伝導体にかかわらず、弾性波として固体試料中を伝播し、電子-格子相互作用を通してバルク試料中の静電ポテンシャルに摂動を与え、歪み場と同じ対称性とパリティを持つ電気多極子の応答を感受率として分光学的に捉えることができるユニークな手法です。超音波吸収と周波数依存性は複素弾性率として、電子系・格子系の動的応答も検出できます。この従来の超音波の手法に磁場回転・電流・一軸圧力などの複合的外場を組み合わせ、拡張多極子の検出を試みるのが私の研究の眼目です。

計画研究A02の木俣氏が開発した二軸回転ゴニオプローブ (TARO) [1]は、磁場を印加したまま低温で磁場方向を自在にアライメントできる従来の二軸ゴニオの機能をそのままに、ステッピングモーターによる半自動制御によって精密かつ効率良く実験データを取得できる優れモノです。本学術変革の初年度はPPMS向けに再設計されたTARO (図1) を北海道大学に導入しました。PPMS側の仕様は磁場 ± 14 T, 温度範囲 2–340 Kで、ヘリウム再凝縮装置が付いているため実験に集中できます。プローブには同軸線が2本搭載 (将来的に計4本まで拡張) されており、低温で回転してもインピーダンス 50Ω の特性を保つことを確認しているため超音波のみならず様々なRF測定に利用できると思います。

今後はTAROを用いて多様なアシンメトリ量子物質の強磁場下・電流下における交差相関現象を検証していきます。克服すべき課題はドメインの影響を排除し、微弱な交差相関応答を増強し感度を上げることであり、それを達成するために微細加工や表面弾性波を用いたドメイン制御にも挑戦していきたいと考えております。

尚、本装置は北海道大学の先端物性共用ユニット (APPOU) と機器共用管理システム [2] に載せ、外部ユーザの方にも開放するように整備する予定ですので、共同利用にご興味のある方はご連絡いただければ幸いです。

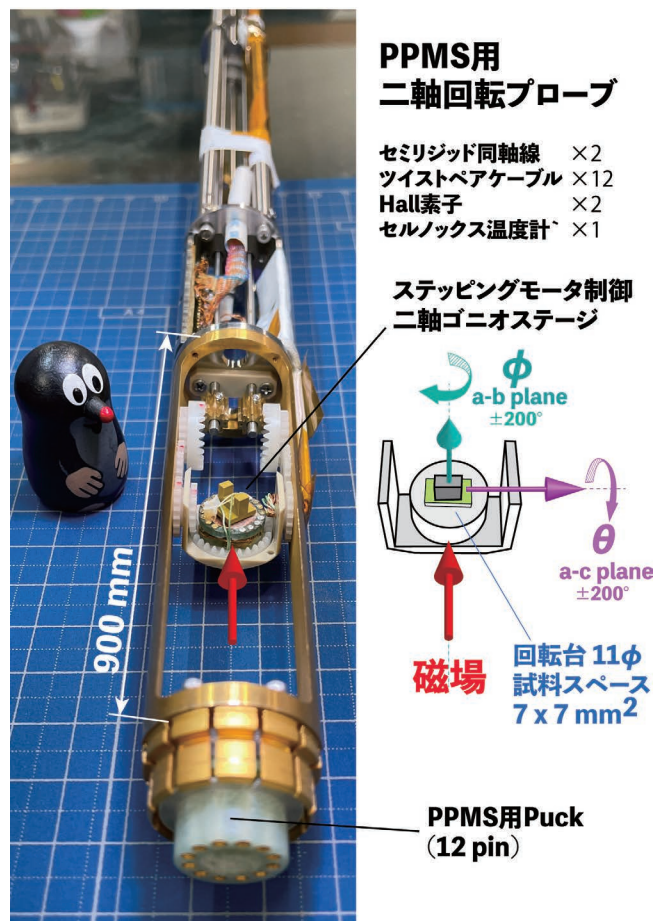


図1 北大に導入されたPPMS用二軸回転プローブ

[1] M. Kimata *et al.*, Appl. Phys. Lett. **116**, 192402 (2020)

[2] 北海道大学グローバルファシリティセンター, <https://www.gfc.hokudai.ac.jp>



アシンメトリとの出会い

研究分担者 小林 達生

岡山大学大学院環境生命自然科学研究科 教授

2000年に UGe_2 の強磁性超伝導が見つかった。[1] その論文の中で、結晶構造の反転対称性が $|\mathbf{k}, \uparrow\rangle$ と $|\mathbf{-k}, \uparrow\rangle$ 状態の縮退を保証すると書いてあった。 MnSi は反転対称性がないので超伝導にならないらしい。そして、異方的なギャップをもつ超伝導では、結晶の純良性が重要だと・・・他にもいろんなことが述べられていたが、覚えていない。(多分理解できなかった。) そんな頃、大貫研で強磁性体 Ulr の純良単結晶 ($\text{RRR} > 100$) が育成された。これが初めてのアシンメトリとの出会いである。 Ulr は反転対称性がなく MnSi と同じ事情だが、その当時、ポスドクで天谷研に在籍していた赤澤氏が超伝導を見つけた。ただ、相図がややこしくFM1-3の三相があって、FM3の臨界点で超伝導が現れる。(論文で初めて対称性という言葉を用いたら、物理学者になった気がした。) 何度やっても超伝導が出るので本質的だとは思ったが、マイスナー効果が小さい。その後、圧力媒体をダフネ7373から7474あるいは石油エーテルに変えてみると、なんとFM3が超伝導もろとも消えてしまった。FM1-3は微妙に異なる結晶構造で起きており、ダフネ7373ではFM3の構造が生き残るらしい。静水圧性を良くする努力はできるが、このような事情で断念せざるを得なかった。この辺りの実験は小手川氏を中心に行われて論文にまとめられている。[2] 最近、この話がどうなったのか聞いてくる人がいたので振り返ってみた。

次のアシンメトリは $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ である。室温では立方晶で空間反転対称性があるが、 T_{s1} 以下で反転対称性が消滅して、低温($\sim 1\text{K}$)で超伝導転移が起きる。高圧下で反転対称性が復活したら、超伝導はどうなるんだろう? 実験してみると、これまた複雑な相図が得られた。[3] T_c は2倍程度だが、 H_{c2} が40倍になる。なぜ反転対称性が復活すると H_{c2} が大きくなるのか、全くわからなかったが、Fu氏らの理論によれば、高圧下ではp波になっている可能性があるという。超伝導はさておき、 T_{s1} 以下で磁気電流効果や非相反伝導などのアシンメトリ効果が現れることが理論的に予測されている。[4] T_{s1} 以下ではマルチドメインなのがややこしいが、ピエゾに貼って応力を加えると、シングルドメインになることがわかっている。さあアシンメトリ効果を見つけよう。

最近のアシンメトリは $\alpha\text{-Mn}$ である。これも空間反転対称性がない。高圧下で新しい磁気秩序相が現れるのは阪大時代に見つけていた。近年純良単結晶が得られて研究を再開すると、その磁気秩序相で自発磁化が現れた。その後の研究で、スピン構造はフェリで、異常ホール効果が現れることがわかった。[5] ここでもアシンメトリ効果が期待される。

これらの研究で用いられた高圧セルや希釈冷凍機は自作である。希釈冷凍機を自作しようという人はいないかもしれないが、インデンターセルは小さい、安い、簡単と三拍子そろったおススメの高圧セルである。今まであまり宣伝していないが、興味がある人は声をかけてください。

[1] S. S. Saxena *et al.*, Nature **406**, 587 (2000).

[2] H. Kotegawa *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 054524 (2011).

[3] T. C. Kobayashi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 023715 (2011).

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

[5] K. Akiba *et al.*, Phys. Rev. Research **2**, 043090 (2020).



アシンメトリ量子物質の可視化：開拓と深化

研究分担者 井澤 公一

大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

A02では、マクロ物性の精密測定によるアシンメトリ量子物質の可視化が主なミッションになっています。この可視化に2つの意味があると捉え、以下のように研究を進めようと考えています。

アシンメトリ量子物質では、対称性の破れに応じて様々な多極子自由度が活性化され、それに伴う交差相関応答が期待されます。これら多極子自由度および交差相関応答を観測する研究手法を開発し、新規アシンメトリ量子物質や新規交差相関応答を開拓することが1つ目の意味の可視化です。

近年、4種類の多極子自由度に基づく完全基底が整備されたことにより、物性物理における多彩な現象や応答が見通しよく記述され、整理できるようになってきました[1]。この（拡張）多極子の概念により具体的な理論予測・提案がしやすくなりましたが、残念ながらそれに応えられるほど実験手段は十分整備されている状況にはなく、その進展が重要な鍵を握っています。我々はこれまで磁気トロイダル双極子秩序が実現していると考えられる UNi_2B および HoAgGe を対象に金属特有の交差相関応答として電流誘起ホール効果や非相反伝導の探索・観測に取り組んできました[2]。本プロジェクトで我々は、B01との連携のもと拡張多極子の概念を大いに活用し、さらに熱流や歪み場といった他の外場に対する応答にも対象を広げて可視化（開拓）を進めたいと考えています。さらに、これまで取り組んできた実験手法にあまり固執せず、可視化が実現可能と期待できる試料や手法があれば、積極的かつ柔軟に取り入れ、A01、C01、C02との連携のもと、アシンメトリ量子物質の多角的な可視化を推進したいと思っています。

上述の拡張多極子の概念に基づくアプローチは、新規アシンメトリ量子物質や新規交差相関応答の開拓のための重要な指針を与えます。しかしそのような対称性の議論だけでは、どのような応答が発現し得るかは明らかになっても、実際に観測にかかるような大きさなのか、またどのような状況（物質）で大きくなるのか、といった定量的な発現メカニズムは明らかにはなりません。また、ひとたび観測に成功すると対称性の議論の範囲ではそれを指針とした実験で得られる結果はほぼ自明となり、単なる検証になってしまいかねません。アシンメトリ量子物質の新機能開拓につなげるためには、定量的な議論を可能とし、微視的理解につながる非自明な知見を見出せるにまで実験手法を深化させる必要があります。これが2つ目の意味の可視化です。

これに関して我々は、収束イオンビーム（FIB）による微細加工を施した試料を用いて交差相関応答の定量化や非線形伝導テンソルの各成分の評価、ドメインの可視化・制御に取り組もうと考えています。また、走査型磁気顕微鏡などを用いた直接的な観測も併用することで、より多くの知見獲得を目指したいと考えています。このような深化により得られた結果はB01の現象論構築を始めとした微視的理解に貢献できると考えています。その他、別のアイディアに基づいた実験もいくつか計画していますが、ここではあえて書かず、しっかり結果を出した上で、このNewsletterに報告したいと思います。

[1] S. Hayami, M. Yatsushiro, Y. Yanagi and H. Kusunose, Classification of atomic-scale multipoles under crystallographic point groups and application to linear response tensors, Phys. Rev. B **98**, 165110 (2018).

[2] K. Ota *et al.*, Zero-field current-induced Hall effect in ferrotoroidic metal, arXiv:2205.05555.



FIB微細加工を用いた アシンメトリ量子物性の開拓

研究分担者 木俣 基

東北大学金属材料研究所 准教授

本研究では、集束イオンビーム(Focused ion beam: FIB)による微細加工を用い、さまざまなアシンメトリ量子物質の交差相関応答を開拓します。FIBはナノメートルスケールに細く絞ったイオンビームを試料に照射してスパッタリング現象を引き起こし、試料を局所的に削ることのできる装置です。従来は主に、半導体デバイス回路の破損箇所の特定や補修、透過電子顕微鏡用の薄片試料の作製に用いられてきました。

一方で近年、FIBを用いて単結晶を微細加工し、電気物性測定等に適用する手法が発達しています[1, 2]。この手法ではバルクの単結晶から直接的に微細加工を行うため、広範な物質群を対象とできる点が大きな利点の一つです。すなわち、様々な手法によって合成された単結晶試料の品質を保ったまま微細素子化し、その新規物性を最大限に引き出すことが可能となります。

本研究領域で対象とする交差相関応答の一例に非相反電気抵抗などの非線形伝導現象が挙げられます。このような現象は、大きな電流密度で測定することが感度の増大に繋がります。FIB微細加工では試料の線幅をサブミクロン程度まで細くできるため、通常のバルク測定の試料サイズ(~100 μm)に比べて10000倍程度の電流密度での実験が可能となり、測定感度の大幅な増大が実現します。

図1にFIBを用いて作製した電気抵抗測定素子の一例を示します。SEM像の緑の部分が素子の心臓部であり、この素子では電流方位の異なる二つのホールバーから構成されています。この図のように、試料の形状を精密に制御できる点もFIB微細加工の特徴であり、ホール抵抗や電気抵抗率の精密な異方性測定やそれを用いたフェルミ面の対称性破れの検出などにも有効であると考えられます。

また自発的な多極子秩序によって対称性が破れる場合、符号の異なるドメインの存在が一般に予想されます。

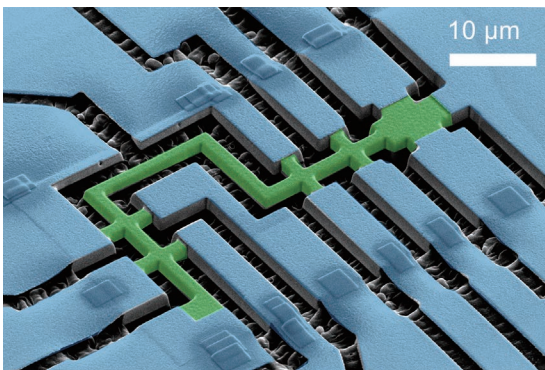


図1: FIB微細加工によって作製した素子の一例。緑の部分が抵抗測定部分であり、電流方位の異なる二つのホールバーから構成されている。また青い部分は結晶表面や基板上のAu薄膜を示している。

このような場合ではドメインサイズよりも大きな試料では試料全体として交差相関応答の打ち消しあいが起こると考えられ、応答の定量評価の妨げになると考えられます。この問題を回避するにはシングルドメインでの実験が必須であり、FIBによる試料の微細化はこの点においても威力を発揮することが期待されます。

上記のようにFIB微細加工を用いた実験はアシンメトリ量子物質研究のさまざまな局面での有用性が期待されます。本領域に関連する多くの共同研究を通して未解決課題の解明や新物性の開拓に貢献していきたいと考えています。

[1] P. J. W. Moll, *et al.*, Nature **535**, 266–270 (2016).

[2] M. Kimata, *et al.*, Nature **565**, 627–630 (2019).



磁場角度分解歪み・熱物性測定による アシンメトリ量子物質の新機能開拓

研究分担者 橘高 俊一郎

中央大学理工学部 准教授

2020年4月、助教として10年間過ごした東大物性研から中央大学に異動し、東京ドームに隣接する後楽園キャンパスで研究室を立ち上げました。我々のグループでは極低温における精密マクロ物性測定（比熱、磁気熱量効果、磁歪など）を得意としており、オリジナルの実験装置や測定技術の開発・発展にも精力的に取り組んでいます。独自のアプローチでアシンメトリ量子の可視化に挑みたいと意気込んでおりますので、皆様どうぞよろしくお願いします。

主力装置は希釈冷凍機とベクトルマグネットで、柏から一緒に後楽園へと引っ越してきました。本装置により、極低温で磁場方位を精密制御しながら物性測定を行うことが可能です。一方、中央大学にはヘリウム液化施設がなく、着任当初はヘリウム価格の高騰も重なって肝心の極低温実験は気軽には行えない状況でした。この問題は、100%リサイクル可能なヘリウム再凝縮装置を2021年度末に導入することで解決しました。現在は中央大学でも極低温実験を行うことが可能となり、助教の河野洋平氏をはじめとする研究室メンバーと共に様々な研究テーマに取り組んでいます。

希釈冷凍機を使用することができなかった期間は、装置開発や測定技術の高度化に努めてきました。例えば、静電容量を通して試料の歪み（伸縮）を精密測定できる自作のキャパシタンス式膨張計の高感度化・小型化に力を入れ、最終的にサブピコメートルの分解能を達成しました（図1）。本領域発足後、開発した膨張計を用いてCeCoIn₅のc軸周りの磁場下で超伝導状態を調べたところ、c軸（a軸）方向の試料長が上部臨界磁場近傍で2段（単一）の相転移を示すことを見出しました。この異方的な磁歪変化は磁場を回転させながら測定することでより明確に検出できます。以上の結果は、空間変調ベクトルがc軸に平行なFFLO超伝導シナリオを支持すると考えられ、論文にまとめて公表しました[1]。桐越・速水論文では、同様の磁歪測定からフェロアキシシャル秩序に起因する回転応答を検出できる可能性が提案されており[2]、本測定手法を用いた今後の研究発展に期待しています。

他にも、磁場角度分解比熱・エントロピー測定から多彩な秩序状態の可視化にも力を入れています。最近の成果として、PrIr₂Zn₂₀の反強四極子秩序相境界近傍に磁場誘起秩序相が存在することを明らかにしました[3]。この磁場誘起相ポケットはMnSiのスキルミオン相（A相）とよく似ており、多極子版の多重Q秩序相の候補としても期待しています。

アシンメトリ状態では、電流（電場）・熱流・歪み・磁場など、様々な外場に対する交差相関応答や非相反現象が理論面から予測されています。最近、圧力下交流比熱の精密定量測定技術の開発に取り組んでいます。その技術を非相反熱伝導率測定に応用できるのではないかなど、アシンメトリ量子現象を検出するための測定手段についても想像を膨らませています。共同研究を積極的に行って本領域の発展に貢献していきたいと考えておりますので、お気軽にお声かけ頂ければ幸いです。



図1：自作のキャパシタンス式膨張計。

[1] S. Kittaka *et al.*, Phys. Rev. B **107**, L220505 (2023).

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

[3] S. Kittaka, T. Onimaru *et al.*, submitted.



多極子秩序の再現と予測

研究代表者 大槻 純也

岡山大学異分野基礎化学研究所 准教授

「なぜ多極子秩序が起こるのか」と聞かれれば、私なら「エントロピーを消失するため」という答えが思い浮かびます。f電子の持つスピンと軌道の自由度が残っている基底状態が縮退を持ち不安定なので、秩序化をしてエントロピーを消失する必要があります。しかし、一歩踏み込んで、「なぜ反強磁性ではなく反強四極子秩序が選ばれるのか」というような具体的な問いになると、一般的な答えは難しくなります。

例えば、多極子秩序を示す典型物質であるCeB₆では、 $T_0 \approx 3\text{K}$ 以下において反強四極子秩序が起こり、さらに低温で反強磁性が起こります。これをエントロピーの観点から見ると、結晶場の元でスピンと軌道の自由度により4重縮退をしているf電子状態（エントロピー $S = Nk_B \ln 4$ を持つ）が、反強四極子秩序により軌道の縮退が解けて2重縮退まで落ち（ $S = Nk_B \ln 2$ ）、さらに反強磁性によりスピンの縮退が解けて $S = Nk_B \ln 1 = 0$ まで落ちると説明できます。一方で、なぜ反強磁性よりも反強四極子の秩序が高温で起こるのか、なぜ強制的でなく反強的なのか、を考えるには微視的な相互作用の起源を考える必要があります。

f電子の多極子秩序の起源はRKKY相互作用ですが、実際にどんな多極子相互作用が大きくなるかは化合物依存で、一般的なことは言えません。f電子系と比べるとd電子系の相互作用は考えやすいと思います。その違いは、実空間か波数空間かにあります。d電子系の場合には、実空間において電子が原子の間を移動するパスを考えます。遷移金属の間を直接移動すれば反強磁性相互作用が生じ、間にある別のイオンを経由した場合にはその幾何学的配置によって相互作用が変化する、といった具体です。したがって、結晶構造を眺めていると、どのような秩序が起こりそうかイメージが湧きます。それに対して、f電子系の多極子秩序を引き起こすRKKY相互作用は波数空間で考えるのが自然です。RKKY相互作用が、伝導電子の電子・正孔対の励起により媒介されるため、フェルミ面の構造を強く反映するからです。ところが波数空間で描かれたフェルミ面をいくら眺めても多極子秩序はイメージできません。どのような波数・軌道成分の相互作用が大きくなるかは「計算してみなければわからない」というのが現状です。しかし、計算できるようになってきたのは最近のことで、これは重要な進展です。

私は大学院入試の面接で志望動機を聞かれたときに、「エネルギーバンドやフェルミ面から物性がどう決まるのか知りたい」と答えた気がします。エネルギーバンドが与えられれば、マクロな物性が決まります。実際は、電子構造計算では十分考慮されていない多体効果が効くため自明ではないですが、原理的には、電子構造からすべての物性が決まっているはずで、「計算できる」を出発点としてさらなる「理解」を目指します。

本計画研究における私の役割は、多極子秩序に関連した物理量の定量計算法を確立することです。そのためにまず、私が最近取り組んでいる動的平均場法による多極子秩序の第一原理計算 [1] を、より広範な化合物に適用して精度を検証します。その際、クラスター多極子を含む多極子の完全基底 [2] を用いることで、電荷・スピン・軌道の揺らぎを網羅的に導出します。この段階で記述がうまくいく物質・うまくいかない物質の経験則がわかってくるはずです。この知見を元に、ハイスループット計算による物質設計へと繋げていきます。

[1] J. Otsuki, K. Yoshimi, H. Shinaoka, and H. O. Jeschke, arXiv:2209.10429.

[2] H. Kusunose, R. Oiwa, and S. Hayami, Phys. Rev. B **107**, 195118 (2023).



非対称性の織りなす舞台の有効理論模型の構築と解析

研究分担者 服部 一匡

東京都立大学理学部 准教授

東京都立大学の服部と申します。B01班の分担者としてぜひこの機会に多くの人と議論して面白い結果に会えることを期待しています。私のB01班の中での役割は、電子や結晶構造などの様々な自由度がもつ対称性の基礎理論をベースにし、B01班の研究者と協力してこれまでに知られていない量子状態・秩序状態を有効理論を構築することで探索し、種々の応答などを提案することです。また、他班の実験結果の解釈などにも積極的に関わっていきたいと思っていますので、どうぞよろしくお願いいたします。

この20年ほどで、超伝導の対称性、多極子、トポロジカル絶縁体などのさまざまな「分類学」が整備されてきました。多くの日本人がそれらに携わってきたことはご存知のことかと思いますが、一方で、それらは大論文で全てを読み切ることが難しいので、どのように結果を用いれば良いのか、もしくはどこに知りたい情報が埋もれているのかわからず途方に暮れている人が（私を含めて）多いかもしれません。研究を始めたばかりの学生さんであれば尚更です。少し前までは、いくつかの初等的な連続群と点群さえわかっていたら御の字だったものが、現在では空間群やトポロジーの理解が求められるようになってきました。本領域の研究対象と目標は「さらにその先」ということです。そんなことが可能なのか知る由もありませんが、まずは地道に現在問題となっているものから手をつけて、大きな目標まで試行錯誤しながらやっていくしかないと感じています。

最近の私の主要なテーマは、主に電気四極子の統計力学的模型の解析とその秩序による交差相関の解析などでした。2022年度に博士を取得した石飛氏（原研先端研）との共同研究によるURhSnのカイラル四極子秩序や、UNi₄Bの解析などは、すでに本領域の研究会でも議論させていただきました。また、非整合波数のトリプル q 電気四極子秩序なども調べています。B01班の速水氏との最近の共同研究では、電気四極子と磁気双極子の複合秩序状態について調べました。これらの経験をもとに、以下のような課題について調べたいと思っています。

(1) 秩序により電流誘起磁化が発現する際のその特異な温度依存性の起源の解明

電流誘起磁化が見つかった物質で、その温度依存性が低温で急激に増大する現象が観測されています。この起源を探るために、現象論的“緩和時間”近似手法を超えた有限サイズ数値解析により調べようと思っています。

(2) 電気四極子-磁気（双極子）秩序による複合スキルミオン格子の解析

電気四極子の異方的相互作用は非整合波数のトリプル q 秩序を好む場合がありますが、この秩序は（半）ボルテックス結晶であり、その核の位置ではエネルギーが高くなります。その核周辺に残っている磁気的自由度が発現することで、さらに安定化し複合スキルミオン結晶が実現するのではないかと考えています。

(3) “局所カイラル”超伝導の物理

局所反転対称性のない（がグローバルな空間反転対称性がある）系での超伝導はこれまでも研究が行われてきましたが、最近注目されているカイラル結晶に関連して、右巻きと左巻きが混在した結晶における超伝導のミニマルな模型を作って解析してみたいと思っています。

以上、簡潔に方向性だけが記載させていただきました。上記のような内容に興味のある方は、ぜひ一緒に考えていただけると光栄です。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。



アシンメトリ量子物質に対する 基礎理論の構築

研究分担者 速水 賢

北海道大学大学院理学研究院 准教授

B01班「アシンメトリ量子物質の基礎理論と設計」に分担として参画している北海道大学の速水賢と申します。どうぞよろしくお願いいたします。

本学術変革領域研究で対象とするアシンメトリ量子物質では、電子系あるいは格子系の複合自由度が示す非対称性(アシンメトリ)が重要なキーワードになります。こうした複合自由度は、4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)からなる「拡張多極子基底」を用いることによって、系統的かつ見通しよく記述することができます。さらに、拡張多極子基底を用いることで、交差相関や非線形伝導を含む様々な物性現象の予測・理解が可能になります。我々はこれまでに、拡張多極子基底の一般論を構築することで、(A) $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ における電気トロイダル四極子秩序[SH *et al.* PRL (2019)]や URu_2Si_2 における交替的な電気トロイダル単極子秩序[SH and H. Kusunose, JPSJ (2023)]といった非自明な電子秩序相のミクロな形成機構、(B)多極子秩序下での電流誘起磁化現象[SH *et al.* PRB (2014)]や非相反伝導現象[SH *et al.* PRB (2022)]の開拓、(C) スピン軌道相互作用を必要としない新しいスピン分裂バンド機構の生成方法[SH *et al.* JPSJ (2019)]、(D) 一様磁化をもたない反強磁性体を示す異常ホール効果の解析[SH *et al.* PRB (2021)]などを行ってきました。

本領域研究では、これらの研究をより深化させるとともに、新しい対象にもどんどんとチャレンジしていきたいと考えています。特に最近になって興味をもって研究に励んでいる2つのテーマについて記します。

(1) フェロアキシャル秩序が示す物性現象: フェロアキシャル秩序は、空間反転対称性および時間反転対称性を保ちながら、結晶がもつ鏡映対称性の一部が失われる秩序です。多極子の観点からは、電気トロイダル双極子として表現されます。近年、こうしたフェロアキシャル秩序のドメイン観察・制御などが実験的に精力的に行われています。我々は、こうしたフェロアキシャル秩序のミクロな起源や、秩序状態が示す物性応答現象に興味をもって研究を行っています。最近では、電場方向に平行に生成されるスピン流[SH *et al.* JPSJ (2022)]や磁気トルクと関係する横磁化応答[A. Inda and SH, JPSJ (2023)]などを明らかにしました。

(2) 外場による多極子制御: 非自明な多極子秩序が外場のもとで、どのような交差相関応答を示すのか、また、どのようにして非自明な多極子自由度を制御するのかについて興味があります。最近では、磁気トロイダル単極子秩序のもとで、電磁場を印加すると、カイラリティの性質が現れることを明らかにしました[SH and H. Kusunose, JPSJ (2023)]。

上記に挙げたテーマ以外にも(3)磁気スキルミオンを含むトポロジカル磁性体の安定化機構や(4)多極子基底を用いた超伝導秩序変数の分類[A. Kirikoshi and SH, arXiv:2312.02410]、(5)交流電磁場を用いたスカラーカイラリティ制御[R. Yambe and SH, arXiv:2312.15891]など様々なことに興味をもっています。

多極子概念は、マクロな対称性およびミクロな電子自由度の両方と密接に関わっていることから、様々な物性現象を俯瞰的に捉える際に役立ちます。群論などの知識が必要になるため、少しとっつきにくいですが、身につけると強力な武器になります。色々な方に興味をもっていただけると大変嬉しいです。最後になりますが、せっかくの大きな研究コミュニティでの活動になりますので、ぜひこの機会を通じて皆様と深い議論や共同研究できることを願っています。若い学生や研究者の方々の札幌訪問・滞在も歓迎いたします。気軽にお声がけください。



アシンメトリ物質の定量記述に向けて

研究分担者 野村 悠祐

慶應義塾大学理工学部物理情報工学科 准教授

慶應義塾大学の野村と申します。B01班「アシンメトリ量子物質の基礎理論と設計」に分担として参画させていただいております。どうぞよろしくお願いいたします。

B01班の研究計画は、“A. 基礎理論”、“B. 現象論から定量的な記述へ”、“C. 物質設計”の3本立てから構成されています。私は、定性的な理解を与える現象論と、定量的な物性の理解・予測をつなぐ役割を担います。すなわち、“B. 現象論から定量的な記述へ”を中心として、“C. 物質設計”では常さんと協力させていただく形になります。

物質の対称性と、拡張多極子による展開を用いれば、どのような機能・応答が発現し得るのか、また、その機能・応答の発現にどのような種類の多極子が関与するのか、という点までは系統的に議論することができます。しかし、対称性の情報だけからは、応答が発現し得る際に、応答がどのくらいの大きさなのか、ということに関しては何もいうことができません。すなわち、定性的な議論はできるけれども、定量的な議論は難しくなってしまいます。

定量的な解析に重要な役割を果たすのが第一原理有効ハミルトニアン構築だと考えています。物質固有の微視的パラメータを第一原理計算によって求めた第一原理有効ハミルトニアンを解析することによって、個々の物質に対する機能や応答の定量計算が可能になります。

この20年ほどの間に第一原理有効ハミルトニアン導出のための計算手法が大きく発展しました。例えば、RESPACK(<https://sites.google.com/view/kazuma7k6r>)という国産のパッケージを用いると、現実的なタイトバインディングモデルや相互作用パラメータを見積もることができます。すでに、 $3d \cdot 4d \cdot 5d$ 電子系、有機導体・分子性結晶、非周期系（表面・界面）、など多くの適用実績があり、それらの物質群の定量的な解析に成功しています。幅広い物質群に適用可能ですので、もし面白い物質がありましたら、是非私までご連絡ください。

ただし、これまでの第一原理有効ハミルトニアンはワニエ関数を基底としてパラメータが定義されていました。機能や応答をより見通しよく記述するために、多極子基底で表現した第一原理有効ハミルトニアンや、多極子間相互作用の見積もり（これまで磁気双極子間の相互作用は見積もられてきましたが、一般の多極子の場合にはまだ方法論が確立していません）などに挑戦していきたいと考えています。

前身のJ-Physicsには参加していませんでしたので、初めましての方も多いと思いますが、研究会などで見かけたら気軽に声をかけてくださると嬉しいです。共同研究も大歓迎です。どうぞよろしくお願いいたします。



第一原理計算に基づく アシンメトリ量子物質の設計にむけて

研究分担者 是常 隆

東北大学大学院理学研究科 教授

東北大学の是常と申します。どうぞよろしくお願いいたします。

私は、B01計画研究の中でも、最も物質設計寄りのところを担当します。多極子による分類学をもとに、交差相関を含む様々な外場に対する応答を定量的に評価し、実験グループに候補物質を提案することを目指しています。

近年、第一原理計算によって、物質の結晶構造のみをインプットとして、様々な物理量をそれなりに定量的に予測できることが分かってきました。また、計算機の性能が向上し、機械学習に対して注目が高まるとともに、簡単に計算できる物理量の網羅的計算も次々に行われるようになってきました。これらをもとにした物質設計の例も少しずつ報告が増えてきています。今は、何に注目し、どういう物質探索、設計をするかが問われるようになってきていると思います。

アシンメトリ量子で扱う多極子はこのどういう物質設計を行うか、という点で非常によい指針を与えてくれるものだと考えています。また、多極子を考慮するための数値計算技術もここ数年で大きく発展してきています。したがって、物質設計という観点でも、この学術変革は非常によいタイミングで立ち上がったものと思っています。以下では、多極子を考慮した物質設計に関連するこれまでの取り組みとこれからについてもう少し詳しく紹介したいと思います。

まず、様々な物理量を定量的に議論するためには、野村さんも議論されている通り、ワニエ関数を用いた第一原理有効ハミルトニアン^[1]の導出とその解析が有効な手段となると考えています。我々のグループでは、ワニエ関数に基づき、第一原理計算のバンドを再現する強束縛模型を自動で計算するスキームを構築、公開しており^[1]、網羅的計算による磁気熱電物質の提案といったことも行っています^[2]。また、この強束縛模型の構築を高速に行うための対称性を取り込んだ模型構築手法の開発、さらには、対称性を保持した模型構築手法の開発にも取り組んできました^[3]。特に対称性を保持した模型は多極子を考える上でも重要な役割を果たすと考えています。今後、対称性に加えて多極子の観点で強束縛模型のデータを構築、解析を進めることで、アシンメトリ量子物質探索の基盤データを構築していきます。

また、ここにクーロン相互作用の情報を追加することで多体効果を取り込んだ物性の定量的評価についても取り組みます。クーロン相互作用計算の自動化やDFT+DMFTといった多体効果を取り込んだ手法の活用も検討していきます。多体効果を取り込んだ計算は、まだまだ計算コストが高く、ハイスループットには向かないと思われるかもしれませんが、物質探索にむけてのスクリーニングという視点で計算コストと定量性のバランスをとりながら、アシンメトリ量子物質の設計というテーマに取り組めればと考えています。

初めての方も多いですが、この機会にいろんな方と共同研究できればと考えていますので、どういうデータがあるのか、こういうデータを作ることはできないか、など、なんでも気軽に聞いて頂ければと思います。どうぞよろしくお願いいたします。

[1] <https://github.com/wannier-utils-dev/cif2qewan>

[2] A. Sakai *et al.* Nature **581** 53-57 (2020).

[3] T. Koretsune Comp. Phys. Comm. **285** 108645 (2023).



結晶合成環境の最適化と拡充

研究代表者 **大原 繁男**

名古屋工業大学大学院工学専攻 教授

電子の電荷、スピン、軌道の複合自由度であるアシンメトリ量子状態は、対称性の破れによって活性化します。計画研究C01では、アシンメトリ量子物質を系統的に合成し、その機能の理解と制御を深化させることが目的です。

私はC01の研究代表者として計画研究を総括して推進する役割を担うとともに、典型的なアシンメトリ量子物質「系」の合成を進めています。研究室では、中村翔太助教を中心に、学生たちが物質の合成に取り組んでいます。

我々が合成しているのは、カイラルあるいは、ハニカム、ジグザグ、カゴメなどの構造をもつ金属間化合物です。カイラルは結晶全体、ハニカム、ジグザグ、カゴメは局所的に、空間反転対称性が破れている物質になります。アシンメトリ量子物質の物性は結晶の質に敏感と考えられるため、A01やA02に試料提供するには、目的物質を得ることに加えて質の高い結晶を合成することが求められます。例えば、カイラル物質では、当然、結晶の左右性の高い純度(enantiopurity)が必要となります。

カイラル結晶では、左右が、(i) 細かに入り混じる、(ii) 双晶を形成する、(iii) 混じらずに両者が成長して混合物となる、(iv) どちらか一方が成長する場合に物質によってわかります。

我々が研究しているカイラル螺旋磁性体 YbNi_3Al_9 (空間群 $R32$ #155、点群 D_3) をはじめとする物質系は(ii)と(iii)に該当し、また、結晶がc軸に成長する間に左右性が変わってしまうことも生じます[1, 2]。左右の変化は、結晶構造の乱れをきっかけとして生じていることが鬆の存在やHAADF-STEM像から疑われました[2]。

乱れの抑制には結晶合成環境の最適化が必要です。合成には密閉型のフラックス法を用いていて、最適化には、原材料混合比、合成温度領域と冷却速度、結晶核生成制御、融体の攪拌などの検討が必要となりました。

合成温度領域の最適化は、晶析する温度を把握することから始めました。潜熱の観測は難しいため、結晶合成過程の幾つかの温度で坩堝を急冷し、晶析が始まっているかどうかを丹念に調べていきました。

すでに結晶が得られているし、晶析温度の把握がどこまで必要だろうかとも思っていました。しかし、調べてみると、想像よりも遥かに低く狭い温度領域で結晶が成長していて驚かされました。この情報を得て、フラックス量を減らして合成温度領域を高温にずらすなど、結晶成長環境の効果的な調整に至ることができました。

結晶核生成の制御には、温度勾配法、温度振動法、種結晶や異種核の付与を試しています。これまでに、坩堝に温度勾配を与えて空間的に結晶核生成領域を狭めると、成長する結晶の数を少なくして大型化できることがわかりました[2]。他の方法は開発途上ですが、選択的に左右結晶を作れるようにしたいものです。

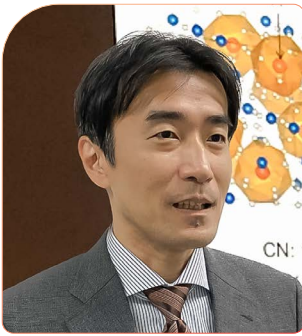
融体の攪拌には、外部から超音波を加える方法を開発しました。攪拌には原材料の十分な混合と過冷却を防ぐ効果が期待されます。融体に短時間超音波を加えて、攪拌の効果を調べているところです。

圧力も重要な合成環境です。幸運にも、圧力9GPa、温度1300℃まで印加できる装置が、産総研から所属学科に譲渡されました。早速、圧力下での物質合成も始めています。

結晶合成環境の最適化の過程は論文にはあまり現れません。しかし、その追求は重要です。ここにその一端を紹介してみました。

[1] T. Matsumura, Y. Kita, K. Kubo, Y. Yoshikawa, S. Michimura, T. Inami, Y. Kousaka, K. Inoue, S. Ohara, J. Phys. Soc. Jpn, **86**, 124702 (2017).

[2] S. Nakamura, J. Inukai, T. Asaka, J. Yamaura, S. Ohara, J. Phys. Soc. Jpn, **89**, 104005 (2020).



希土類化合物の多彩な相転移が創り出す 機能物性の開拓

研究分担者 鬼丸 孝博

広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授

「多極子」の概念は、時間と空間の反転対称に対する完全基底が構築されるに至って、その適用範囲を大きく広げている [1]。もともとは、スピン・軌道結合が強い局在的なf電子の異方的な自由度を記述する合成角運動量 J の高次テンソルとして認識されていたが、物性物理の分野で広く活用されていたとは言い難い。そうしたなか、最近の進展として、空間スケールを広げた複数の原子によるクラスター多極子やパリティ混成によるハイブリッド多極子などの拡張多極子が定義され、物質の機能性と強く紐付けられることが分かってきた [1]。本研究領域の発足にあたり、これら多極子の新しい可能性を探るべく、希土類を含むアシンメトリ量子物質の開発を軸とした研究を展開する。

希土類を含む化合物では、局在的な4f電子が磁性を担っており、伝導電子やフォノンとの相互作用を通して、多極子秩序やノンコリニアな反強磁性秩序、非従来型の超伝導などの多彩な相転移を示す。4f電子を2個もつ Pr^{3+} の非クラマース二重項を結晶場基底状態にとる立方晶 $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ は、 $T_0 = 0.11 \text{ K}$ で反強四極子 (AFQ) 秩序を示し、さらに低温の $T_c = 0.05 \text{ K}$ で超伝導転移を起こす [2,3]。8aサイトのPrの副格子はダイヤモンド構造と等価であり、Prサイトの反転対称性は破れているが、Prの midpoint に反転中心をもつ。なお、AFQ秩序は時間反転を破らず、磁場をかけると、伝搬ベクトル $\mathbf{k} = [1/2, 1/2, 1/2]$ で配列した四極子に対応した正負の磁気モーメントが誘起される [4]。実際、 $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ の温度・磁場相図は複雑であり、c-f混成の効果も相まって、非フェルミ液体や重い電子状態が発現する [5]。A02の橘高氏との共同研究による磁場中比熱の精密角度分解測定から、AFQ秩序のやや高温側で磁場誘起相の存在が確認された [6]。この相の秩序変数は明らかになっていないので、時間と空間の反転対称の破れによって生じるMulti-Q秩序の可能性を探るべく、A01の岩佐氏と中性子回折による観測を目指して準備を進めている。

4f¹³配位の磁性半導体 YbCuS_2 は、空間群 $Pnma$ の直方晶構造をとり、 Yb^{3+} が一次元ジグザグ鎖を形成する。これまでの我々の研究から、 $T_m = 0.95 \text{ K}$ で一次相転移を示し、 T_m は磁場に対してリエントラントな変化を示すことが明らかとなった [7]。粉末中性子回折実験によると、Ybの秩序モーメントは $0.1\text{--}0.2 \mu_B / \text{Yb}^{3+}$ しかなく、磁気モーメントが主要な秩序変数とは考えにくい。Ybジグザグ鎖で特異な電子状態が実現しているのか、また空間と時間の反転対称性が寄与して何らかの機能を生み出すのか、興味が持たれるところである。

他にも、立方晶 PrNi_4X ($\text{X} = \text{Mg}, \text{Cd}$)における非クラマース二重項のfcc格子や希土類がハニカム構造を組む RPt_6Al_3 における拡張多極子秩序の可能性など、希土類を含む化合物の開発を軸として研究を進め、非対角応答や非相反伝導などの機能を探索していく。物質開発を進めながら、アシンメトリ量子物質の新たな物質群を見出したい。

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

[2] T. Onimaru and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 082002 (2016).

[3] T. Onimaru *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 177001 (2011).

[4] K. Iwasa, T. Onimaru *et al.*, Phys. Rev. B. **95**, 155106 (2017).

[5] T. Onimaru, K. Izawa, S. Kittaka *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 075134 (2016).

[6] S. Kittaka, T. Onimaru *et al.*, submitted.

[7] Y. Ohmagari, T. Onimaru *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 093701 (2020).



積層を用いた反転対称性の制御と電子物性

研究分担者 小林 夏野

岡山大学異分野基礎科学研究所 准教授

弱いファンデルワールスで結合する層状物質の典型物質である遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)は超伝導や電荷密度波を示し、その電子状態についてもよく知られた物質である。特に、遷移金属の周りにカルコゲンが八面体配置、もしくは三角プリズム配置している2種類のユニットは比較的微小な合成条件の変化によって実現し、その組み合わせを含むと多種多様な結晶構造が実現できることが報告されている。特に、Nb, Taはどちらの構造も合成されており、さらに三角プリズムの積層変化によって超伝導の発現が大きく変化することが知られている[1,2]。特に三角プリズム配置の積層ユニットは反転対称性を持たないことから、単層試料においては電子状態に変調が加わることが期待される。実際、NbSe₂やMoS₂の単層試料においてK(K')点の縮退が解け超伝導電子対の擬スピンのロックインがされて、磁場に対して非常に強い超伝導(Ising超伝導)が実現していることが報告されている[3,4]。さらに、このような反転対称性を持たない超伝導層を含む積層物質が新規合成され、上記のIsing超伝導と同時に絶縁層との積層界面におけるラシュバ型のスピン変調を持つことによって、有限な超伝導対の重心運動量をもつFFLO超伝導が実現していることが報告された[5]。この結果は異なる積層要素を組み合わせることによって電子状態に強い変調を与え新規電子状態が実現できることを示しており、この積層構造によって電子状態を制御する手法を用いた新規物質の開発は対称性を持たないTMDに現れるIsing超伝導を用いた新規超伝導状態の開発の強力な手法である。

このような観点から様々な構造をとる積層TMDやその類似物質を見たとき、非常に特徴的な構造を持つミスフィット積層カルコゲナイド(MLC)と呼ばれる物質群がある。図1に示すようにTMD(例えばNbSe₂)にNaCl構造層(例えばPbSe)がインタカレートした構造であり、電子構造はTMDが担うことから物質中でTMD数層と同じ状態であるとみなせる。このMLCの特徴として、NaCl層に隔てられるTMDの層数を1~3枚と変化出来る点が挙げられる。通常のインターカレーション系では均一なインターカレーションで広い範囲で同じ層数状態を実現することは難しいが、MLC層では合成条件によってTMD層数を制御することができ、積層枚数の変化による超伝導状態の変調をバルク物質中において系統的に調べることが可能である。このようなMLCを舞台として幾つかのトピックを中心に研究を進めることを計画している。

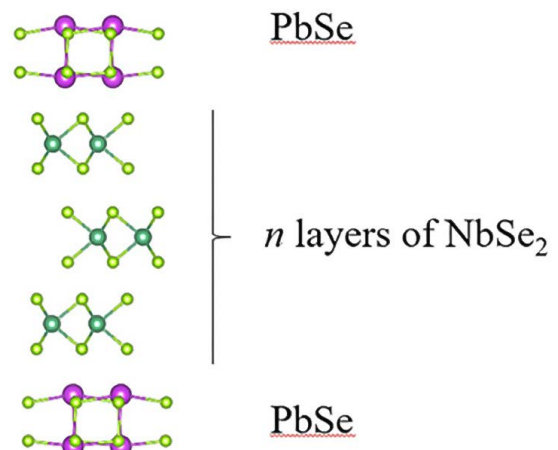


図1 (PbSe)_{1.14}(NbSe₂)_nの構造

[1] F. Kaduk, F. Jellinek, J. Less-Common Met. **23**, 437 (1971).
 [2] Y. Tanaka *et al.*, Nano Lett. **20**, 1725 (2020).
 [3] X. Xi *et al.*, Nat. Phys. **12**, 139 (2016).

[4] Y. Saitoh *et al.*, Nat. Phys. **12**, 144 (2016).
 [5] A. Devarakonda *et al.*, Science **370**, 231 (2020).



カイラル構造を持つ物質の 高純度単結晶がもたらす物性応答研究

研究分担者 松田 達磨

東京都立大学大学院理学研究科 教授

物性の実験研究では、対象とする物質の高純度結晶を用いて本質的なデータを得ることが最も重要です。計画研究C01が目指すアシンメトリ量子物質の深化では、異方的な物性応答を検出するための高純度単結晶の作製が必須であるため、試料合成・開拓を担う者としてはとても重責を感じるところです。特に、C01班で据えているキーワードの一つとして「カイラル構造物質」がありますが[1-3]、これは単結晶育成としては、ある意味究極の要求・課題ではないかと思っています。無機化合物において、結晶のカイラリティを制御するということは、現時点では特殊な場合を除いて確立されていない点で、すでに敷居は高くなっています。しかしながら、それ故に、カイラル構造を持つ物質の電子状態やその物性応答は未解明なことが残されており、とてもやりがいのある課題であると感じ、ワクワクしております。カイラル対称性が関わる物理の詳細は文献としてあげたものを参照していただくとして、いずれにせよ研究課題の推進は、到底一研究室だけ行えるものではなく、まさに領域研究として推進するに相応しく、多くの方と共同研究を行えればと考えております。

我々の最近の研究では、カイラル構造を持つ金属間化合物を中心に高純度結晶育成とフェルミ面の研究をすすめております。その理由は、カイラル構造に起因する様々な輸送現象は、その結晶の対称性を反映したバンド構造やフェルミ面のスピン構造が深く関わるからです。理論的な対称性の議論のみならず、定量性を持った実験

事実の積み重ねが大事だと考えています。それ故、我々の研究室では、高純度単結晶育成・基礎物性測定を基本とし、特に図1のような無冷媒型の14テスラマグネット・冷凍機と回転機構を備えた測定プローブを用いたドーハース・ファンアルフェン効果測定を軸として研究を推進しています(一例[4])。非磁性カイラル物質のみならず、磁性イオンを含む物質まで、幅広く物質を開拓し、領域の研究に貢献できればと思います。

最後に、結晶の対称性に注目することで、以前からよく知られている化合物についても、新しい視点で研究のテーマが見つかるものが最近増えています。我々としては、縁の下の力持ちとして、積極的にこれらの試料提供にも協力をしたいと思っております。是非、お気軽にご相談ください。

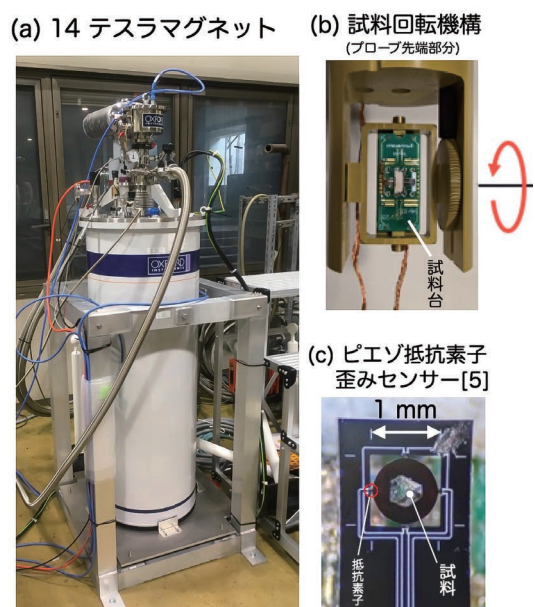


図1 (a) 無冷媒型 14 テスラマグネット・冷凍機、
(b) プローブ試料回転機構部、
(c) ピエゾ抵抗素子を使ったメンブレン型メカニカルセンサー

[1] L. D. Barron, Chirality **24**, 879 (2012).

[2] 数理科学**3** (2021) 特集号.

[3] 岸根純一郎, 固体物理 **53** No.1, 1 (2018) 及び No.2, **47** (2018).

[4] N. Nakamura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 034701 (2023).

[5] <https://www.nanosensors.com>



ウラン系アシンメトリ量子物質の探索

研究分担者 清水 悠晴

東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター 助教

私の現在の所属は東北大学金属材料研究所ですが、この中でも附属施設として量子エネルギー材料科学国際研究センター(大洗)に所属しています。ウラン化合物はスピン軌道相互作用が比較的強く、5f電子の波動関数の広がり(遍歴性)は4f電子系とd電子系の中間程度となる特徴を持っています。遍歴する5f電子が強い相関を持つと低温で量子多体効果の影響が顕わになり、面白い現象が起こります。私のこれまでの興味はウラン系超伝導でしたが、そのような物質群を理解していく上で、そもそも5f電子描像の理解が足りないと感じ、5f電子系でしかも特徴的な結晶構造を持つ面白い物質がないかと探索していました。その過程で、準カゴメ構造を持つURhSnに出会いました(図1)。多結晶のみ報告があり、何やら転移はあるが磁気反射は中性子散乱からは見えないという論文がありました[1]。URu₂Si₂のように隠れた秩序($T_{H0}=17.5\text{ K}$)が潜んでいるのではないかと

直感し、URhSnのチョクラルスキーによる単結晶作成を試してみたところ、うまく成功しました。この物質は低温 $T_c=17\text{ K}$ で強磁性を示しますが、 $T_0=54\text{ K}$ の秩序は磁場強化される不思議な相であることを発見し、反強四極子相ではないか、という論文を發表しました[2]。始めは、この物質の面白さに気づく人はいるだろうか?とっていました。しかしURhSn面白いじゃないかと言ってくれる方は多く、色々な共同研究に繋がっていきました。[3]にもあるように、URhSnが「結晶並進対称性を破らずに、隠れた秩序を示す5f電子系」として系統的に理解する重要な典型例になるのではないかと考えて



います。初めに共同研究になったのは原研徳永氏とのNMR実験で、次にA01班田端氏とは共鳴X線散乱、さらに最近ではA02班柳澤氏とは超音波実験の共同研究へと繋がっています[4]。最近、多極子がカイラリティを持っている可能性がわかっており[4,5]、これはJ-Physicsにも磁気スキルミオンにもなかった新しい点だと思います。現在、大洗では、A02班木俣氏との共同研究としてURhSnの微細加工に取り組んでいます。学術変革をきっかけに、様々な共同研究を發展させていければと思います。東北大学での残り任期2年をアシンメトリ量子と共に充実させて、自分の次のステップにもつなげたいと考えています。

写真1: ウラン化合物をチョクラルスキー法で単結晶育成している様子。

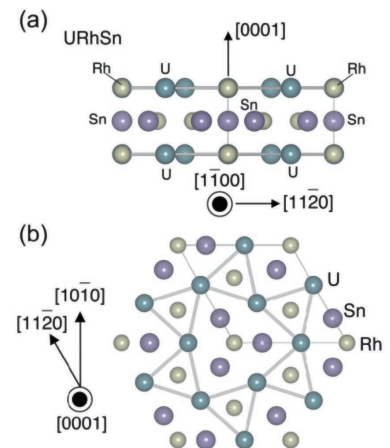


図1. ZrNiAl型準カゴメ構造(六方晶)を持つURhSnの結晶構造[2]。

[1] Mirambet *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **140-144**, 1387 (1995).

[2] Y. Shimizu *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 134411 (2020).

[3] H. Harima, SciPost Phys. Proc. **11**, 006 (2023).

[4] C. Tabata *et al.*, 日本物理学会 (2022), 16pGB32-13.; Y. Tokunaga *et al.*, 日本物理学会 (2023), 25aH1-12.; K. Tsuchida *et al.*, 日本物理学会 (2023), 18aA205-4.

[5] H. Kusunose and J. Kikuchi, arxiv 2311.07207.



アシンメトリの概念で眺める物質開発

研究代表者 吉田 紘行

北海道大学大学院理学研究院 教授

C02では、様々な化学的合成法を駆使してアシンメトリ量子物質に多様性をもたらし、スケールシームレス性の実証と新規交差相関応答材料の開発を通して、アシンメトリ物質科学のフロンティアを切り開くことを目的としています。

その中で私は、ジグザグ鎖やハニカム構造、擬カゴメネットワークなどの局所非対称構造に着目した物質開拓を行い、アシンメトリ量子物性の検証を目指します。以下では擬カゴメ磁性体を中心に現在取り組んでいる研究テーマを紹介します。

カゴメ化合物ではフラストレート磁性や超伝導、トポロジカル物性などが盛んに研究されてきましたが、アシンメトリ量子物性を調べるうえでも良い舞台となっています。カゴメ金属化合物 Mn_3Sn における磁気八極子の強制的秩序[1]はその代表例といえるでしょう。さらに、カゴメ構造に3回対称性を保つ局所非対称歪みを導入した ZrNiAl タイプの擬カゴメ金属間化合物 URhSn や HoAgGe では、電気四極子や磁気トロイダル双極子の秩序が指摘されており[2,3]、多極子秩序に基づく交差相関現象も期待されています。最近では、速水らによる理論研究により、 D_{3h} の点群対称性を有するブリージングカゴメ磁性絶縁体において、磁性イオンを結ぶボンド上に定義されたボンド磁気トロイダル双極子の秩序化により、マグノン非相反性が生じることが予想され、注目を集めています[4]。

私は、ブリージングカゴメ磁性体の探索を行い、 $\text{Li}_2\text{Cr}_3\text{SbO}_8$ 等のモデル物質の開発に成功しています。本物質では、ブリージングカゴメ層が二重層を形成するため、点群対称性(C_{6v})が先行理論で検討された状況とは異なりますが、理論的考察(B01)から、その磁気構造が磁気トロイダル128極子に相当することが提案されています。これは、ボンド磁気トロイダル双極子による渦構造のフェリ秩序に対応し、対称性の観点からは磁気双極子と同等になります。このため、カー効果や磁気円二色性等の光学効果が期待され、その検証をA01、A02と進めていく予定です。 D_{3h} の対称性を有する新物質の開発とマグノン非相反性の検証も進め、面白いアシンメトリ量子物性の開拓を目指します。

その他にも、様々な物質開発を進めています。例えば、①スピン分子物質 $\text{SrCu}(\text{OH})_3\text{Cl}$ における磁気トロイダル双極子に起因する光の方向二色性の検証、② ZrNiAl 型擬カゴメ化合物の開発と交差相関の探索、③ $\text{RE}_3\text{Os}_4\text{Al}_{12}$ (RE:希土類元素)や ThCr_2Si_2 構造を有する新物質開発とスキルミオン相の探索、④非相反性を示す超伝導体の開発、⑤カイラル磁性体の開発等を挙げることができます。

このように現在取り組んでいる物質を並べてみると、絶縁体から金属、分子磁性からトポロジカル物性、カイラル磁性や超伝導と、いささか興味が散乱しているように感じますが、結晶構造や電子状態に非対称性を有するこれらの物質をアシンメトリの観点から眺めると、分野や空間スケールの垣根を超えたアシンメトリ量子物質の開発と交差相関現象の開拓としてまとめることができます。アシンメトリを指導原理とした物質開発に邁進し、非対称の物理を楽しみたいと思います。

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

[2] Y. Shimizu *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 134411 (2020).

[3] K. Zhao *et al.*, Science **367**, 1218 (2020).

[4] T. Matsumoto *et al.*, Phys. Rev. B **104**, 134420 (2021).



アクチノイド5f電子系の物質探索

研究分担者 芳賀 芳範

日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター 研究主幹

ウランをはじめとするアクチノイド元素の物性は、主に5f電子により特徴づけられます。希土類の4f電子との共通点も多く、磁性や軌道自由度が重要な役割を果たしています。ところが、単純に4fの延長と捉えられない現象も多く、これが、核燃料物質としての制約の中でも研究を推進する原動力となっています。隠れた秩序や磁性と共存する超伝導はその代表例といえるでしょう。4fとの大きな違いは、5f波動関数が空間的に広がっている点で、このことが周囲の電子との混成を通じて遍歴的性格を強め、また価数を定義しにくい状況を生み出しています。

私たちは、このような5f電子を相手に物質探索を行っています。実験手法は、多少注意が必要ではあるものの通常の物質と同様で、アーク溶解、フラックス法、ブリッジマン法、気相成長法による結晶育成、これらについてX線回折による結晶構造解析及び物性測定で基本的性質を明らかにします。すぐ近くでは、A01班がJRR-3を利用した中性子散乱実験を展開しており、協力体制ができているほか、A02班の強磁場測定もウラン研究には欠かせない手法です。さらにウランの利用を前提としたFIB（A02班）及び高压合成（C01班）も整備されつつあり、今後の協力が楽しみです。

現在の研究対象を一つ紹介します。 $\text{U}_2\text{Pt}_6\text{X}_{15}$ （ $\text{X} = \text{Al}, \text{Ga}, \text{etc.}$ ）は、もともと原子配置に乱れのある系と考えられていましたが、詳細な構造解析の結果、ウランがハニカム格子を作ることがわかっています。ハニカム格子上的ウランの磁気秩序、及びそれに由来する交差相関を調べるのが目的です。一方で、この系は物質探索としても面白い可能性を秘めています。結晶構造を模式的に図1に示します。それぞれのハニカム間は $8\text{\AA}$ 程度離れており、その間は 6PtX_2 で隔てられています。一方ハニカムの内側にもXが入っていますが、最近の実験で、ハニカム内のXだけを選択的に置換できることがわかりました。バルク物質ではありますが、人工格子のように組み合わせを選べるようになると物質設計のようなことができそうで、妄想が広がります。

しかしながら、仮に望みの物質ができたとしても、ウランは研究者の期待を往々にして裏切ります。上述の波動関数の広がり、物質ごとに5fの性格を非常に幅広く変えます。広い意味での価数の変化とみなせますが、時には完全な非磁性状態をもたらしてしまいます。なんとか、良い意味で期待を裏切る新物質をご披露したいと思っています。

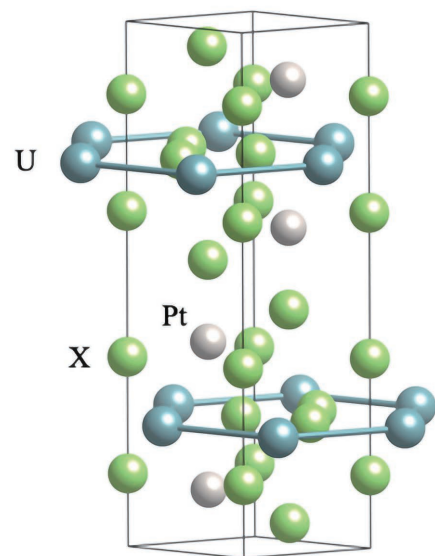


図1 $\text{U}_2\text{Pt}_6\text{X}_{15}$ 結晶構造の模式図



イリジウム酸化物における 電気トロイダル秩序および新奇相転移の研究

研究分担者 松平 和之

九州工業大学大学院工学研究院 教授

イリジウム酸化物を中心としたd電子系アシンメトリ量子物質の物質開発を行なっています。特に電気トロイダル秩序および新奇相転移を示す物質に着目し研究を進めています。

物質の秩序状態における性質を特徴づける秩序変数を明らかにすることは、固体物理学の主要な研究テーマであり、新しいタイプの秩序相の発見は新しい物理や新しい機能の創出へとつながります。相転移の秩序変数は、時間反転対称性および空間反転対称性の破れの有無により、それぞれ4種類に分類されることが分かっています(図1) [1]。また、それぞれに、通常考えられる双極子モーメントに加えて単極子、四極子、八極子の高次のモーメントがあり、相転移の秩序変数は理論的には理解されています [1]。

しかし、実験的には高次モーメントの相転移は、その検出方法が十分に確立されておらず未解決なケースがしばしばみられます。また、電気トロイダル秩序では、時間反転対称性および空間反転対称性を破らず、電気トロイダル双極子モーメント $\mathbf{G}$ を含む面についての鏡映対称性が破れています。この $\mathbf{G}$ がある軸方向に強的に整列した秩序状態は、フェロアクシャル秩序と呼ばれており、最近、研究が活発に行われつつあります [2-3]。

我々のグループでは 2015 年から 5d 遷移金属イリジウム酸化物 $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ が 105 K で示す非磁性二次相転移の解明に取り組み、その秩序変数が電気トロイダル秩序であることを明らかにしました [4,5]。この秩序状態は、従来のフェロアクシャル秩序とは異なり、 IrO_6 の辺共有1次元鎖では $\mathbf{G}$ の向きが反強的に秩序し、また、近接する3つの IrO_6 辺共有1次元鎖がクラスターを形成しています。この実験結果からは、電気トロイダル秩序が磁気秩序のように多彩な秩序状態を形成可能なことを示しており、さらなる多彩な秩序状態の発見が期待されます。また、 $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ はさらに 7.8 K で磁気的な二次相転移を示します。当初は反強磁性秩序と考えられていましたが、我々のグループによる ^{193}Ir 放射光メスバウアー分光のスペクトルには磁気分裂がみられず、高次磁気多極子の可能性が考えられています [6]。

しかしながら、「なぜ、これらの秩序が生じるのか?」、その微視的な機構は未解明です。このような未解明の相転移を示す物質は未だ多く存在しており、解明にはA01班(量子ビーム)、A02班(精密物性測定)、B01班(理論)との連携による更なる研究を必要としています。加えて、C01班とC02班内との協働による精密合成&物質開発が新奇相転移(秩序状態)の発見につながると考えられます。特に新奇な交差相関応答や巨大応答、大きなスケールによる秩序状態の発見を目指したいと考えています。

type	symbol	spatial inversion	time reversal	monopole	dipole	quadrupole	octupole
E	Q_{lm}	$(-1)^l$ polar	+	$(+, +)$			
M	M_{lm}	$(-1)^{l+1}$ axial	-	$(-, -)$			
MT	T_{lm}	$(-1)^l$ polar	-	$(+, -)$			
ET	G_{lm}	$(-1)^{l+1}$ axial	+	$(-, +)$			

図1 多極子の時間反転対称性と空間反転対称性による分類 [1]。Eは電気多極子、Mは磁気多極子、MTは磁気トロイダル多極子、ETは電気トロイダル多極子。

[1] H. Kusunose and S. Hayami, J. Phys.:Condens. Matter **34**, 464002 (2022).
[2] W. Jin *et al.*, Nat. Phys. **16**, 42 (2020).
[3] T. Hayashida *et al.*, Nat. Commun. **11**, 4582 (2020).

[4] H. Hanate *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 063702 (2021).
[5] 花手 洋樹, 松平 和之, 日本物理学会誌 **78**, 599 (2023).
[6] S. Hayami, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 033702 (2023).



多極子の辺縁で、アシメ量子をさがす

研究分担者 石渡 晋太郎

大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

拡張多極子という概念は、f電子系物質のややこしい物性を整理するための理論家の道具であって、合成家には縁のないもの、これが私にとっての多極子に対する率直なイメージでした。一方で、それを学会等で耳にする機会が増え、J-Physicsが成功裏に終わったことで、近寄りたがいけど気になる存在へと変わっていきました。そのような折、C02班長の吉田さんから分担者としてのお誘いを頂きました。その際は、拡張多極子の辺縁で進めてきた物質開拓の経験が何かに役立つかもしれないという期待が、それまでの不安を上回り、二つ返事で本領域に参画させて頂くことになりました。

本領域において、C02班の中でも最も辺縁部に位置する者として、(真の)新物質、新規交差相関応答の開拓を進めたいと思っています。私はこれまで高圧合成法や真空封管による気相成長法を用いて、遷移金属および希土類金属を内包する酸化物・ニクタイト・テルル化物の開拓を進めてきました。本領域に係る系としては、①トポロジカルらせん磁性を示す立方晶ペロブスカイト(Sr,BaFeO_3)、②極性-非極性構造転移を示す層状トポロジカル半金属 MoTe_2 (Sr,EuAuBi)があります。①は反転中心を有する単純立方格子構造でありながら、 Fe^{4+} 系特有の強いp-d混成によってらせん磁性が生じる系であり、スピン系が自発的にカイラル対称性を破るだけでなく、それがスピン構造のトポロジー転移を伴うという点で希有な系であると言えます。今後は、新たな高次多極子秩序の検出に向けて、磁性サイトがfcc副格子を形成するダブルペロブスカイト型構造や、新たな稠密構造を有する5d遷移金属酸化物高圧相の開拓を進めます。これを加速すべく、来年度中に大きさの異なる二つの六方アンビルが入れ子状になった6-6型高圧発生装置を立ち上げ、最高圧力を10~12万気圧程度にまで拡大することを目指します。高圧下物質探索の効率化には、第一原理計算に基づく候補物質のスクリーニングが必須であり、簡単な計算は自前で進めつつ、B01班との連携を通じてハイスループットスクリーニングを活用できればと考えています。

交差相関応答の開拓に関しては、理論に基づく演繹的なアプローチだけでなく、様々な物性測定に基づく帰納的なアプローチも重要になることが予想されます。従って、C02班にとって機能開拓班A02との連携は非常に重要だと考えています。らせん磁性マルチフェロイクスの研究はその好例で、2003年に $(\text{Dy,Tb})\text{MnO}_3$ において最初に巨大電気磁気効果が報告された時点でその起源に関わる磁気構造は未確定でした。その後、それがらせん磁性であることが中性子回折や理論研究から提案され、磁性誘起マルチフェロイクスの開拓に拍車がかかりました(ZnCr_2Se_4 における先駆的な研究の重要性も再認識されました)。このことから、アシンメトリ量子物質の合理的開発に繋がる構造機能相関を見いだすには、A02班との連携および自前での交差相関応答測定(ホール効果、磁気ゼーベック効果、ネルンスト効果、ピエゾ効果など)と同時に、A01班によるアシンメトリ量子の可視化が必須になると言えます。

アシンメトリ量子という造語は、現時点では拡張多極子の分かりやすい上位概念として、我々物質開拓班にある種の親しみやすさを与えています。今後はこの親しみやすさに安堵することなく、アシンメトリ量子に紐付けられた革新的な機能を見つけ出すことで、この造語に明確な輪郭を与えられるよう、皆さんのお力を借りつつ頑張りたいと思います。



Mn系化合物を中心とした クラスター型アシンメトリ量子物質の開拓

研究分担者 小手川 恒

神戸大学大学院理学研究科 准教授

Mn系の金属磁性体を中心として、クラスター型のアシンメトリ量子物質の開発を行っています。Mn系化合物には特徴的な反強磁性体が多く、第一段階としてその中からアシンメトリ量子物質の典型例を見つけないかと思っています。Mnは遷移金属の中でも蒸気圧が高く、また高温で石英管と反応するためにフラックス法や金属つぼを用いた作製法が向いています。そのため研究が十分でない物質が多く存在しています。本News Letterで解説したNbMnPは我々が初めて単結晶を作製し物性測定を行った物質ですが、ノンコリニアな反強磁性構造の中に「磁気トロイダル四極子」とみなせる偶パリティ成分があり、反強磁性構造が主体であっても異常ホール効果などの強磁性的な応答が生じます。一方で、多彩な交差相関を生み出す奇パリティ成分を持つ物質開発も目指します。ここでは最近単結晶化に成功した2つの物質を紹介します(図1)。

1つはNbMnGeという空間反転対称性のない六方晶(空間群 $P\bar{6}2m$ 、No.189)に属す物質です。基礎物性は知られていませんでしたが、170 K以下で微弱な自発磁化を伴う反強磁性的秩序を示すことが分かりました。Mnの三角格子においてどのような拡張多極子が実現しているのか、A01班と協力して磁気構造の解明を行い、そこから予想される応答の観測を目指します。

もう1つはYMn₁₂という正方晶(空間群 $I4/mmm$ 、No.139)の物質です。こちらは $T_N=120$ K程度で反強磁性転移を示し、伝播ベクトル $Q=0$ の渦状の磁気構造を示すことが既に報告されています。 $I4/m'mm$ の磁気空間群は「磁気トロイダル双極子」という奇パリティ成分を持ち、交差相関や非相反電気伝導が期待できます。

反強磁性体の応答を観測する上で反強磁性ドメインの制御が課題になります。NbMnPのような強磁性的応答を示す物質では微弱な自発磁化のおかげで外部磁場を用いてドメイン制御が容易に行えます。一方、 PT 対称性を保つ奇パリティ多極子が実現した場合には自発磁化は出ません。集束イオンビーム(FIB)加工で単一ドメインを取り出す手法が有望で、A02班と協力していきたいと思っています。一方で物質開発の観点からはバルク結晶のままドメイン制御が容易で、そのために大きな交差相関応答を示す物質の発見を目指したいと思っています。応答現象の理解が進んだ恩恵で、古い物質も新しい物質も脚光を浴びる可能性を秘めています。物質開拓班としてそのような物質を見出す役割を果たせるように頑張っていきたいと思っています。

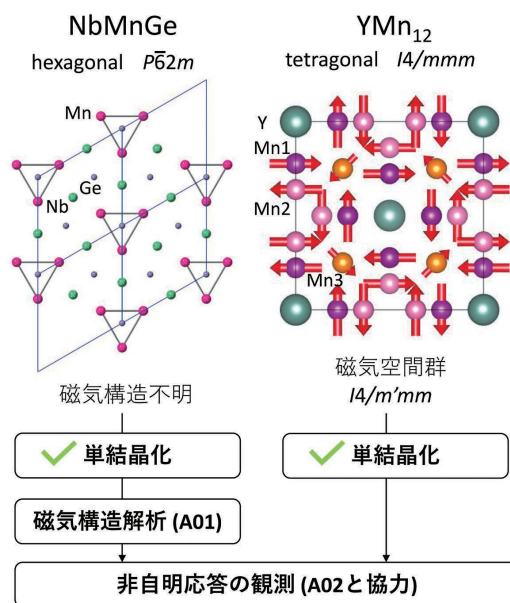


図1: 単結晶化に成功したNbMnGeの結晶構造とYMn₁₂の磁気構造(J. Deportes *et al.*, Solid State Commun. **19**, 845 (1976).). 及び、今後の研究計画。



偏光依存内殻電子分光による 重い電子系超伝導体CeNi₂Ge₂の Ce 4*f*基底状態の決定

藤原 秀紀

大阪大学大学院基礎工学研究科 助教

CeCu₂Si₂において有効質量の増大を伴う超伝導が発見されて以来[1]、様々な正方晶Ce化合物が発見され、今なお新奇物性探索の舞台として精力的に研究が進められています。超伝導を説明するモデルとしては古くからスピン揺らぎに由来する模型が議論されてきましたが[2]、近年では価数揺らぎを伴う超伝導が見つかり、伝導電子と*f*電子間の混成効果（*cf*混成）に加え、両者間のクーロン相互作用の重要性が議論されています[3]。

また、2010年代には高輝度放射光の偏光特性を利用した内殻吸収分光測定により、Ce 4*f*軌道の対称性を実験的に決定する手法が開発され[4]、4*f*電子の軌道自由度が量子臨界現象と密接に結びつくという報告がなされました[5]。希土類サイトの平均価数と混成効果を評価する従来の研究から更に発展し、軌道対称性を精密に決定できる新たな実験手段になったと言えます。

吸収分光により軌道対称性を捉えるためには、直線偏光X線の電場ベクトルと異方的な結晶軸が平行または垂直となるように試料を配置して測定を行います。直線偏光に対する双極子遷移の選択則に由来する吸収係数の差（線二色性：LD）を利用することにより、精密に軌道対称性を決定することが可能です。一方で、この手法は格子定数に差がない立方晶や正方相化合物の*ab*面内では吸収係数に差が生まれず、面内の対称性を決定することができません。この原理的な弱点を克服するべく、電子の非弾性散乱の方向依存性を利用した非共鳴非弾性X線散乱（NIXS）や[6,7]、我々の研究グループが開発した“角度分解”内殻硬X線光電子分光の線二色性（HAXPES-LD）を組み合わせる必要があります[8,9,10]。単結晶試料における電子の散乱方向の自由度を利用するという点では、HAXPES-LDもNIXSも根本の実験コンセプトは同様であると言えます。

本稿ではXAS-LDおよびHAXPES-LDを用いた軌道対称性の決定手法の原理について焦点を当て、最近我々のグループが報告した重い電子系超伝導体CeNi₂Ge₂のCe 4*f*結晶場基底状態、および実空間の4*f*軌道対称性が波数空間におけるバンド構造に与える影響について紹介します[11,12]。

CeNi₂Ge₂は電子比熱係数が350 mJ/(mol K²)の重い準粒子を形成し、0.2 Kで超伝導転移を示します[13]。結晶構造はCeCu₂Si₂と同じ正方晶ThCr₂Si₂型構造であり、Ce³⁺イオンのCe 4*f*電子状態は正方対称場により3つのKramers二重項に結晶場分裂します。これらの状態は合成角運動量 $J = 5/2$ の*z*成分 J_z により下記の様に記述できます。

$$\begin{aligned} |\Gamma_7^1\rangle &= \alpha \left| J_z = \pm \frac{5}{2} \right\rangle + \sqrt{1 - \alpha^2} \left| \mp \frac{3}{2} \right\rangle, \\ |\Gamma_7^2\rangle &= \sqrt{1 - \alpha^2} \left| \pm \frac{5}{2} \right\rangle - \alpha \left| \mp \frac{3}{2} \right\rangle, \\ |\Gamma_6\rangle &= \left| \pm \frac{1}{2} \right\rangle. \end{aligned}$$

ここで、本稿では Γ_7 状態を記述する α ($-1 \leq \alpha \leq 1$)の符号が負である場合を Σ 型、正の場合を Π 型（図1）、及び α^2 を異方性パラメーターと呼びます。 α^2 により Γ_7 状態の磁化の期待値が変化するため[10]、基底状態の対称

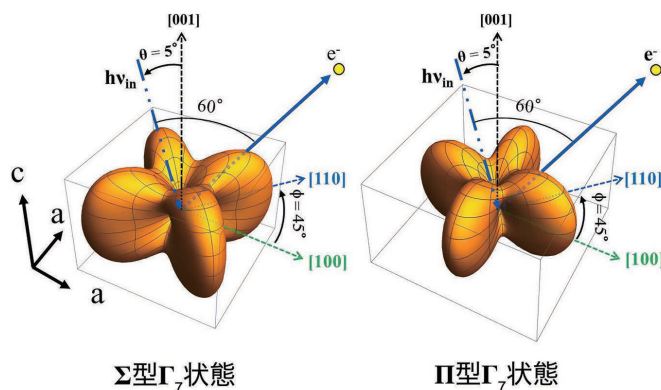


図1 正方晶 Ce^{3+} イオンの Σ 型、及び Π 型 Γ_7 状態の電荷分布とCe 3d内殻 HAXPES測定における光電子放出方向

は、非弾性中性子散乱実験から第一励起状態が290 K程度との報告があるため[14]、測定温度は第一励起状態に対して十分に低温の10 K付近にて測定を行うことで、結晶場基底状態の対称性を調べました。

CeNi_2Ge_2 のCe $M_{4,5}$ 端XASスペクトル(図2)は、Ce 3d内殻ホールと4f電子との異方的クーロン/交換相互作用に由来する多重項ピーク構造が現れます。さらに、水平直線偏光(図2でp偏光と定義)配置と垂直直線偏光(s偏光)配置で得られたXASスペクトルを比較すると、明瞭な直線偏光依存性が観測されました(図2上)。p及びs偏光配置は、入射X線の電場ベクトルがそれぞれc軸に対して $E//c$ 及び $E \perp c$ となる成分が支配的であるため、吸収スペクトルの直線偏光依存性はc軸方向に対する4f軌道の球対称からの変化(伸び縮み)を反映しているといえます。これらの吸収スペクトルの直線偏光依存性を正方対称結晶場中における局在 Ce^{3+} イオンを仮定したイオン模型に基づいて解析することにより[10,11,15]、異方性パラメータの見積りを試みます。まず、 Γ_6 対称性を仮定したモデル計算は、881 eV付近のs偏光とp偏光の吸収強度が逆転するため、実験スペクトルの直線偏光依存性を説明できないことがわかり、これにより基底状態の候補が Γ_7 状態に絞られます。さらに、異方性パラメータ α^2 を系統的に変えて比較することにより、 $\alpha^2 = 0.4$ と見積ることに成功しました[11,12]。この結果は、帯磁率の温度依存性を説明できることから、妥当であると考えられます[11]。

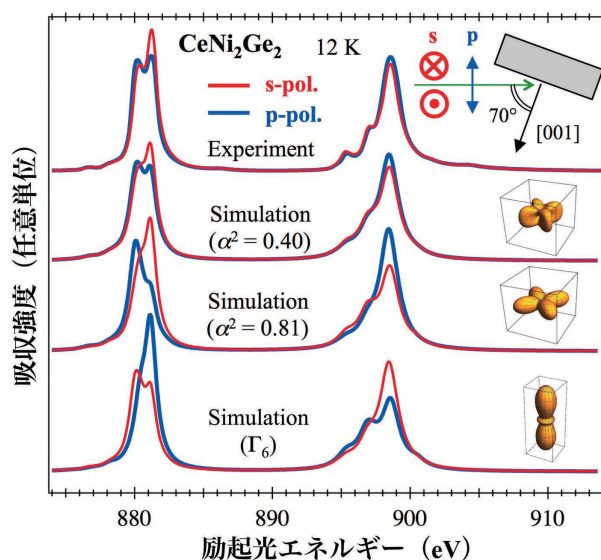


図2 CeNi_2Ge_2 の直線偏光依存XASと Ce^{3+} イオン模型によるスペクトル計算

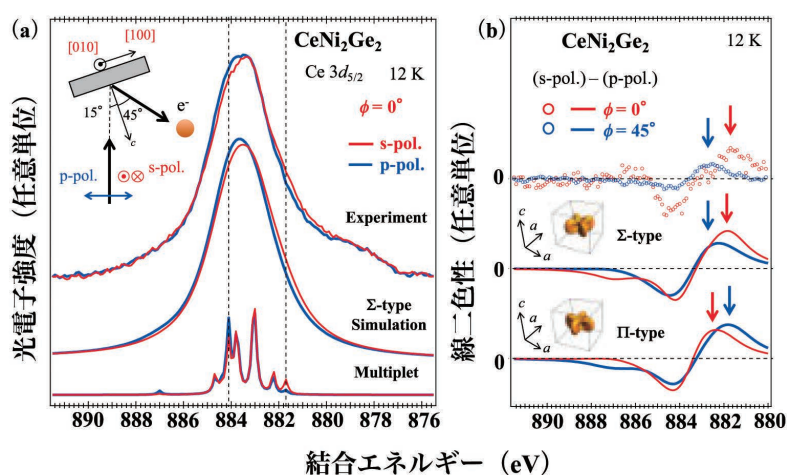
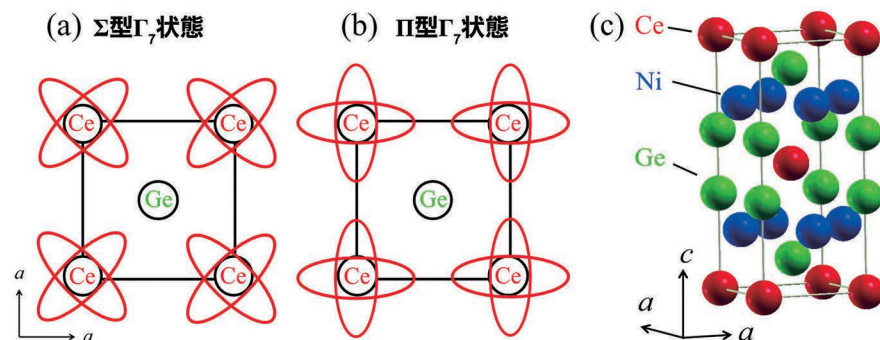


図3 直線偏光依存Ce 3d内殻HAXPESスペクトルのアジマス角 ϕ 依存性。
(a) $\phi = 0^\circ$ におけるHAXPESスペクトルと Σ 型 Γ_7 状態に対するイオンモデル計算。
(b) HAXPES-LDスペクトルの ϕ 依存性、及び Σ 型、及び Π 型 Γ_7 状態を仮定したイオンモデル計算

単結晶試料のアジマス角を回転させて同様の測定を行うことにより、光電子の検出方向を選択して測定を行いました[17]。図1に示したとおり、CeNi₂Ge₂等の正方晶Ce化合物の Γ_7 状態は Σ 型と Π 型で凹凸の向きが ab 面内で45度ずれるため、試料のアジマス角を45度回転させることで、図3(b)のように4f電荷分布における ab 面内の凹凸を反映したアジマス角依存性を得ます。特に、882 eV付近におけるLDスペクトルのピーク位置(図3(b)矢印)のアジマス角依存性に注目し、基底状態に Σ 型、及び Π 型 Γ_7 状態を仮定した局在イオン模型と比較することで、CeNi₂Ge₂の基底状態の対称性を Σ 型 Γ_7 状態($\alpha = -\sqrt{0.4}$)と一意に決定することに成功しました。

さて、 Σ 型 Γ_7 状態は図5に示すように[110]方向に電荷分布を持ちますが、これはCeサイトを中心として、単位格子の角の方向に電荷が分布しています(図4(a))。この方向にはGeイオンが存在しているため、Ceの4f電子はGeの電子と混成し得るのではないかと予想されます。軌道混成の様子を直接観測するためには、価電子帯の

以上により c 軸方向の異方性を決定することに成功しましたが、基底状態の精密に評価するためには、 ab 面内における軌道の対称性を決定する必要があります。このため、光電子検出方向を選択することができる直線偏光依存硬X線光電子分光により、面内の軌道対称性の決定を試みました。図3(a)に示すCe 3d内殻光電子スペクトルは局在的なCe³⁺成分を反映した多重項構造に由来したブロードなピーク構造をもち、直線偏光依存性を示します(図中縦点線)。そこで、これらの構造に着目し、



バンド構造やフェルミ面の詳細を3次元的に調べる必要があります。この問題に取り組むために、光電子の放出角度まで正確に測定する軟X線角度

図4 c 軸方向からみた(a) Σ 型、及び(b) Π 型 Γ_7 状態の電荷分布、及び(c)CeNi₂Ge₂の結晶構造

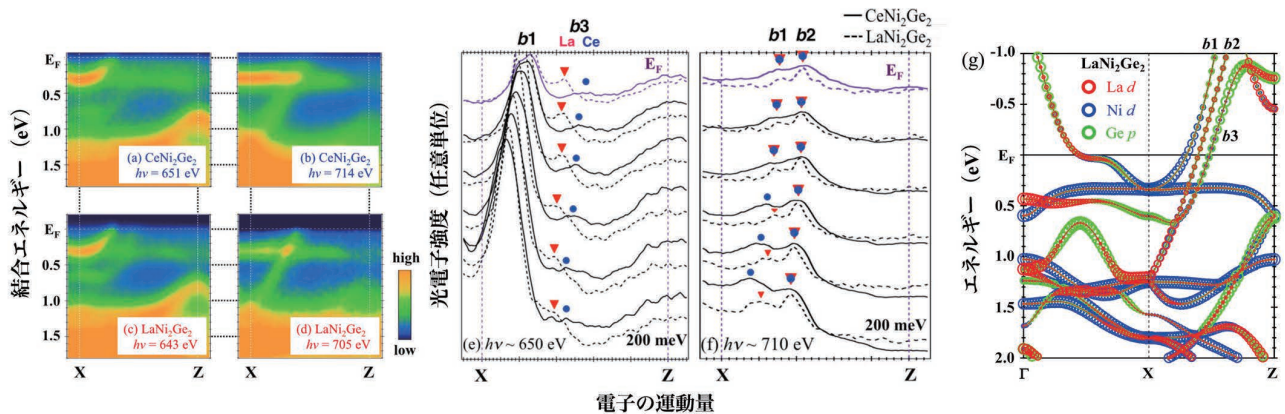


図5 CeNi₂Ge₂及びLaNi₂Ge₂のG-X方向におけるSX-ARPES (a-d)、及び (e,f) その運動量分布関数 (MDC)、及び (g) LaNi₂Ge₂に対するバンド計算。(バンド計算はWien 2kコードを用いてGGA法で計算)

分解光電子分光(ARPES)により、バンド構造の直接観測を行いました[11,18]。

図5にCeNi₂Ge₂のZ-X方向のバンド構造を示します。いわゆる遷移行列要素の効果によって異なるBrillouin域で明瞭に見えるバンドが変わるため、励起エネルギーを変えて測定することにより、第一原理計算で予測される3本のバンド構造が観測されました。CeNi₂Ge₂のARPESスペクトルは、大筋では4f電子を持たない参照物質のLaNi₂Ge₂のバンド構造と殆ど同じであることがわかります(図5(a)-(d))。しかしながら、両物質の運動量分布関数を直接比較すると(図5(e,f))、バンドb1, b2のピークはほぼ同じ波数で観測されますが、バンドb3だけCeNi₂Ge₂の方がよりZ点側にずれていることが明らかになりました。この結果は、CeNi₂Ge₂のcf混成効果がバンドb3でより顕著であることを示しています。そこで、3つのバンドの性質を調べるべく、LaNi₂Ge₂の第一原理計算と比較すると(図5(g))、Z-X方向のバンドb3にはFermi準位近傍でGeのp軌道成分が多く含まれていることがわかりました。また、Γ-X方向のバンドにおいても、同様にGeのp軌道成分が寄与することがわかり、CeNi₂Ge₂のΓ-X方向で観測された異方的混成効果に由来する重い準粒子バンドがCe 4f軌道とGe pバンドの混成に由来することが示されました[18]。

以上の結果は、実空間の電荷分布の対称性がバンド構造に与える影響を捉えた例であり、Ce 4f軌道の対称性がcf混成効果と密接に関係し、重い電子状態や超伝導発現機構に重要な役割を担うことを示しています。さらに、Geサイトに着目した物質探索によるCeNi₂Ge₂の物性制御の可能性を示唆しています。基底状態の対称性を決定することは、低温物性の発現機構の解明に直結するため、今後は多極子自由度が織りなす多彩な物性研究への応用が期待されます。吸収分光や内殻光電子分光の終状態では局所的な内殻ホールを有するため、局所的な電子構造に敏感で尚且つ元素選択的に電子構造を捉えることが可能です。このため、空間的広がり狭い局所的な4f軌道の対称性を研究する手法として、非常に相性が良いと考えられます。

一方で、励起状態の対称性を捉えるためには、X線や中性子の非弾性散乱実験との複合研究が非常に重要です。特に共鳴非弾性X線散乱 (RIXS) はスピン、軌道、電荷の全ての自由度に敏感な実験手法であり、外部磁場や電場中における電子構造研究が可能です[19]。例えば、多極子の秩序構造由来の回折条件で測定することにより、拡張多極子の電子構造の詳細な研究が可能になるかもしれません。現在、次世代放射光施設NanoTerasuにおいて超高分解能RIXS分光器が建設中であり[20]、近い将来、量子ビームを利用した先端計測の更なる発展が期待できます。

謝辞

本研究にあたり、関山明教授、中谷泰博氏をはじめ共同研究者の皆様に厚く御礼を申し上げます。本研究は日本学術振興会科学研究費助成事業(22K03527,23H04867 他)の支援を受け、SPRING-8 BL19LXU, BL23SU,及びBL27SUにおいて実施しました。

-
- [1] F. Steglich, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **43**, 1892 (1979).
 - [2] T. Moriya and A. Kawabata, J. Phys. Soc. Jpn. **34**, 639 (1973).
 - [3] S. Watanabe and K. Miyake, Phys. Rev. Lett. **105**, 186403 (2010).
 - [4] P. Hansmann, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 066405 (2008).
 - [5] T. Willers *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **112**, 2384 (2015).
 - [6] T. Willers, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 046401 (2012).
 - [7] J.-P. Rueff, *et al.*, Phys. Rev. B **91**, 201108(R) (2015).
 - [8] T. Mori, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 123702 (2014).
 - [9] Y. Kanai, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 073705 (2015).
 - [10] H. Aratani *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 121113(R) (2018).
 - [11] H. Fujiwara *et al.*, Phys. Rev. B **108**, 165121 (2023).
 - [12] H. Fujiwara *et al.*, New Physics: Sae Mulli, **73**, 1062 (2023).
 - [13] F. M. Grosche *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **12**, L533 (2000).
 - [14] C.D. Frost, *et al.*, Physica B **276-278**, 290 (2000).
 - [15] Y. Saitoh, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 114713 (2016).
 - [17] H. Fujiwara, *et al.*, J. Synchrotron Rad. **23**, 735 (2016).
 - [18] Y. Nakatani, *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 115160 (2018).
 - [19] H. Fujiwara *et al.*, Sci. Rep. **11**, 18654 (2021).
 - [20] J. Miyawaki, *et al.*, J. Phys.: Conf. Series **2380**, 0120303 (2022).



希土類金属磁性体GdNi₃Ga₉における 反強磁性カイラルらせんの発見

中村 翔太

名古屋工業大学大学院工学系研究科 助教

1. はじめに

希土類金属磁性体GdNi₃Ga₉は結晶構造にカイラリティ（掌性）を持つ。カイラリティとは、あるモノの鏡像が回転だけで原像に戻らない性質をいう。カイラルな結晶構造をもつ磁性体では、スピンを互いに垂直にする反対称スピン相互作用により、しばしば磁気モーメントが左右どちらかの片巻きのカイラルらせん磁気構造を形成する。最近、我々はGdNi₃Ga₉が温度19.5 Kでカイラルらせん磁気秩序を示すことを共鳴X線散乱実験から明らかにした[1]。

GdNi₃Ga₉は空間群 $R\bar{3}2$ （#155, 結晶点群 D_3 ）に属し、結晶構造はカイラリティをもち、パリティ（ P ）対称性が破れている。 P 対称性が破れた系ではカイラルらせん磁気構造の起源である反対称スピン相互作用、いわゆるDzyaloshinskii-Moriya(DM)相互作用がはたらく。カイラルらせん磁気構造は隣接スピンの外積である $\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j$ で特徴づけられ、これは P -odd, T -evenである。カイラル磁性体では必ず P 対称性が破れるので、電場と磁場、応力などの交差相関を利用したデバイス応用も見込まれる。

磁性のカイラリティの研究はこれまで d 電子系が主だったが、近年 f 電子系カイラルらせん磁性体が数例見つけられ注目を集めている。その代表例は、GdNi₃Ga₉と同じ結晶構造をもつYbNi₃Al₉の一軸カイラルらせん磁気構造[2-6]と、立方晶EuPtSiのスピンの渦巻き状に配列するスキルミオン格子（Skyrmion Lattice）[7-10]である。

一軸カイラルらせん磁気構造のらせん軸に垂直に磁場を印加すると、非線形な一軸カイラルらせん磁気構造であるカイラルソリトン格子が発現する。このとき、らせん磁気構造のカイラリティは結晶のカイラル対称性によって守られるが、らせん周期はゼロ磁場より長くなり、臨界磁場で無限大になる。らせん周期は交換相互作用 J とDM相互作用 D の比で決まる隣接スピンの“ねじれ”角 $\tan^{-1}(D/J)$ を主に反映しており、カイラルらせん磁気構造を特徴づける量である。

YbNi₃Al₉やEuPtSiのらせん周期は d 電子系カイラルらせん磁性体MnSi[11]やCr_{1/3}NbS₂[12]の数百nmに比べて1/10程度の短い周期である[13]。磁気らせん構造の起源であるDM相互作用は $-\mathbf{D} \cdot \mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j$ の形で表現され、DMベクトルと呼ばれる実ベクトル $\mathbf{D}$ の向きは結晶の対称性で決まる。YbNi₃Al₉では隣り合うスピン同士が90度以上ひねられているが、絶縁体に対する理論のDM相互作用では90度以上のひねりを説明できない。伝導電子を媒介したRKKY型DMの反対称スピン相互作用を理解する必要がある、興味もたれる。

2. GdNi₃Ga₉の単結晶育成と結晶構造、磁化

本研究に用いたGdNi₃Ga₉の単結晶試料はフラックス法で育成された。原材料混合比はGd : Ni : Ga = 1 : 3 : 30で、ガリウムをフラックスとして用いている。合成は原材料をアルミナ坩堝に入れ、石英管内に真空封入して行う。

無機カイラル結晶の育成における難問は左右性制御（不斉合成）である。有機分子合成では触媒を用いて左右性が制御されているが、無機分野では不斉合成の手法がない。我々はフラックス法による結晶育成の際に溶液に温度勾配をつけて過飽和となる空間を狭め、結晶核生成を坩堝下部に制限した[14]。この方法により、左右の制御はできないが、左右どちらかの数mm角の結晶を得るに至っている。温度勾配をつけない場合だと、坩堝の

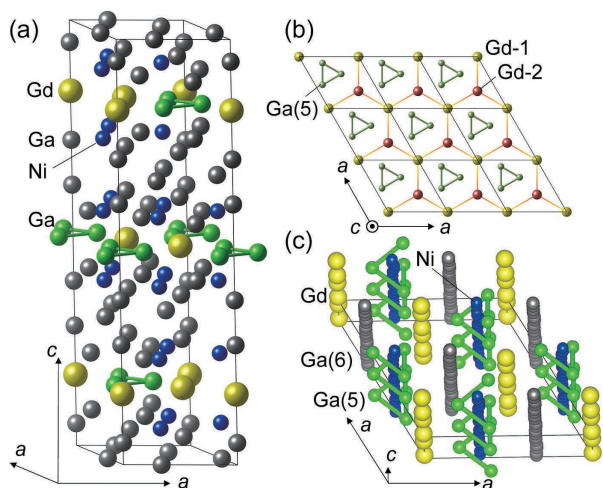


図1: (a) GdNi_3Ga_9 の複合六方格子の単位胞。Gdは1サイトであるが、後に述べる磁気構造と対応させるためにGd-1, Gd-2と記載した。(b) $z \sim 1/6$ の Gd_2Ga_3 /ハニカム層。(c) Ni, Ga(5), Ga(6)がらせんを描くようす。この図はらせんを強調するためにc軸の長さを1/10に縮めて描写している。NiとGa(6)の対称軸からの変位は微小である。なお図1(c)では、簡単のためにGa(1)-Ga(4)は省略した。

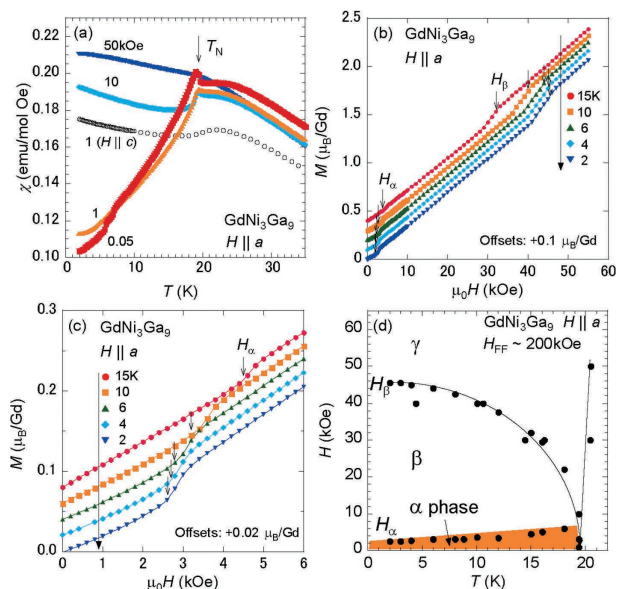


図2: (a) GdNi_3Ga_9 の磁化率の温度依存性。(b) 磁化曲線。臨界磁場 H_β 以下はらせん磁気相である。(c) 図2(b)に示した磁化曲線の低磁場部分の拡大図。(d) 温度-磁場相図。 GdNi_3Ga_9 では低温で磁場を印加すると、低磁場から順にらせん磁気 α 相、反強磁性 β , γ 相が発現する。

壁面から多数の結晶が成長してしまうため、得られる結晶が小さくなる。

GdNi_3Ga_9 の結晶構造は三方晶 ErNi_3Al_9 型である。 GdNi_3Ga_9 の各サイトの原子位置や席対称群などの結晶構造パラメータは文献14と15を参照されたい。格子定数は $a = 0.7264 \text{ nm}$, $c = 2.7497 \text{ nm}$ である。

図1(a)は GdNi_3Ga_9 の複合六方格子での単位胞である。単位胞には GdNi_3Ga_9 が6分子含まれる。この物質の結晶構造はNiとGaの三角格子層とGdとGa(5)からなる Gd_2Ga_3 /ハニカム層がc軸方向に積層しているとみることができる。図1(b)は Gd_2Ga_3 /ハニカム層を示したもので、ガドリニウムのハニカム構造の中にガリウムの小さな正三角形が配置されている。ガドリニウムは主軸(3回軸)上にあり、対称軸上にないニッケルやガリウムがc軸方向にらせんを描いている。図1(c)にそのようすを示した。

磁性は局在したGdの4f電子が担っており、Niの3d電子がGaの4s, 4p電子と混成して反対称スピン軌道相互作用がバンド構造に織り込まれる。磁気構造については後述するが、DMベクトルはc軸と平行であり、Gdの磁気モーメントはらせん構造に秩序化する。そのようすは、図5(a)に示してある。なお、我々は上記の構造を右結晶、その鏡像を左結晶と定めている。右と左結晶の区別は単結晶X線構造解析によりおこなった。

GdNi_3Ga_9 は磁気秩序温度 $T_N = 19.5 \text{ K}$ で反強磁性カイラルらせん磁気秩序を示す。図2(a)に磁化率の温度依存性を示す。らせん軸であるc軸に垂直なa軸方向に磁場を加えると、低磁場0.05 kOeと1 kOeでは T_N 直下で尖頭がみられる。これはカイラルらせん磁気構造を持ち、磁場中でソリトン格子を形成する場合に特徴的な振る舞いである[16]。らせん軸であるc軸方向に磁場を加えた場合には尖頭は観測されない。

図2(b)にa軸方向に磁場を印加した場合の磁化曲線を示す。ゼロ磁場から3 kOeまではらせん磁気相 α , 45 kOeまでは反強磁性 β 相、さらに高磁場では反強磁性 γ 相が発現する。強制強磁性状態になるのは200 kOe と、 Gd^{3+} 自由イオンのモーメントの大きさ $7 \mu_B$ から見積もられる。磁化測定によって作成した温度-磁場相図を図2(d)に示した。

図2(c)は図2(b)に示した磁化曲線の低磁場領域である。らせん磁気相では磁化曲線に特徴的な下凸の振る舞いが現れる[17]。

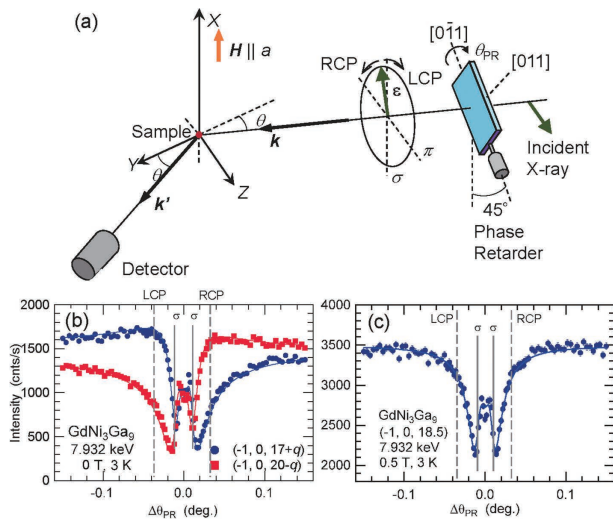


図3: (a) 共鳴X線散乱実験の散乱配置. 入射側には移相子 (Phase Retarder) が挿入されている. 移相子の角度 θ_{PR} を調整すると右と左の円偏光 (RCPとLCP) が入射される. (b) らせん磁気構造が現れる α 相における $\Delta\theta_{PR}$ スキャン. 磁気スピンがらせんを描くので, 左右非対称になる. (c) 反強磁性 β 相における $\Delta\theta_{PR}$ スキャン. らせんを描かないので, 左右対称になる.

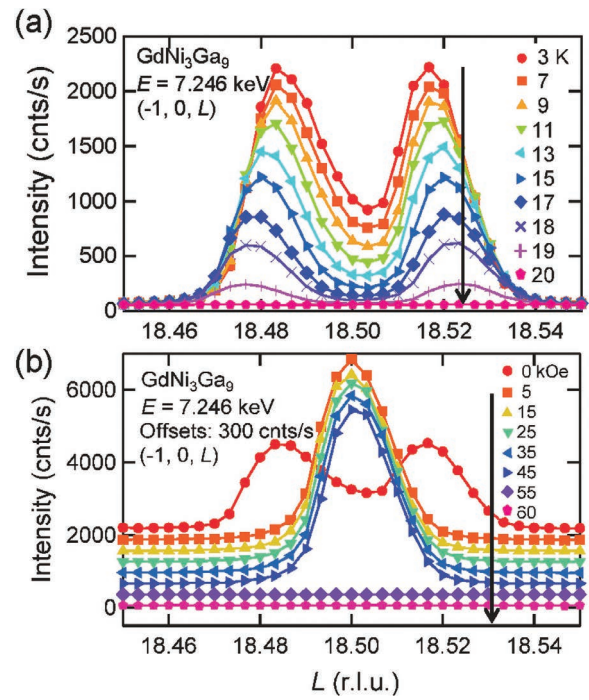


図4: (a) $(-1, 0, L)$ ピークのゼロ磁場における温度依存性. これらの2つのピークは, らせん磁気構造に由来するものであり, α 相の磁気伝播ベクトルは $\mathbf{q} \sim (0, 0, 1.485)$ とわかる. (b) $(-1, 0, L)$ ピークの温度3 Kにおける a 軸方向の磁場依存性. 5 kOe以上では β 相で $\mathbf{q} = (0, 0, 1.5)$, 55 kOe以上では γ 相で $\mathbf{q} = (0, 0, 0)$ となる.

3. 共鳴X線散乱実験による磁気構造の決定

磁気構造を調べるために, 共鳴X線散乱実験を高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 放射光実験施設BL-3Aで行った. 図3(a)にその散乱配置を示す. ダイヤモンド移相子の角度 θ_{PR} を調整することで, 入射光の偏光を直線偏光から左円偏光 (LCP), 右円偏光 (RCP) まで入射した. 図3(b)と3(c)に示すような $\Delta\theta_{PR}$ スキャンをおこなうと磁気散乱ピークの偏光特性が得られ, らせん磁気構造の有無や左右の判断ができる. また, 偏光特性のフィッティングからその構造の詳細な情報が得られる[6]. 偏光は $|\Delta\theta_{PR}|$ が十分大きければ直線 π 偏光, 点線で示した $\Delta\theta_{PR}$ がおおよそ $\pm 0.02^\circ$ のときにはRCPとLCP, 中央実線で示した位置では直線 σ 偏光に連続的に変化する. らせん磁気構造がある場合 (α 相; 図3(b)) はRCPとLCPの強度が左右非対称, ない場合 (β 相; 図3(c)) は左右対称になる. このような振る舞いは水晶において結晶のカイラリティが旋光性として現れる現象と類似である.

らせん磁気 α 相の磁気散乱ピークは $(-1, 0, 17+q)$ と $(-1, 0, 20-q)$ で観測した. 温度3 Kにおいて, 磁気伝播ベクトルは $\mathbf{q} \sim (0, 0, 1.485)$ なので, らせん周期が66.7単位胞であることがわかる. 磁気構造の詳細は後述する. なお, 消滅測($-H + K + L = 3n$)より格子による反射は $(-1, 0, 3n-1)$ に現れる.

図4(a)に, これらの回折のゼロ磁場における温度依存性を示す. $\mathbf{q}$ は温度上昇に伴って単調減少し, $\mathbf{q} = 1.48c^*$ になった. 磁場を印加すると, 反強磁性 β 相で $\mathbf{q} = 1.5c^*$ となり, 反強磁性 γ 相で $\mathbf{q} = 0$ となる.

以上の結果から, GdNi_3Ga_9 の α 相と β 相の磁気構造を決定した. これらを, それぞれ図5(a)と図5(b)に示す. Gd_2Ga_3 ハニカム層内では最近接のGd-1とGd-2が反平行に整列している. α 相では c 軸方向をらせん軸として, 隣接した層間ではGd-1あるいはGd-2同士が c 軸に沿って反時計回りに 178.2° 回転した反強磁性カイラルらせん構造が発現する. 178.2° は 180° から 1.8° だけずれており, 全く同じ磁気モーメントの向きの層が再び現れるのは c 軸方向に66.7単位胞すなわち180 nmだけ進んだときである. 単位胞には Gd_2Ga_3 層が3層あるので, これは200層分に相当する. β 相では α 相の磁気らせん構造が磁場で壊される. 層内のGd-1とGd-2は α 相と同様に反平行

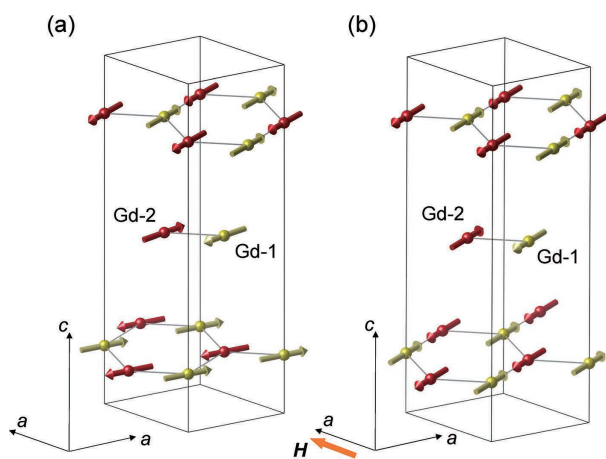


図5: GdNi₃Ga₉の磁気構造. (a) α 相の反強磁性らせん磁気構造. c 軸方向のねじれ角は10倍に強調している. (b) β 相の反強磁性磁気構造.

長い. その理由として, Gdの軌道角運動量がゼロであるためにスピン軌道相互作用や結晶場効果の影響が抑制されることや, 反強磁性らせんであることが挙げられる.

4.おわりに

本稿では4*f*電子系カイラル磁性体GdNi₃Ga₉のカイラルらせん磁気構造を紹介した. この物質のらせん周期が長い理由を今後, 解明する必要がある. らせん周期はカイラル磁気構造を特徴づける量と言え, “対称性の破れ度合”の指標となりうる. アシンメトリ量子内の共同研究で, 実空間磁化イメージングや交差相関応答の定量化を行って, らせん周期の異なるカイラル磁性体同士を比較することでこの謎を明らかにしたい.

謝辞: 本稿で紹介した研究成果は広島大学の松村武, 塚越舜, 倉内憲伸, 鈴木大斗, 高エネルギー加速器研究機構の中尾裕則, 名古屋工業大学の大原研究室との共同研究によるものです.

この研究は科研費(Nos. JP18K03539, JP20H01854, JP21K03467, JP21K13879, JP23H04870), KEK大学共同利用(Proposal No. 2022G520)からの支援を受けて行われました.

最後に, 執筆をご提案いただいた編集委員の皆さまに感謝申し上げます.

- [1] S. Nakamura, T. Matsumura, K. Ohashi, H. Suzuki, M. Tsukagoshi, K. Kurauchi, H. Nakao, and S. Ohara: Phys. Rev. B **108**, 104422 (2023).
- [2] S. Ohara, T. Yamashita, Y. Mori, and I. Sakamoto, J. Phys.: Conf. Ser. **273**, 012048 (2011).
- [3] T. Yamashita, R. Miyazaki, Y. Aoki, and S. Ohara: J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 034705 (2012).
- [4] R. Miyazaki, Y. Aoki, R. Higashinaka, H. Sato, T. Yamashita, and S. Ohara: Phys. Rev. B **86**, 155106 (2012).
- [5] S. Ohara, S. Fukuta, K. Ohta, H. Kono, T. Yamashita, Y. Matsumoto, and J. Yamaura: JPS Conf. Proc. **3**, 017016 (2014).
- [6] T. Matsumura, Y. Kita, K. Kubo, Y. Yoshikawa, S. Michimura, T. Inami, Y. Kousaka, K. Inoue, and S. Ohara: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 124702 (2017).
- [7] M. Kakihana, D. Aoki, A. Nakamura, F. Honda, M. Nakashima, Y. Amako, S. Nakamura, T. Sakakibara, M. Hedo, T. Nakama and Y. Ōnuki: J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 023701 (2018).
- [8] M. Kakihana, D. Aoki, A. Nakamura, F. Honda, M. Nakashima, Y. Amako, T. Takeuchi, H. Harima, M. Hedo, T. Nakama, and Y. Ōnuki, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 094705 (2019).
- [9] C. Tabata, T. Matsumura, H. Nakao, S. Michimura, M. Kakihana, T. Inami, K. Kaneko, M. Hedo, T. Nakama, and Y. Ōnuki, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 093704 (2019).
- [10] T. Sakakibara, S. Nakamura, S. Kittaka, M. Kakihana, M. Hedo, T. Nakama, and Y. Ōnuki, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 093701 (2019).
- [11] S. Mühlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii, and P. Böni, Science **323**, 915 (2009).
- [12] Y. Togawa, T. Koyama, K. Takayanagi, S. Mori, Y. Kousaka, J. Akimitsu, S. Nishihara, K. Inoue, A. Ovchinnikov, and J. Kishine, Phys. Rev. Lett. **108**, 107202 (2012).
- [13] Y. Togawa, Y. Kousaka, K. Inoue, and J. Kishine, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 112001 (2016).
- [14] S. Nakamura, J. Inukai, T. Asaka, J. Yamaura, and S. Ohara: J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 104005 (2020).
- [15] 大原繁男, 中村翔太, 固体物理 **55** (11) 647 (2020).
- [16] J. Kishine, K. Inoue, Y. Yoshida: Progress of Theoretical Physics Supplement **159**, 82 (2005).
- [17] Y. Kousaka, S. Yano, J. Kishine, Y. Yoshida, K. Inoue, K. Kikuchi, and J. Akimitsu: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 123709 (2007).



国際会議参加報告：SCES2023

藤原 秀紀

大阪大学大学院基礎工学研究科 助教

2023年7月2日から7日にかけて韓国の仁川で強相関電子系に関する国際会議（SCES2023）が開催され、およそ3年ぶりに国外開催の国際会議に参加いたしました。昨今の社会情勢もあり、同じように国際会議ロスの状態にあった方々も多数おられたのではないかと思います。筆者もあまりに久しぶりであったため、飛行機の手配や移動手段の検討まで色々と要領を得ず、そもそも会議場に辿り着けるのか?と一抹の不安を感じながら参加した次第です。下調べも御座なりであったため、空港から会場近くの街まで電車で2時間もかけて物凄く遠回りしてしまい、手配していたホテルも何故か名前が変わっていて、近所を30分近くウロウロ探して回ったりしてしまったりと、久々の海外出張は上々の滑り出しとなりました。

ようやく仁川国際会議場にたどり着くと、会場は既に大変な賑わいを見せていて、皆さま国際会議を満喫されている様子でした。プレナリーセッションや受賞公演が行われる大会場は開放的で美しく(図1)、一般講演が行われる会場も立ち見があるほどの盛会でした。議論の内容も非常に密度が濃く、強相関4f、5f電子系の量子臨界現象に関するセッションや酸化物超伝導体のセッションに加え、トポロジカル物質やワイル磁性体、スキルミオンに関する会場が盛り上がっている印象を受けました。昼食時間帯に開催されたPoster発表も盛会で、食事も忘れ

て白熱した議論がなされていました。

さて、強相関電子物性を議論する上で高輝度放射光等の量子ビームを利用した電子状態の精密計測は非常に重要となりますが、今回の会議では超高分解能共鳴非弾性X線散乱(RIXS)を用いた酸化物超伝導体の素励起分散に関する講演が増えている印象を受けました。Bryan R. Coles Prizeを受賞された鈴木博人先生(東北大)の受賞講演も含め、RIXSで測定した素励起分散から超伝導体中のスピン間の交換相互作用に関する高度な議論がなされ、高分解能RIXSが次世代の分光手法として世界的に注目されていると感じました。日本においても、宮城県仙台市の青葉山に現在建設中の次世代放射光施設“NanoTerasu”において、超高分解能RIXS分光器の開発が進んでいます。近い将来性、日本においても世界最高分解能での磁気励起構造や軌道波励起構造の研究が進むことを期待したいと思います。

最後になりますが、今回のSCESはイタリア、ボローニャで開催とのことでした。会場は空港からスポーツカーで30分ほど?とのことですので、折角の機会なので体験してみても良いかも知れませんね。早くも来年の国際会議が楽しみになってきましたが、実験屋にとってまずは良い実験結果を得ることが重要です。美味しいピザを目指して、本稿を放射光実験と並行して執筆している次第です。



(図1) メイン会場(左)、一般会場(中央)とポスター会場(右)の様子



2023年夏の学校ミニ（多極子編）に参加して

日比野 瑠央

北海道大学大学院理学院 博士後期課程2年

2023年8月31日から9月2日までの3日間に渡って北海道大学で行われた「夏の学校ミニ（多極子編）」に参加させて頂きましたので、学生視点から講義の感想を簡潔にご報告したいと思います。本講義は、ハイブリッド形式が取られていましたが、夏の学校の前にA01・A02トピカルミーティングが同大学で開かれたこともあって、多くの方が対面で参加されており活発な意見交換がなされていました。学生だけでなく、実験家の先生も数多く参加されており、貴重な機会を無駄にするまいと丁寧にノートを取っていらっしゃった様子が印象に残っています。自分もしっかり勉強しなければと気が引き締まりました。物理的側面に限らず、研究に必要な勉強のモチベーション面に関しても、良い刺激を受けることができました。

講義内容は「多極子」を中心として、理論的な基礎知識から、実験的に観測が予測される応答現象まで多岐にわたるものでした。3日間の夏の学校は、速水先生によるイントロダクションから開始しました。講義の主題である4つの多極子自由度（電気多極子、磁気多極子、電気トロイダル多極子、磁気トロイダル多極子）の話の前に、反強磁性体の異常ホール効果などの実例を交えつつ、ミクロな電子状態とマクロな対称性の繋がりを丁寧に解説して下さいました。また、服部先生の第一講では、実際に手を動かしながら群論の基礎を勉強させて頂きました。群論に関しては、これまで独学で勉強することが多く、講義形式で体系的に復習できる良い機会となりました。2日目以降は、実際に本学術領域でも研究対象となっているような物質例を交えて、

多彩な多極子秩序や、それに起因した交差相関現象などに関する講義を受けました。私は現在、非クラマース Γ_3 二重項を結晶場基底にもつ f 電子系化合物を中心に、超音波測定を用いることで、超音波による誘起歪みと結合する電気四極子・十六極子といった高次多極子が生み出す物性を研究しております。特に、速水先生が本講義内で何度かおっしゃっていた「低次多極子に比べて、高次多極子の物性への寄与が小さいわけではない」という点について興味が引かれ、交差相関現象を始めとした新奇実験手法によってプローブできたら物理の裾野が広がるのではないかとワクワクしました。また、服部先生の講義では、様々な秩序変数や秩序波数を持つ多極子秩序に関して、具体例を交えて勉強することができて大変面白かったです。

今回、「多極子」に絞った集中的な講義を3日間受け続けたことにより、自身の研究に関する理論的側面の理解を深めることができました。理論、実験を問わず様々な先生の講義を直接受けさせて頂くのは大変貴重な機会だと思いますので、次回以降もこのようなセミナーが開催された際は、恐れず参加したいと思います。2024年9月には若手秋の学校が開催予定とのことですので、そちらにも是非参加し様々な事柄を吸収したいと考えています。

国際研究会H-Physics Workshop開催報告

開催期間：2023年10月10日（火）～12日（木）

開催地：フランス・グルノーブル市、Basilique du Sacré-Cœur

主 題：Topology, spin-orbit interactions and
superconductivity in strongly correlated quantum materials under extreme conditions

共 催：東北大学金属材料研究所、本学術変革領域、フランス国立科学研究センター（CNRS）、
民間企業など

会議URL：<https://sites.google.com/view/h-physics-workshop/home?authuser=0>

フランスのグルノーブル市にて、国際研究会「H-Physics Workshop」が盛況のうちに開催されました。本ワークショップは、強相関電子系の先端的話題に焦点を当て、日欧の研究者間の交流と学術的な発展を目的に開催されたものですが、会議名称の「H-Physics」からご想像いただけますように、本領域の前身である「J-Physics」を率いられた神戸大学の播磨尚朝教授の定年退職を特に記念して企画されたものです。長年にわたる播磨教授とグルノーブルの研究メンバー、特にJ. Flouquet教授との親交を核に、お二人とその周りの方々がこれまで育ててこられた日欧の国際的な学術連携の発展を祝し、播磨教授の功績に感謝するとともに、次世代への継承とさらなる発展を展望するものです。

また、この機会を利用して、若手研究者や学生に向けた交流の場も設けられました。ワークショップの前日である10月9日には、フランス国立科学研究センター（CNRS）の強磁場研究所（LNMI）でチュートリアルセッション「KINKEN-WAKATE 2023」が開催され、参加者は専門的な知識の習得と共に国際的なネットワークを広げる機会を得ました。多くの学生がこのワークショップおよびチュートリアルに参加しましたが、その中で、5名の学生が東北大学金属材料研究所および学術変革領域総括班の「若手研究者派遣助成事業」によって支援を受けています。以下に、彼らの感想を紹介します。



宮本 大輝

大阪大学大学院基礎工学研究科
博士後期課程1年

大阪大学博士後期課程1年の宮本大輝と申します。この度は、学術変革領域（A）アシンメトリが彩る量子物性の可視化・設計・創出の若手研究者派遣助成事業からご支援賜りまして、フランスのグルノーブルで行われた「H-physics workshop」への参加、並びにCEA, ILL, ESRF, CNRSなど多くの研究機関を見学させていただきました。私自身、今回が初めて海外へ行く機会でありましたが、多くの先生方のご支援のおかげでとても充実した初海外となりました。

今回の件が決まってから楽しみにしていたのが、自身の研究でも取り扱っている走査型SQUID顕微鏡をご専門にされているKlaus Hasselbach教授の研究室見学でした。Klaus教授のSQUID顕微鏡は、私が扱うものとは異なり、フィードバックを用いない非常に測定環境に気を遣う必要のある難易度の高い手法でした。この難度の高い測定を実現するための細やかなセットアップはもちろん、建物そのものが研究のために整えられており感銘を受けました。

文化の面でも驚きの連続でした。日曜日に町を歩いてみましたが、本当に店が1つも空いていません

でした。ネットで事前に調べていたので知識はあったのですが、聞きなじみのあるチェーン店ですら閉まっていて、町に働いている人がいなかったのは驚きでした。フランスでは昼食の後にティータイムがあるなど、休み時間がスケジュールの上では長くなっているように感じましたが、その分オンオフをしっかりと切り替えて効率的に活動しており、見習う点が多くありました。

最後になりますが、今回の海外派遣に伴いご支援賜りました、H-physics関係者の皆様、青木先生をはじめとする東北大学の関係者の皆様、現地での活動を調整してくださったJean-Pascal Brison氏をはじめとする関係者の皆様にこの場を借りてお礼申し上げます。



大石 遼平

広島大学大学院先進理工系科学研究科
博士後期課程2年

「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」若手研究者派遣からの助成を頂き、2023年10月9日から12日にかけてフランスのGrenobleで開催されたH-Physics Workshopに参加しました。向こうの研究所を訪問したことをはじめ、現地での生活等について報告します。

Grenobleはイタリアとの国境近くに位置し、放射光施設のESRF、国立科学研究センター (CNRS)、ILL中性子研究所、CEAなどの施設が存在する研究都市

でした。井澤先生が現地の方と日程調整をしていただき、その施設のほとんどを見学することができました。私は希土類を含む金属間化合物の単結晶育成を専門としているため、Gerard博士 (CEA)のCzochralski法の技術には、目から鱗なものが数多くありました。どの研究者の方も結晶合成に対する多大なこだわりをもっており、自身もより一層修行せねばと強く決意しました。

海外の研究者とのコミュニケーションでは、自己紹介が非常に重要と感じました。名前や出身を伝えた後に“間”があり、そこでどんな研究者なのかを伝えることが求められました。なので、文法や発音に間違ってもいいから、自分が興味をもっている研究内容、研究手法など自信をもって紹介しています。理解しようとする聞く側の姿勢に何度も助けられましたが、理解できた時には、とてもフェアに扱ってくれました。数多くの研究者とのコミュニケーションを通して、臆せず英語で話せるようになったと思います。

最後になりますが、鬼丸先生をはじめとする関係者の皆様に、お礼を申し上げます。



今 布咲子

北海道大学大学院理学院
博士後期課程3年

私の旅は、羽田空港の搭乗口にスマホを置き忘れるというアクシデントに始まった。本研究会では、そんなポカミスが悔やまれるような、思わず写真を撮

りたくなるメモリアルな場面に多く遭遇した。久々の再会を喜び、昔を懐かしむ先生方の姿が印象に残っている。

大規模な国際会議とは異なり、本研究会では終始アットホームな雰囲気があった。チュートリアルセッションも含め、発表ではそれぞれの研究の経緯や、研究生生活に関するエピソードまで詳細に語られた。どれも普段はなかなか聞けない話で興味深かった。そしてこれまでの研究が、国境を越えた理論・実験研究のコラボレーションによる、ある種のチームワークによって進められてきたことがよくわかった。また個人的には、先輩女性研究者らとの交流も大きな刺激となった。彼女らの海外での活躍、生活を知り、行動力の高さに驚かされた。

播磨先生がおっしゃったように、海外経験は人生を変える、かもしれない。数日間の短い期間ではあったが、そんな可能性を感じる体験となった。今回得られた新たな出会いを含め、国内外の繋がりを大切に、いつか自分もチームの一員だと実感できるような研究をしていきたい。この貴重な機会を与えていただいたことに深く感謝いたします。



須藤 健太

東北大学金属材料研究所
博士後期課程3年

本領域の旅費支援を受けて、昨年フランス・グルノーブルで開催されたH-physics 研究会(2023年10月9日-10月12日)へ参加することができました。研究会では、様々なトピックの講義を聴講し、今後の研究テーマにつながるヒントを得ることができました。また、私は「ジグザグ構造を持つ反強磁性金属における非相反電気抵抗」についてポスター発表を行いました。様々な研究者と、自身の研究の進展につながる議論をすることができ、大変有意義な研究会でした。

研究会に参加していたグルノーブルの大学院生の方々と交流を深めることもできました。また、東北大から学生の参加は私のみでしたが、他大学の日本人学生ともたくさん交流することができ、とても楽しい思い出になりました。ワークショップディナーの行われるBastilleのレストランまで、学生みんなで徒歩で向かいました。途中見た夕方のGrenobleのきれいな眺めが印象深いです。

旅費支援のおかげで公私ともに大変有意義な渡航をすることができました。ありがとうございました。

昼食会場の様子。ランチタイムがゆったりと設けられており、ここでも色々なエピソードを聞くことができた。



鈴木 大斗

広島大学大学院先進理工系科学研究科
博士後期課程 1年

2023年10月3日から16日までアシンメトリ量子の支援を受けてフランス、グルノーブルで行われたH-Physics Workshopに参加し、ポスター発表を行ってきました。また、井澤公一先生、松田達磨先生、現地の方々のご厚意によりCEA、ILL、ESRF、CNRSといった普段は見ることもできないような研究施設を見学することができました。巨大なハイブリッドマグネットや中性子の分光器など初めて見るものが多く、とても楽しかったです。この場を借りてお礼申し上げます。

グルノーブルは日本ではなかなか見ることができないような岩山に囲まれた街でした。Workshop

Dinnerはバスティーユ城塞のある岩山の上のレストランで行われ、そこからの眺めは街を一望でき、絶景でした。ちなみに私はバスティーユ城塞に徒歩で2回登りました。この短期間で2度も登ったのは私くらいではないでしょうか。また徒歩で登りたいとは思いません。現地の学生との交流の機会にも恵まれました。晩御飯を一緒にしたり、ダーツをしたりと、とても楽しい時間を過ごすことができました。特にWorkshop Dinnerからの帰り道では、ケーブルカーを使わずに街灯もない真っ暗な坂道を大人気で騒ぎながら歩いて帰ったことは忘れません。

ポスター発表では最近行っているEu化合物について発表しました。私の拙い英語を根気よく聞き、議論していただきとても感謝しています。それと同時に自分の英語力のなさを痛感しました。この経験を活かし、今後の研究生生活に役立てていきたいと思います。



バスティーユから眺めたグルノーブルの夜景



第17回物性科学領域横断研究会

大原 繁男

名古屋工業大学大学院工学専攻 教授

第17回物性科学領域横断研究会が2023年11月24日(金)、25日(土)に、名古屋工業大学で開催されました[1]。この研究会は、秋光純先生と福山秀敏先生の発案で始まり、両先生が交互に正副組織委員長を務められて開催されて来ました。物性科学に関連した大型の科学研究費助成事業の研究組織が合同で開催するもので、日本物理学会の協賛を得ています。

現在は、14件もの新学術領域研究と学術変革領域研究(A、B)が参加しています。領域外の研究者や大学院学生に対し互いに研究を紹介して、相乗効果を高めるとともに、最新の物性科学を概観すること

を目的としています。各領域から1名ないしは2名による口頭講演と全体で約70件のポスター発表が行われました。今回、ポスター発表は参加領域からに限られ、一般からの発表(ポスター)は受け付けませんでした。パンデミックもおさまってきましたし、会場の事情が許すならば、次年度以降は再開して欲しいところです。

「アシンメトリ量子」は今年度からの参加です。初参加ということで、鬼丸孝博氏(領域代表)による領域の紹介と大槻純也氏(領域事務局)による理論の立場からの口頭講演が行われました[2]。ポスター発表には推薦を受けた6名が参加しました。ポスター発表に対しては、2名に最優秀若手奨励賞、4名に若手奨励賞が与えられました。本領域からは、東北大学の須藤健太さん[3]が若手奨励賞に選考されました。おめでとうございます。

本研究会では、凝縮系科学賞授賞式と記念講演も行なわれます。凝縮系科学賞は、優れた若手研究者を奨励することを願い、2006年に秋光純先生と福山秀敏先生が私費を投じられて創設した賞です[4]。

第18回凝縮系科学賞受賞者は、実験部門では米田淳氏(東京工業大学)が、理論部門では、本領域メンバーの一人であるB01の速水賢氏(北海道大学)が選考されました。授賞対象となった速水氏の研究は「相関電子系に対する多極子表現論の構築と



(上) 鬼丸孝博領域代表による講演の様子

(下) 大槻純也B01代表による講演の様子

交差相関応答への適用」であり、本領域の基礎となった理論です[5]。心よりお祝いを申し上げます。なお、開催にあたっては、名工大物理工学科に所属している学術変革領域研究(A)「超秩序構造」の林好一代表が運営委員長をつとめ、大原も写真撮影などいくつかのお手伝いをさせていただきました。

今後、研究会の運営も含めて継続して参加していくことになります。物性科学領域横断研究会の発展に寄与していけるよう、皆でがんばりましょう。



若手奨励賞に輝いた須藤健太氏（東北大金研）

[1] https://www.rs.tus.ac.jp/ryoikioudan_17th/index.html (2024年1月6日確認)

[2] 講演題目は次のとおりです：鬼丸孝博（広島大学）「アシンメトリ量子物質の可視化・設計・創出による機能物性の開拓」、大槻純也（岡山大学）「多極子を用いた電子状態および応答の記述と物質設計へ向けて」

[3] 講演題目「FIB微細加工を用いたアシンメトリ反強磁性体における非相反伝導の研究」

[4] <https://cmsp.phys.s.u-tokyo.ac.jp/> (2024年1月6日確認)

[5] 受賞に関する論文は次のものです：S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, "Toroidal order in metals without local inversion symmetry", *Physical Review B* **90**, 024432 (2014)., S. Hayami and H. Kusunose, "Microscopic Description of Electric and Magnetic Toroidal Multipoles in Hybrid Orbitals", *Journal of the Physical Society of Japan* **87**, 033709 (2018)., S. Hayami, Y. Yanagi, and H. Kusunose, "Momentum-Dependent Spin Splitting by Collinear Antiferromagnetic Ordering", *Journal of the Physical Society of Japan* **88**, 123702 (2019).

[6] なお過去には、A02の橘高俊一郎氏（第14回）、B01の野村悠祐氏（第17回）も受賞しています。



アシンメトリ量子物質の開発 ～現状と展望～

松田 達磨

東京都立大学大学院理学研究科 教授

2024年、最初のトピカルミーティングが1月5日と6日の二日間の日程で、九州工業大学戸畑キャンパスのインタラクティブ学習棟「MILAIS(ミライズ)」にて開催されました。年明け早々の会期ということで正月休みから気持ちを切り替えつつ、直前の能登半島地震や羽田空港での事故、小倉繁華街での火事などもあり、参加者の皆さんはそれぞれ不安や複雑な気持ちの中、小倉に移動されたようです。それでも、会議には領域のメンバーのみならず領域外からの多数の研究者と18名の学生の参加もあり、計54名という参加人数となりました。

今回のトピカルミーティングは、タイトルにある通り、研究対象となる物質開発の現状と展望を共有するという趣旨に加え、全講演数の2/3近い12件が領域外からの招待講演というプログラムが組み、新しい展開を期待するものとなっていました。会議の冒頭、領域代表の鬼丸氏からも、領域研究のますますの活性化と次年度からの公募班の活動も見据え、様々な融合研究の発展を願う主旨の挨拶がありました。その後の講演では、精力的に研究が行われている $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ や CeCoSi における奇妙な秩序状態について集中的に議論が行われた他、遷移金属、希



写真2 右から領域代表の鬼丸氏、ポスター賞を受賞した今さん、中山さん、大石さん

土類及びアクチノイド化合物、またそれらの酸化物、分子性物質系等々、非常に幅広くアシンメトリー量子物質の概念の適用について議論が交されました。新しいアイデアや研究の方向性など領域外の方からの講演は大変刺激になるものでした。ポスター発表は21件。学生の方の発表が多数あったことから、ポスター賞が設定されました。会議参加者による厳正な審査の結果、最優秀賞は今布咲子さん(北海道大学)、優秀賞は大石遼平さん(広島大学)と中山祐樹さん(名古屋大学)の2名に授与されました(写真2)。

会議の最後に、CO2班代表の吉田氏より、会議の総括として様々な分野の研究の「融合」の重要性とその難しさについて述べられつつ、新しいアシンメトリー量子物質開発の展開を期待し閉会となりました。最後に、年明け早々の会議の開催準備・運営に携わって頂いたスタッフ、九州工業大学の皆様に感謝したいと思います。

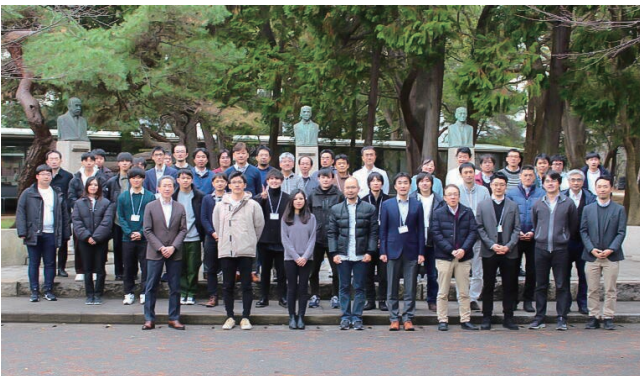


写真1 集合写真



物質探査と超伝導が拓く未来

大原 繁男

名古屋工業大学大学院工学専攻 教授

日 時：2023年11月16日（木）

2・3限（9：55～12：15） 4、5組

4・5限（12：55～15：15） 1、2、3組

場 所：愛知県立一宮高等学校 桃陵館

対 象：3年生理系クラス（1～5組、200名弱）

愛知県立一宮高校で「物質探査と超伝導が拓く未来」と題したアウトリーチ活動を行いました（写真1）。理科系の3年生200名弱を対象に、午前と午後の2クラス約100名ずつに分けて講演しました。

前半は、学術変革領域研究とも関係づけて（写真2）、物質とはなにか、温度とはなにか、を高校生に考えてもらいます。議論しながら、物質を探索すること、低温で実験すること、相転移などについて理解を深めていきます。新物質が新しい物理や機能を生み出すこと、材料となった場合には社会を変革すること、人類を幸福にするかどうかは使い方にあることもコンピュータやハードディスクドライブなどを例に示します。新物質を探索する理由に生徒から「自己満足」という意見があり、研究を進める原動力となる情

熱や好奇心という意味ではそれも大事、でも何らかの研究価値がなくてはならない、という説明で対応しました。

後半は、新しく得た知識や理解を使いながら、液化窒素を使った実験を行います（写真3）。酸素の液化と高温超伝導体（YBCO）を用いた浮き磁石の実験を通して、相転移を肌で感じてもらいます。酸素の液化では、液体（固体）がどのくらいの原子（分子）が集まってできているのかも理解させます。色の観察やネオジム磁石に対して反応への高校生の驚きには、いつも嬉しくなります（写真4）。浮き磁石の実験は、やや遊ぶ感じになりますが、「うわっ」「すごい」という声が上がリ、スマホで動画を撮りはじめたりするようを見ると、まずはこの感動が必要だよ



写真1 講演開始直前で緊張しています。



写真2 「アシンメトリ量子」の「可視化・設計・創出」を活用しています。



写真3 空気中の約8割は窒素ですね。
これをギュッと圧縮すると・・・

ね、と思ってこちらも笑顔になってしまいます。

実験後に、カマリング・オネスによる水銀の電気抵抗率の測定、永久電流の観測[1]を紹介し、なぜ水銀が選ばれたか、ゼロをどうやって証明するか、などの説明をします。完全反磁性は簡単な紹介にとどめています。

生徒たちは、銅細線とYBCOの抵抗率の温度変化の実験を事前に行い、レポートを提出しています。講義までに無作為に選ばれた20部程度のレポートを読ませてもらっています。講義では実験の記録や計算における間違いを指摘するとともに、よい考察があれば紹介しています。

今回は、熱電対への興味や、抵抗がこんなに温度で変わるなら夏と冬で製品の消費電力に差が出るのだろうか、という疑問を示した生徒がいました。高校生の興味が広がっていることがわかります。四端子法

に言及しているレポートがあったので、微細加工試料の写真を見せて、基本的な測定方法であることも紹介しました。

実験の考察に「よい。」「よくない。」とだけ書いてある場合もあります。何が、どのように、なぜ、といった情報が欠落していることを指摘して「不足を補い、過剰を排除して、わかりやすい文を簡潔に書く」ことを勧めています。

授業の終わりに、いくつか質問をうけました。永久電流の寿命の求め方や電子雲を表現した点の意味など説明不足だったところに関して質問に応じる形で補いました。



写真4 液化酸素がネオジム磁石に反応する
ようすを見るには・・・

[1] Dirk van Delft and Peter Kes, Physic. Today **63**, 9, 38 (2010).



速水 賢さん 凝縮系科学賞受賞

網塚 浩

北海道大学大学院理学研究院 教授

計画研究B01のメンバーである北海道大学の速水賢さんが、第18回（2023年）凝縮系科学賞を受賞されました。受賞理由は「相関電子系に対する多極子表現論の構築と交差相関応答への適用」に関する先駆的な研究です。2023年11月24日（金）に第17回物性科学領域横断研究会（領域合同研究会）（名古屋工業大学＆オンライン）の中で表彰式と記念講演が行われ、秋光純同賞運営委員長と福山秀敏先生から賞状その他が授与されました。心よりお祝いを申し上げます。

凝縮系科学賞は、物理学・化学・材料科学にわたる広い意味での凝縮系科学に従事する優れた若手研究者を奨励することを願い、青山学院大学（現 岡山大学 特任教授）の秋光純教授と東京理科大学の福山秀敏教授が私費を投じて2006年に創設した賞です[1]。



毎年、原則として実験分野と理論分野からそれぞれ1名の受賞者が選ばれます。今回、速水氏とともに実験分野で受賞されたのは、東京工業大学の米田淳氏で、「シリコンスピン量子ビットの高度な忠実度とその応用」に関する研究が高く評価されました。

速水賢氏の研究は、強相関電子系における多彩な電気磁気応答現象、交差相関応答の理解に貢献し、この分野の研究に新機軸を切り拓くものです。速水氏は、従来の磁気多極子や電気多極子だけでなく、磁気トロイダル多極子、電気トロイダル多極子という新しいタイプの多極子を含む4種類の多極子基底を用いて電子系の秩序状態を表現し、32の結晶点群に対する多極子の表式を分類しました[2]。これにより、各点群で活性化する多極子自由度および可能な交差相関応答を明らかにしました。また、磁気トロイダル秩序が金属において実現した場合、金属特有のスピン伝導や電気磁気効果が発現し得ることを提案し、実際に実験で確認されています[3]。さらに、多極子表現論を起点とした模型解析によって、反強磁性体のバンド構造では結晶対称性の破れによってスピン分裂が現れることも指摘しました[4]。速水氏の業績は、マルチフェロイクス、スピントロニクス、カイラル物質科学など多岐にわたる分野において今後も大きな波及効果が期待されます。そしてもちろん、J-Physicsに引き続く本領域研究においても核となる指針を与えています。今後のますますのご活躍を期待いたします。

[1] 凝縮系科学賞Webサイト <https://cmsp.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

[2] S. Hayami and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033809 (2018).

[3] S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, Phys. Rev. B **90**, 024432 (2014).

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



凝縮系科学賞を受賞して

速水 賢

北海道大学大学院理学研究院 准教授

このたび、「相関電子系に対する多極子表現論の構築と交差相関応答への適用」という題目で、凝縮系科学賞という大変栄誉ある賞をいただきました。研究を支えてくださった共同研究者・領域関係者の方々、応募をご推薦頂いた先生方、研究成果を評価してくださった選考委員の先生方に、心より感謝申し上げます。

なぜ私のような未熟者が本賞を受賞できたのかを振り返りますと、きっと運が良かったからだと思います。以下に実感した3つの幸運について紹介させていただきます。

① 網塚グループによる電気磁気応答現象の観測

私が多極子に関する研究を開始したのは、大学院生(D2)であった2013年頃で、最初の研究テーマが「金属中における磁気トロイダルモーメントが示す電気磁気効果やバンドボトムシフト」になります。この研究は、原子サイトにおける反転対称性の破れに伴う局所的なパリティ混成に着目することで、単純な交替的反強磁性体が磁気トロイダルモーメントを伴うこと、電気磁気効果や非相反応答の微視的起源となるバンドボトムシフトの存在を理論的に示したものです。運が良かったのは、理論提案した直後に、候補物質として挙げていたf電子系化合物UNi₄Bにおいて、電気磁気応答現象が網塚グループ(北大)によって観測されたことです。この定量的な実験観測は、磁気トロイダル秩序をはじめとする奇パリティ多極子に関する後の研究を推進する上で、大きな道標になったのではないかと思います。

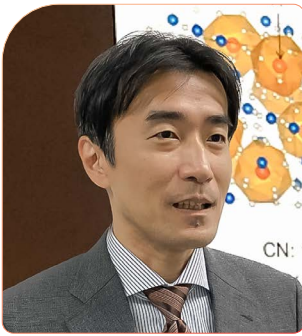
② J-Physics およびアシンメトリ量子の発足

私が研究を開始した2013年以降に、多極子物理に関連する大きな2つのプロジェクト(J-Physicsおよびアシンメトリ量子)が順に発足したことも幸いでした。多くの発表や議論を通じて、様々な背景をもつ研究者の方々と定期的に議論する機会はとても良い刺激になりました。実際に、私の多極子研究に関する着想の多くはこうした機会を通じて得られたものです。本受賞の根幹をなす「4つの多極子による完全基底の構成」という考えも、この当時に生まれました。

③ 多様なバックグラウンドを有する共同研究者に恵まれたこと

最大の幸運は、理解のある多くの共同研究者に恵まれたことです。特に、研究当初の指導教官である求先生、研究初期から現在に至るまで継続して議論して下さる楠瀬先生からは本当にたくさんのことを学びました。異なるバックグラウンドをもつお二方との議論を通じて、様々な方向性から物事を俯瞰する力を身につけることができたかと思います。こうした俯瞰的な力が、固体物性現象を統一的に記述する多極子表現論の構築に役立ったのではないかと感じております。

最後になりますが、4つの多極子は完全基底をなすために、あらゆる電子秩序相や応答現象を表現できます。従いまして、何か新しい横文字の専門用語が業界内に出てきた際にも、それは何某かの多極子自由度によって記述されます。例えば、「altermagnet ⇔ 磁気トロイダル四極子」、「ferroaxial ⇔ 電気トロイダル双極子」、「anapole, current order ⇔ 磁気トロイダル双極子」といった具合です。また、多極子基底はミクロな電子自由度に基づいて構成されているため、対称性を超えた議論も可能です。今回の受賞を励みにして、これからも多極子研究をコツコツと進めていきますので、今後ともどうぞよろしくお願いいたします。



共用設備備品「無冷媒低温材料物性自動測定システム」の導入

鬼丸 孝博

広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授

本研究領域の共用機器として、無冷媒低温材料物性自動測定システムが導入されました。2023年10月に、広島大学大学院先進理工系科学研究科の先端科学総合研究棟1階に設置されたところです（写真参照）。パルスチューブ冷凍機による冷却と超伝導マグネットによる9テスラまでの磁場印加のテスト運転を経て、無事に稼働しました。その後、東京インスツルメンツの技術担当の方に講習会を開いていただき、同システムの使用方法について説明を受けました。現在、直流4端子法による電気抵抗・ホール抵抗の測定と熱緩和法による比熱の測定を手持ちの試料で行い、自動測定システムの動作確認とデータの再現性のチェックなどを行っています。本装置の導入によって、本領域で対象とするアシンメトリ量子物質の

基礎物性の評価ならびに新しく創出される物質の物性測定を安定的かつ迅速に行い、研究活動をより推進することを目指します。

また2024年度より、同システムの管理と領域内共同利用を担当する博士研究員を1名採用します。送付された試料を装置にセットアップし、測定はオンラインでできるようにするなど、領域内で開発された物質を素早く評価する体制を整備します。また、本機器の導入は、昨今のヘリウム枯渇危機による寒剤の価格高騰や運転期間の短縮といった問題への対応としても重要な意味をもつと考えています。

皆さんの積極的なご利用を、よろしくお願いいたします。

設置場所 広島大学大学院先進理工系科学研究科
先端科学総合研究棟1階（広島県東広島市）

装置仕様 Cryogenic社製 CFMS-9T
超伝導マグネット（最大磁場強度 9 T）
統合型温度可変インサート（1.6~400 K）
CRYOGENIC社HP：

<https://www.cryogenic.co.uk/products/high-field-cfms-9-18-tesla>

測定物理量及び条件

電気抵抗

（20ピンサンプルホルダ, 直流4端子法, 磁場 9 T, 1.6 ~ 400 K）

- ・測定プローブにより、磁場方向は面内と面直から選べる。
比熱（熱緩和法, 磁場 9 T, 3 ~ 300 K）
- ・温度計測には、抵抗温度計（RuO₂）と熱電対を併用。
- ・サンプルホルダの設置方向により、磁場方向は面内と面直から選べる。

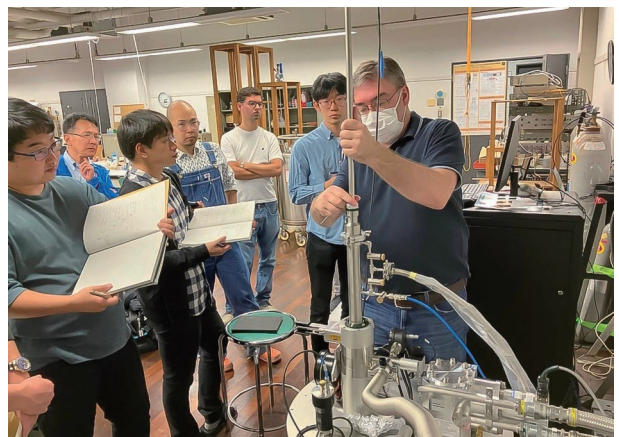
共用開始時期 2024年6月頃を予定。

その他特記事項 実験内容については、事前に相談してください。

装置担当者 鬼丸 孝博

（広島大学大学院先進理工系科学研究科・教授）

E-mail: animaru@hiroshima-u.ac.jp



アシタ★通信



2019年2月20日8:20頃の
気象衛星「ひまわり」の画像(気象庁)

第2話 「渦巻きってどっち巻きなん？」



芦芽量子

コロネパン食べるとき、**右巻き**左巻きどっちなん！？って
考えはじめたら目が回ってしも一た。

コロネの**左右性**(キラリティ)に気づいてしまったのですね。
これも**アシンメトリ**の一種で、物質の中にも
そういった構造を持つものがあります。



どっちかの巻き方が選ばれる(**対称性が破れている**)のには何か理由があるん？

例えば身近な渦巻として台風を例に挙げると、
日本にやってくる台風は**右巻き・左巻き**どちらかに決まっています。
どちらだと思いますか？



台風は性格が悪いけん、**左巻き**じゃわ。

なるほど💧 では日本に来る台風の写真を指でたどってみましょう。
外から内にたどると、左へ回って反時計回りに進みますね。
左に回るから、これを左巻きと呼ぶことにしましょう。



ほんじゃが、内から外にたどると右へ回って時計回りになるけん、
右巻きになってしまわんかね？

その通り！
「進む方向が決まらなると右巻きとも左巻きとも言えない」ことがわかったので、
進む向きは風の向きと同じにします。台風は低気圧で中心に向かって風が流れ込むから、
北半球の台風は宇宙から見て反時計回り。左巻きということになりますね。



やっぱり**左巻き**なんじゃ！

一方、上の写真にもあるように**南半球に発生する台風は必ず右巻き**です。
この**対称性の破れ**は地球の自転による**コリオリの力**の影響で説明できます。
その作用が北半球と南半球では逆になるからです。



うちのコロネパンが細い方から見ると右巻き、
太い方から見ると左巻きなんは、コリオリの力のじゃったんじゃね。

だとしたらすごいです(苦笑)、
おそらくコロネの左右性は、パン職人さんに依存するのでは・・・



そんな「**隠れた秩序**」があったんじゃね。ぶち面白いね！
みんなも、身の回りの渦巻き(蚊取り線香や巻貝)がどっち巻きか、観察してみんさい！



2024年4月からの関連行事

■ 領域全体会議・公募研究キックオフ会議

日時：2024年5月29日（水）～31日（金）

場所：東広島芸術文化ホールくらら（広島県 東広島市）

アシンメトリ量子主催

■ H-Physics II：「対称性と物理現象 - その発現と制御」に関する研究会

日時：2024年6月14日（金）～15日（土）

場所：神戸大学百年記念館（兵庫県 神戸市）

■ ICM2024 International Conference on Magnetism 2024

日時：2024年6月30日（日）～7月5日（金）

場所：Bologna Congress Center (Bologna, Italy)

<https://www.icm2024.org/>

■ 日本物理学会第79回年次大会

日時：2024年9月16日（月）～19日（木）

場所：北海道大学札幌キャンパス（北海道 札幌市）

■ 若手秋の学校

日時：2024年9月20日（金）～23日（月）

場所：国立大雪青少年交流の家（北海道 美瑛町）

アシンメトリ量子主催

■ 国際ワークショップ

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）（予定）

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

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

令和6(2024)年度の公募研究は令和5(2023)年7月中旬より公募を行っています。

ASYMMETRY NewsLetter #02 2024.03



編集後記

田端千紘編集委員長のもと、#2の編集を担当しました。年末年始の慌ただしい時期にもかかわらず、ご執筆いただいた皆様に深く感謝申し上げます。2024年は石川県能登地方での震災と航空機事故により、厳しい年明けとなりました。被害に遭われた皆様へ、心からお見舞いを申し上げますとともに、一日も早い復興をお祈りしております。世の中が目まぐるしく変化する中で、大学の研究には社会的なインパクトが強く求められる傾向にあります。私たちの研究は基本的に好奇心に基づいたものですが、世の中とどう関わっていくかは常に考えるべき課題です。基礎科学の進歩が長い目で見れば社会の発展に貢献すると信じて、未知の世界を掘り進めてまいりましょう。このニュースレターが、基礎研究の魅力や可能性を社会と共有する一助となることを願っています。

(網塚 浩)



ASYMMETRY

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2号

2024年3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/>