

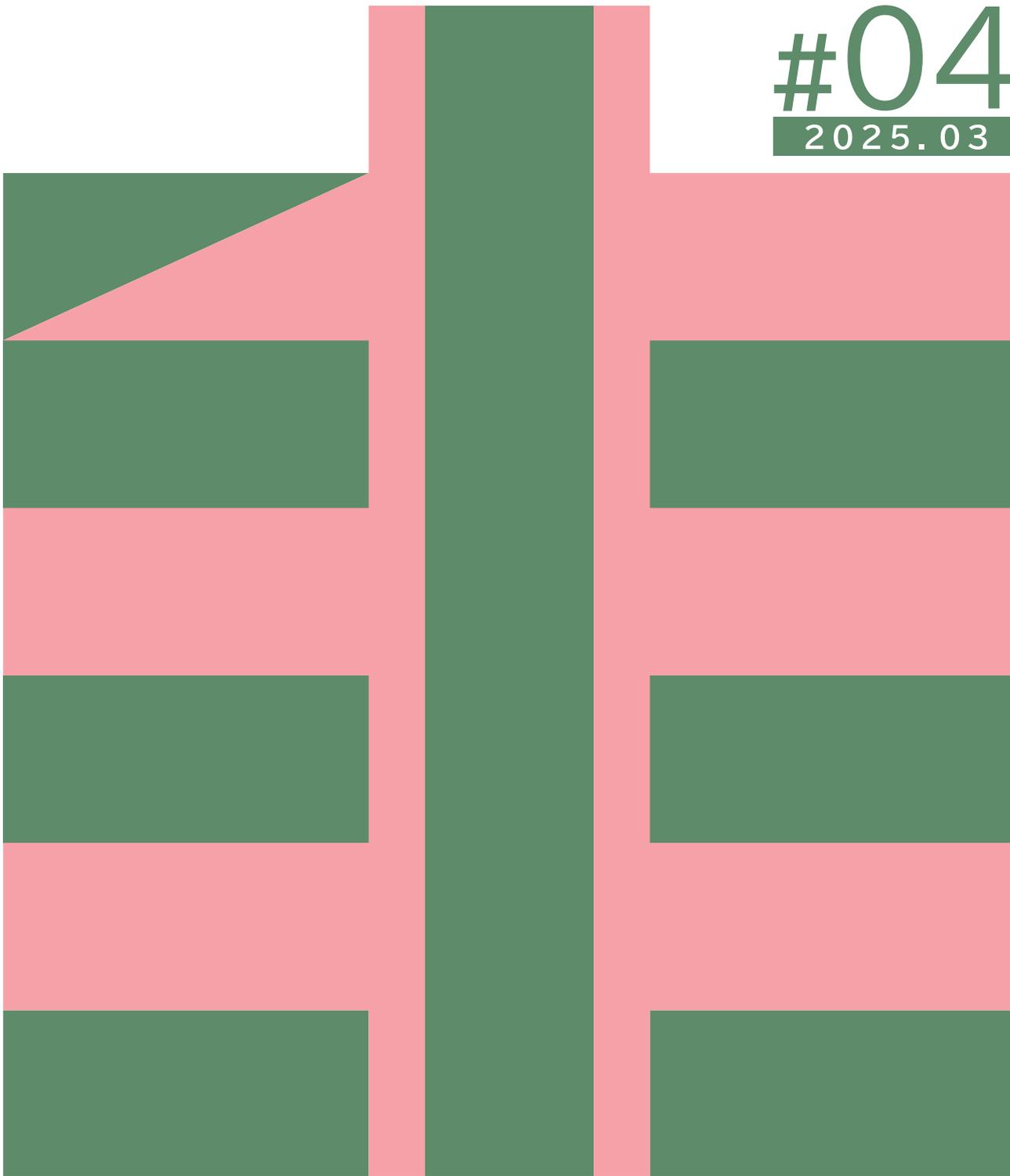
A S Y M M E T R Y

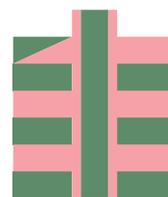
NewsLetter

#04

2025.03

Unveiling, Design, and Development of Asymmetric Quantum Matters





CONTENTS

巻頭言

News Letter第4号 巻頭言	鬼丸 孝博	01
--------------------------	-------	----

解説

Multipole description for Altermagnetism	速水 賢	02
反転心を持たない磁性体EuNiGe ₃ における歪んだ三角格子磁気スキルミオン 形成とらせん磁気ヘリシティの統合：発見から解明までのいきさつ	松村 武	03

今号の研究成果

Remeika 相化合物のカイラル結晶構造相	岩佐 和晃	09
非クラマース二重項系PrIr ₂ Zn ₂₀ の反強四極子秩序相内で発現する 磁場誘起相ポケット	橘高 俊一郎	13

若手紹介

北大速水グループ研究室紹介&研究紹介	印田 朱音	16
--------------------------	-------	----

学会・研究会

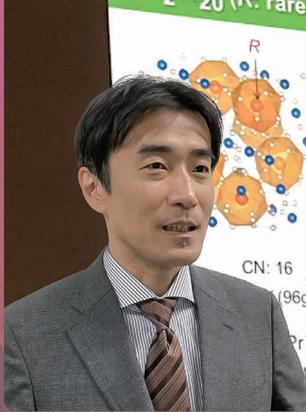
トピカルミーティング 「擬カゴメ構造を有する物質のアシンメトリ量子物性」@富山	服部 一匡	18
アシンメトリ量子 若手秋の学校	大原 繁男	19
「アシンメトリ量子若手秋の学校」に参加して	南 晶子	22
アシンメトリ量子若手秋の学校はすごい	松本 峻平	23
SUPERMAX - International Workshop on Superconductivity & Magnetism in f-Electron Quantum Materials under Extreme Conditions	井澤 公一	24
第18回物性科学領域横断研究会「凝縮系科学の最前線」@神戸	桐越 研光	26
トピカルミーティング 「アシンメトリ量子物質における交差相関の開拓」@神戸	小林 達生	27

コラム・報告

集束イオンビーム-走査電子顕微鏡システム(FIB-SEM)の導入	木俣 基	28
アシメ★通信		30

事務局からのお知らせ

2025年4月からの関連行事		32
事務局からのお知らせ		33



News Letter第4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

学術変革領域研究 (A)「アシンメトリ量子」がスタートして約2年となります。5年間のプロジェクトですので、そろそろ中間点を迎えます。本領域が採択されて以降、領域としての活動をどのような方針のもと進めていくのか、総括班を中心として、計画研究、公募研究の方々にもご意見をいただき、手探りながらも取り組んでまいりました。うまくいっていること、まだまだ改善の余地があることなど様々ですが、「お互いの得意なことを活かしながら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展開する」という方針のもと、本領域の特徴を活かした活動を推進してまいります。

さて、領域内外の研究連携を深めるためには、研究者同士の密な意見交換と議論が不可欠です。そこで、令和6年8月以降、領域主催のトピカルミーティングを複数回開催しました。(各ミーティングの詳細については、本号の別記事をご参照ください。)各計画研究を主体としてトピックを設定し、領域内だけでなく、関連するテーマについて領域外からも講演者をお招きしました。多くの方々にご参加いただき、研究者間の交流と新たな共同研究につながるよい機会となりました。今後は、トピックを主体としたものへシフトしながら、計画研究・公募研究間の新たな連携への展開を目指します。本領域を特徴付けるトピックのご提案をお待ちしております。また、広い分野での研究交流を目的として、他の学術変革領域研究との研究会の共催も予定しておりますので、ぜひご参加下さい。

本領域では、若手研究者の育成を重要テーマとして掲げております。その一環として、令和6年9月20～23日に「アシンメトリ量子 若手秋の学校」を、北海道・美瑛の国立大雪青少年交流の家にて開催しました。北海道大学で開催された日本物理学会年次大会の翌日からの開催、ということもあり、92名ものの方々にご参加いただきました。現在活躍中の若手研究者の皆さんに講師を務めていただき、しっかりとしたテキストも執筆していただきました。(広島大学 学術情報リポジトリHPよりダウンロード可。)当日の講義では、活発な質疑応答が飛び交い、学生の皆さんの主体的に励む姿が印象的でした。(詳細は、大原繁男 校長による本号の別記事をご参照ください。)また、若手への研究技術の伝承を目的として、「スキル相伝」プログラムを開始しました。学生や若手研究者が、尖った研究スキルを持つ研究者のグループに滞在し、研究手法のノウハウを直接学ぶ、というものです。この活動を通して、研究グループ間の交流がより活発になり、また若手の成長にもつながれば、と考えています。総括班からの支援もありますので、領域メンバーの方々はぜひご活用ください。

2年度目に入り、実験装置が次々に設置され、本領域の研究活動もいよいよ活発化してきました。総括班で設置する共用機器の集束イオンビーム (FIB) 加工装置 (SEM、マニピュレータ搭載) は、令和6年12月に日本原子力研究開発機構に納入されました。試運転も順調に進んでおり、近々領域内での共用を開始します。他にも、各計画研究で様々な実験装置が導入されています。これらについても、随時領域HPへ情報を掲載し、領域内での有効な活用を推進していきます。積極的なご利用をお願いいたします。

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。



Multipole description for Altermagnetism

Satoru Hayami

Faculty of Science, Department of Physics, Hokkaido University Associate Professor

Altermagnetism is described more precisely by multipole moments. Figure 1 completes all the correspondence between “altermagnetic” point group and the multipole moments. Each magnetic point group is classified also by the presence/absence of its spatial inversion P and time-reversal symmetry T ; **A: (P, T, PT)=(yes, no, no)** or **B: (P, T, PT)=(no, no, no)**. In literatures, altermagnetism is characterized by

- ✓ Finite anomalous Hall effect (AHE) in collinear antiferromagnets (AFMs).
 - ↔ Anisotropic magnetic dipole (M dipole) \sim T vector in XMCD, different from conventional M dipoles, spin-orbit-coupling (SOC) is required [1,2].
- ✓ Finite spin splitting without SOC under spontaneously-broken symmetry.
 - ↔ Even-rank magnetic toroidal (MT) (MT quadrupole, hexadecapole, etc.) or M octupole moments [3].

Importantly, the concept of multipoles covers more intriguing situations, such as emergent asymmetric SOC in noncollinear AFMs and nonreciprocal transport in noncoplanar AFMs [4].

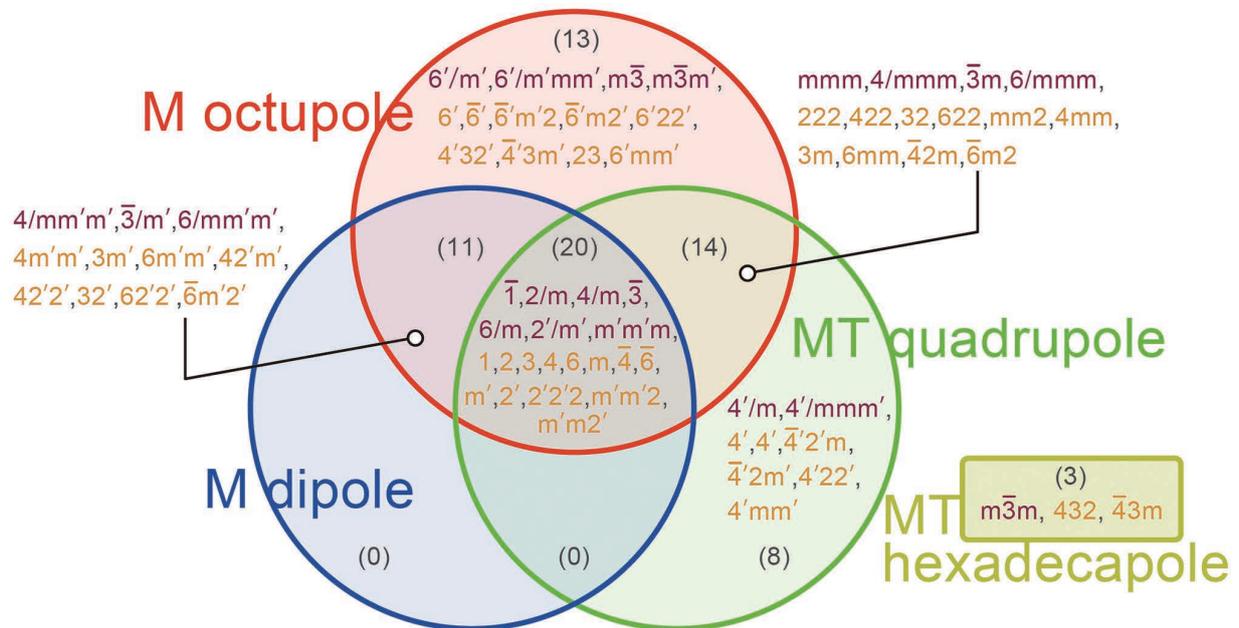


Figure 1: Multipole moments and 69 “altermagnetic” point group. The color of Hermann–Mauguin notation [5] indicates the P/T properties: **A** or **B**. 31(=11+20) groups exhibit AHE and 38(=13+14+8+3) possess spin splittings without AHE.

[1] S. Hayami and H. Kusunose, *Phys. Rev. B* **103**, L180407 (2021), Y. Yamasaki *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 083703 (2020).

[2] This includes the non-collinear orders in Mn_3Sn ($m'm'm$), since the “cluster” anisotropic M dipole includes them.

[3] M. Naka *et al.*, *Nat. Commun.* **10**, 4305 (2019), S. Hayami, Y. Yanagi, and H. Kusunose, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 123702 (2019).

[4] S. Hayami *et al.*, *Phys. Rev. B* **101**, 220403(R) (2020); **102**, 144441 (2020), S. Hayami and M. Yatsushiro, *Phys. Rev. B* **106**, 014420 (2022).

[5] For magnetic space (point) group, see for example, “Symmetry and Magnetism” Robert R. Birss, (North-Holland Publishing Co., 1964).



反転心を持たない磁性体EuNiGe₃における歪んだ三角格子磁気スキルミオン形成とらせん磁気ヘリシティの統合：発見から解明までのいきさつ

松村 武

広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授

はじめに

物質中の磁気モーメントが秩序化してできる磁気構造は実に多彩ですが、中でも特異なものとして目を引くのが、スピンの集団で渦巻き構造を作って粒子状になり、さらに格子を組んで配列する磁気スキルミオン格子です(図2(d))。多くの場合、二次元の最密構造である三角格子を形成します。このスペクトルな磁気構造が最初に発見されたのは立方晶のカイラル磁性体MnSiにおいてであり、2009年のことでした[1]。ゼロ磁場では一方向に伝播するヘリカル(スクリュウ型)構造をとっており、伝播 q ベクトルと垂直な面内で磁気モーメントが回転する構造です。ここに磁場をかけたときに出現するA相と名付けられた奇妙な磁気相の正体がこの磁気スキルミオン相であると判明しました。この構造は互いに120度の角度をなす方向に伝播する3本のヘリカル磁気構造の重ね合わせ(triple- q 構造, 図2(c))で表され、MühlbauerらによるScience誌の有名な論文[1]では、"All three helices have the same chirality"と構造モデルの説明で述べられています。つまり、3つのヘリカル磁気フーリエ成分は同じヘリシティ(らせんの巻き方)を持っていなければなりません。右巻きか左巻きかどちらか一方を選択したヘリカル磁気構造が基本要素になっていることから、磁気スキルミオン格子の形成にはヘリシティ選択をもたらすジャロシンスキー・守谷型の反対称相互作用($D_{ij} = S_i \times S_j$)が必要と考えられてきました。実際、遷移金属化合物のMnSiをはじめとして、最近では希土類化合物のEuPtSiなど[2]、反転対称性も鏡映対称性も持たないカイラルな結晶構造をもつ磁性体で多くの磁気

スキルミオン格子が観測されています。

ところが、磁気スキルミオンの研究が進むにつれ、Gd₂PdSi₃やGd₃Ru₄Al₁₂、GdRu₂Si₂やEuAl₄など、反転対称性をもつ物質でも磁気スキルミオン格子が見いだされてきました[3]。この場合は特定のヘリシティ選択をもたらす反対称相互作用が存在しません。現在、希土類金属化合物において、磁場中で磁気スキルミオン格子のtriple- q 構造が安定化する機構として重要視されているのは、伝導電子を媒介とした対称型のRKKY相互作用の高次項です[4]。複数方向に伝播する等価ならせんの波が高次項によって結合しているために、一様磁場で $q=0$ 成分が混じってくるとその効果が顕著に現れてくるわけです。ただし、基本要素となるヘリカル磁気構造のヘリシティはどちらでもよいことになり、右巻きらせんのスキルミオン格子も左巻きらせんのスキルミオン格子も現れてドメインを作ることになります。そこで興味もたれるのが反転対称性はないけれど鏡映面はある結晶構造の磁性体です。逆向きの D ベクトルを持つ反対称相互作用が共存することで、どのような磁気スキルミオン格子が形成されるのかという観点です。

EuNiGe₃の結晶構造とらせん磁気秩序

正方晶化合物EuNiGe₃の結晶構造を図1(a)に示します。c軸が4回軸で、c軸を含む鏡映対称面が4枚ありますが、c軸と垂直な鏡映対称面はありません。そのため、結晶の上下方向の違いができて、空間反転対称性はなくなっています。Euは2+の価数状態にあって、局在した7個のf電子による $S=7/2$ の合成スピンをしています。合成軌道角運動量がゼロとい

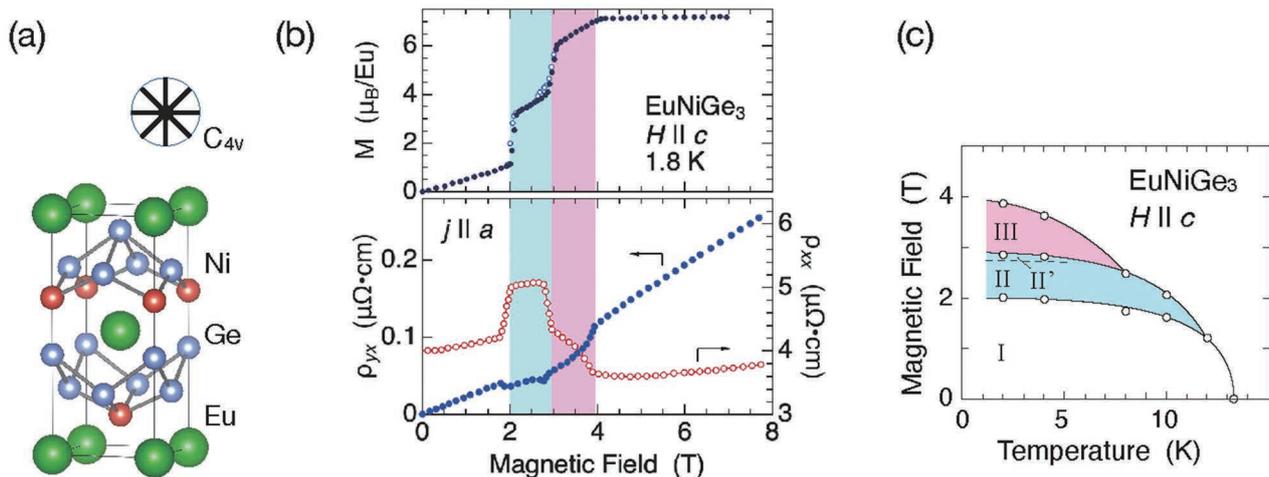


図1: (a) EuNiGe₃の結晶構造(空間群 I4mm)とC_{4v}点群対称性。(b) H || cでの磁化過程、電気抵抗率ρ_{xx}、ホール抵抗率ρ_{yx} [5]。(c) H || cでの磁気相図 [5]。

う点が重要で、結晶場からの異方性をほとんど感じないため、スピン間の磁気相互作用を純粋に反映した秩序構造をとりやすくなります。これがGd³⁺やEu²⁺の磁性体でらせん磁気構造が現れやすい要因でしょう。らせん磁気秩序を形成するには、磁気モーメントは結晶軸とは無関係にあらゆる方向を向く必要があります。ここで軌道角運動量によって結晶場と磁気モーメントとが強く結合してしまうと、容易面型の異方性でない限りらせん秩序は起こりにくくなると考えられます。

EuNiGe₃の磁気転移温度は13 Kで、図1(b)に示すような多段転移の磁化過程が観測されます。注目は2 Tから3 Tまでの中間相で、電気抵抗やホール効果に異常が現れることから、磁気スキルミオン相のような特殊な内部磁気構造による創発磁場が生み出されている可能性があります。

図1(c)が各種基礎物性から詳細に決められた磁気相図で、低磁場相から順にI、II、III相と名付けられています [5]。磁場下げ過程でII相に入るときに磁化に異常が見られ、これをII'と名付けましたが、ここでは触れません。ゼロ磁場での磁気構造は中性子回折でほぼ明らかになっており、 $q \sim (0.25, 0.05, 0)$ で伝播するsingle- q のヘリカルらせん磁気秩序です [6]。磁気スキルミオン格子形成の土台として十分な素質を備えていると言えるでしょう。

我々の共鳴X線回折実験でさらに詳細に決定したゼロ磁場でのヘリカルらせん磁気秩序を図2(a)に示します [7]。これはある1つのドメインの様子です。実験はつくばにある高エネルギー加速器研究機構の放射光実験施設 Photon Factory (PF) のBL-3Aで行いました。単結晶試料を用いて、磁気Bragg反射が観測される逆格子点 Q_{mag} に回折計を合わせ、 $k' - k = Q_{\text{mag}}$ のBragg条件を満たしながら、X線のエネルギーをEuのL₂吸収端7.612 keVに合わせると、共鳴による散乱強度の増大が起こります。これだけですと磁気秩序の周期性がわかるだけですが、散乱後のX線をアナライザー結晶のBragg反射を通して観測すると、散乱X線の直線偏光成分を分離測定することができ、磁気フーリエ成分がX線回折の散乱面と垂直なのか平行なのか、またその混ざり具合の評価が可能になります。

さらに、移相子と呼ばれるダイヤモンド完全結晶の素子を使って入射X線の偏光を直線偏光から左右円偏光に制御すると、磁気構造の特徴を反映した強度の変化が起こり、特にらせんヘリシティの決定で重要な情報が得られます。ドメインとして観測される各磁気Bragg反射それぞれでこの2つを組み合わせた測定を行い、すべての磁気Bragg点における磁気フーリエ成分 $m(q)$ を図にまとめたのが図2(b)です。正方晶で $q \sim (0.25, 0.05, 0)$ ですとA、B、C、Dの4つが

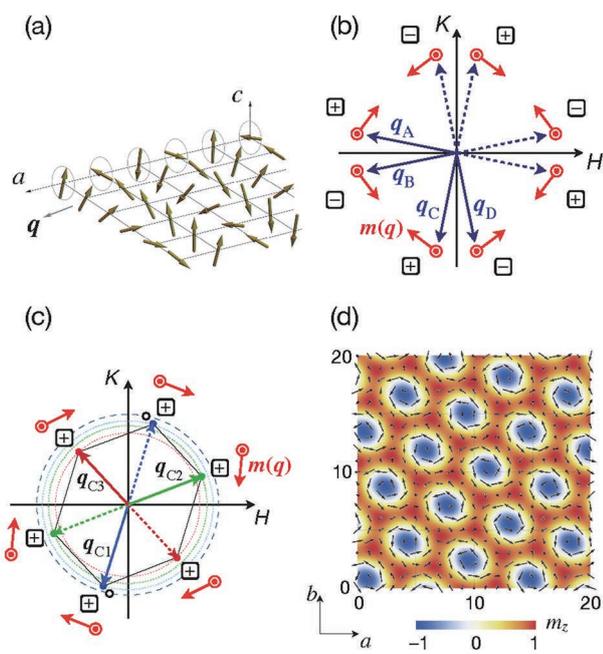


図2: (a)ゼロ磁場でのらせん磁気秩序。(b)ゼロ磁場での4つのドメインA,B,C,Dに対応する磁気伝播ベクトル q と磁気フーリエ成分 $m(q)$ 。面と垂直成分は i であり、面内成分と位相差 $\pi/2$ をもつ。(c)II相の磁気スキルミオン格子(Cドメイン)を作る3本の磁気伝播ベクトル q とその磁気フーリエ成分 $m(q)$ 。白抜きの丸はゼロ磁場でのピーク位置。(d)(c)をフーリエ変換して、 20×20 単位格子の領域で描いた実空間図[7]。

等価となり、ドメインができます。実験データの解析で得られたそれぞれの磁気フーリエ成分 $m(q)$ とそのヘリシティ(+または-、右ねじ型を+と定義)を図2(b)に示しました。

この結果が明瞭に示しているのは、 $m(q)$ もヘリシティも結晶の4回対称性と鏡映対称性をちゃんと反映しているということです。つまり、各らせん磁気ドメインでは、それぞれのDM型反対称相互作用の影響を受けて、片方の巻き方が選択されているのです。なお、中性子よりも空間分解能が高い放射光共鳴X線回折による測定の結果、 q ベクトルは温度変化し、最低温では格子非整合な $q=(0.26, 0.053, 0)$ であるこ

とがわかりました[7]。

EuNiGe₃における磁気スキルミオン格子の形成

さて、本来の目的としては、II相が磁気スキルミオン格子相であることを実験的に明らかにしたいわけですが、そのためには結合する3つのらせん磁気伝播ベクトルを決定する必要があります。ここに至るには様々な紆余曲折があるのですが、それは後回しにして、先に結論を述べますと、図2(c)に示すのがドメインCについての結論です[7]。 q_{C1} を起点として、 q_{C2} 、 q_{C3} の3本が $q_{C1}+q_{C2}+q_{C3}=0$ を満たす形で同時に出現し、さらに、フーリエ成分 $m(q_{C1})$ 、 $m(q_{C2})$ 、 $m(q_{C3})$ がすべて同一のヘリシティになっています。3つのフーリエ成分を合成して実空間での磁気構造を描いたのが図2(d)です(3成分の位相関係をどうとるかという問題がありますが、それについてはここでは触れません)。渦巻き状のスピンの配列が歪んだ三角格子を形成しています。注目すべきはらせん磁気ヘリシティです。

Cドメインの伝播ベクトル q_{C1} のヘリシティは図2(b)にあるとおり、もともと+でした。 q_{C1} と結合する q_{C2} はII相で新たに出現したものですが、これは図2(b)で見ると $-q_B$ に近い位置にあり、この波数空間領域のらせん磁気フーリエ成分は本来-ヘリシティとなる性格のものです。それがCドメインのスキルミオン格子では+に逆転しているのです。

また、 q_{C3} はほとんど鏡映面上の位置にあり、この波数における反対称相互作用のDベクトルは鏡映面と垂直で、本来であれば鏡映面内で縦巻きサイクロイド構造をとりたいはずのフーリエ成分ですが、これも q_{C1} 、 q_{C2} と同様、 $m(q_{C3})$ は q_{C3} とほぼ垂直で、+ヘリ

シティのヘリカルらせんとなっています。

つまり、3本のヘリカルらせん磁気成分を結合させて磁気スキルミオン格子を形成する際には、3つのらせんヘリシティも一つに統合されなければならず、そのためには、 q_1 に付随して結合する他の2成分 (q_2 と q_3) が持つ本来のヘリシティを逆転させる必要さえもあるというわけです。結晶が本来持っている反対称相互作用を凌駕する力によってヘリシティが一つに統合され、磁気スキルミオン三角格子が実現していることとなります。これは回転対称性しか持たないことで、もともとヘリシティが波数空間全体で一つに選択されているカイラル磁性体や、反転対称性があるためにどちらのヘリシティも許される物質では見えなかった特徴と言えるでしょう。この系についての理論計算も進められています[8]。

磁気回折ピークの発見まで

図2(c)に示したII相Cドメインの磁気Bragg反射点は3個あり、他のドメインを合わせると全部で12個の磁気Bragg反射点があります ($-q$ も入れると24個)。 q ベクトルの大きさを半径にした点線の円が図2(c)に描かれているのを見ていただくとわかるように、3個の q ベクトルの長さは異なっています。また、互いの角度も120度ではありません。歪んだ三角格子だからなのですが、これらのピークを通常の0次元検出器 (受光面に入ったX線光子をすべてカウントし、波数空間の1点ごとに測定する手法) で見つけるのは容易ではなく、それには紆余曲折がありました。ニュースレターという気楽な場ですので、その経緯を紹介しましょう。

図3に格子基本反射(400)のまわりに観測される磁気反射の位置をすべて示します。半径が違う位置にピークが散らばっているのです。これをどうやって見つけて明らかにしたのかという話です。

まず、ゼロ磁場での伝播ベクトル $q=(0.26, 0.053, 0)$ がII相では不連続に飛んで $q_1=(0.237, 0.072, 0)$ に変化しますが、これは中性子回折の論文[6]に記述がありましたので、確認は容易でした。問題は本当にあるのかも不明の q_2 と q_3 です。0次元検出器では、図2(c)でピーク位置を示した丸印のサイズよりも小さな観測領域で逆格子空間を1点1点スキャンしていきますので、特定のライン上や円周上といった限定した線上にBraggピークが存在しない限り、メッシュス

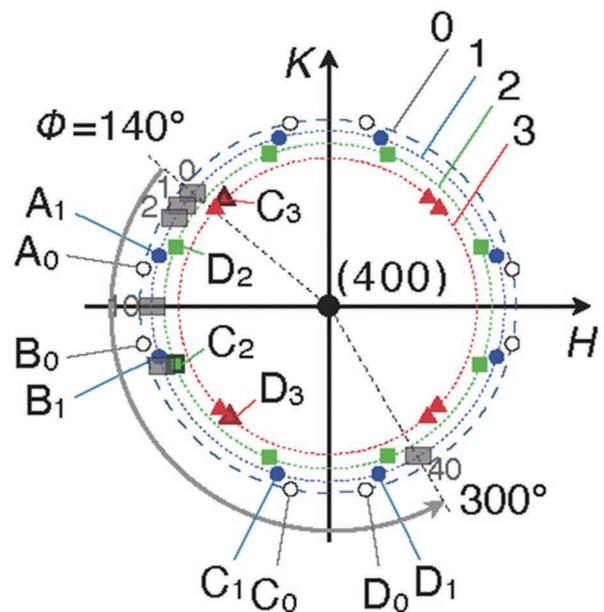


図3: 格子基本反射(400)のまわりに観測されるII相での磁気Bragg点のすべて。白抜き丸はゼロ磁場での磁気Bragg点。破線0、点線1,2,3は q ベクトルの大きさを表す円。 C_0 、 C_1 などの記号はBraggピークの名称。グレーの長方形は $\pm 0.2^\circ$ の範囲で試料角度 ω のスキャンをしたときに2次元検出器Timepixで観測される領域。0-40はスキャン番号。

キャンをかけてHK面内を塗りつぶすような探索には膨大な時間がかかってしまい、通常のビームタイムでは現実的ではありません。

EuPtSiでの観測経験から、磁気スキルミオンのtriple- q 構造をなす3つの q ベクトルは同じ大きさで、同じ半径の円周上に来るはず、という予想(思い込み)がありましたので、当初は q_1 と同じ半径のリング上(図3の点線1)をスキャンしていました。でも、そこで見つかったのは q_{A1} 、 q_{B1} 、 q_{C1} 、 q_{D1} だけでした。これらは既に確認済みのピークです。もしかするとtriple- q ではないのかもしれない、と気分の晴れない月日が過ぎていきました。

BL-3AではTimepixという検出器が中尾氏の整備によって利用可能になっています。これは $14 \times 14 \text{ mm}^2$ の受光面に 256×256 ピクセルの位置分解能を有する2次元X線検出器です。検出器前に設置したスリットを縦横 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ に広げ、 $\pm 0.2^\circ$ の範囲で試料角度 ω を回転させたときの観測領域を図3中にグレーの長方形で示しています。これであれば、未発見のピークの近くを通れば観測にかかるかもしれません。図で $\phi=140^\circ$ から 300° の範囲の円周上を40分割でスキャンしてみることにしました。仮に見つから

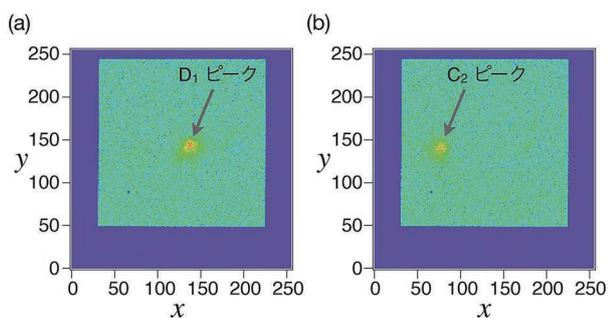


図4: 2次元検出器Timepixで観測された磁気Braggピーク D_1 と C_2 。緑の領域が縦横 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ に相当。

なかった場合、半径を変えて同じスキャンを繰り返せば、現実的な時間内である程度HK面内を塗りつぶす探索が可能です。

図4(a)に D_1 ピークの像を示します。緑色の正方形領域がスリット領域に相当し、緑色部分の強度はすべて蛍光X線のバックグラウンドです。試料角度 ω を $\pm 0.2^\circ$ の範囲で回転させる間(40秒)ずっと蛍光X線は積算されますが、Bragg反射が光るのは一瞬(2~3秒)です。それが黄色から赤色にかけての部分です。このような信号が他のスキャン画像にも写っていないかどうか探しました(ゴミ信号はあちらこちらにあります)。そして、実に本物っぽい匂いのする信号が写っていたのが図4(b)です。

もしかしてこれなのかと思い、 ω スキャンでピーク位置の角度を正確に出し、指数 hkl を求めたところ、 $(3.785, -0.084, 0)$ となりました。これが C_2 ピークです。エネルギースキャンをするとしっかりEuの共鳴ピークになっています。これは本物です。反対側の $(3.785, 0.084, 0)$ に行ってみたところ、ちゃんとピークがあります。 D_2 ピークです。

全貌の解明まで

ピークが見つかったとはいえ、 C_2 、 D_2 と正しく名付けられるのは全体が判明した後のことであって、これらが何のピークなのか最初はわかりません。 $(3.785, -0.084, 0)$ はBドメインのピークの近くにありますが、とりあえずBと名付けました。 $(3.785, 0.084, 0)$ はとりあえずAです。間違っていますがわからないので仕方ありません。その後、 C_1 とB、 D_1 とAなど、観測された q ベクトルから2つを選んでその合成位置を手

当たり次第に探索したところ、図3のC₃とD₃を発見しました（これも正しく名付けられたのは後のこと）。さらに半径が短くなっており、しかも指数はほぼ鏡映面上で、全体がどういう関係になっているのか意味がよくわからないまま、移相子を入れた円偏光測定を行い、とれるデータだけとって、発見時のビームタイムは終わりました。

大学に帰ってから方眼紙にピーク位置を記入し、コンパスやら定規やらであれこれ作図して全体の仕組みを解読する作業は本当にパズルを解くような作業でした。だんだんとtriple-*q*の関係、ヘリシティ統合の様子が見えてきます。未観測のピーク位置を計算し、次のビームタイムで確認すべき項目を列挙し、数ヶ月後の実験に臨みました。全4ドメイン、各ドメイン3つずつで計12個のピークすべてが予想どおりの位置に現れ、すべてについて散乱X線の偏光解析と移相子を使った円偏光依存性測定を行いました。その解析結果は最初に述べたとおりです。II'相という続きもありますので、楽しみです。

謝辞

本研究は倉内憲伸氏、塚越舜氏、比嘉野々花氏（広島大学）、中尾裕則氏（KEK）、垣花将司氏、辺土正人氏、仲間隆男氏（琉球大学）、大貫惇睦氏（琉球大学、理研）との共同研究です。また、議論を通して貴重なご意見をいただいた田中新氏（広島大学）、速水賢氏（北海道大学）、山家涼太氏（東京大学）、Max Hirschberger氏（東京大学）に感謝いたします。この研究は日本学術振興会科学研究費助成事業(No. JP20H01854、JP23H04867)の支援を受け実施されました。実験は高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所放射光共同利用実験課題（課題番号：2020G034、2022G114）により実施しました。

[1] S. Mühlbauer *et al.*, *Science* **323**, 915 (2009).

[2] K. Kaneko *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 013702 (2019); C. Tabata *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 093704 (2019); T. Matsumura *et al.*, *Phys. Rev. B* **109**, 174437 (2024).

[3] T. Kurumaji *et al.*, *Science* **365**, 914 (2019); M. Hirschberger *et al.*, *Nat. Commun.* **10**, 5831 (2019); N. D. Khanh *et al.*, *Adv. Sci.* e2105452 (2022); R. Takagi *et al.*, *Nat. Commun.* **13**, 1472 (2022).

[4] S. Hayami, R. Ozawa, and Y. Motome, *Phys. Rev. B* **95**, 224424 (2017); R. Yambe and S. Hayami, *Phys. Rev. B* **106**, 174437 (2022).

[5] A. Maurya *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **26**, 216001 (2014); M. Kakihana *et al.* *J. Alloys and Compounds* **694**, 439 (2017); W. Iha *et al.*, *JPS Conf. Proc.* **30**, 011092 (2020).

[6] X. Fabreges *et al.*, *Phys. Rev. B* **93**, 214414 (2016).

[7] T. Matsumura *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **93**, 074705 (2024); arXiv:2306.14767.

[8] S. Hayami, *Phys. Rev. B* **109**, 054422 (2024).



Remeika 相化合物のカイラル結晶構造相 における電子状態

岩佐 和晃

茨城大学原子科学研究教育センター 教授

1. 研究背景

空間反転対称性の破れやカイラル対称性で特徴付けられる電子物性現象が探求されて久しく、反対称スピン-軌道相互作用によるトポロジカル絶縁体、奇パリティ超伝導、スキルミオンに代表される磁気テクスチャ、マルチフェロイクスなどが見出されてきた。これらの動向を踏まえ、本研究では構造相転移によって自発的にカイラル対称性を獲得する Remeika 相化合物群の電子状態を研究した。

2. Remeika 相化合物の研究背景

1980年代に初めて物質合成が報告された Remeika 相化合物 $Ln_3Tr_4X_{13}$ (Ln : 希土類元素、 Tr : 遷移金属元素、 X : Sn, Ge, Pb, In) の研究において、当初から多彩な結晶構造が指摘されていた[1, 2]。例えば G. P. Espinosa et al. は $Ln_3Tr_4Sn_{13}$ の結晶構造を 5 種類に分類し[3]、J. L. Hodeau et al. は本稿で後述する室温での超格子構造を見出していた[4]。その後、1990年代には国内でも都立大の佐藤英行研究室において精力的な研究が行われ（筆者が最初に Remeika 相化合物群を知ったのもこの時期である）[5]、2000年代初頭に La 系の超伝導や Ce 系の重い電子状態の報告が相次ぎ[6]、さらに $Ln = Ca, Sr$ における構造相転移量子臨界点とその近傍での超伝導増強が話題となった[7]。E. L. Thomas et al.[6] および A. Ślebarski and J. Goraus[8] の論文で $Ln = La, Ce$ 系の構造相転移が議論されたが[6]、低温結晶構造は未解明であった。筆者はこれらの先行研究に触発されて Remeika 相化合物の量子ビーム散乱実験を開始した。その結果、 $Ln = La, Ce, Nd$ に代表される空間群 $I2_13$ の立方晶や

$Ln = Eu, Gd$ における正方晶への相転移を発見した。さらにそれぞれの低温相のもとで構造対称性に基づく多彩な電子物性が見出されつつある。

3. Remeika 相化合物の構造相転移

Sn フラックス相で合成した試料 ($Ln = La, Ce, Nd$ と $Tr = Co, Rh, Ir$) の精密結晶構造解析を、主に高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所の放射光実験施設 (BL-4C, 8A) を用いて調べた[9-13]。高温相は空間群 $Pm\bar{3}n$ の立方晶で、低温相は図1に示したように各軸方向に倍周期超格子の空間群 $I2_13$ の立方晶である。この低温相構造は自発的なカイラル対称性の形成として特徴づけられ、左右の対掌構造がほぼ50%ずつ現れる（図1には Ln_1 サイトが時計方向に旋回するような片方のカイラリティを持つ結晶構造を示した）。

この相転移機構に電荷密度波が提案されたが[14]、バンドギャップ形成は実証されていないと思われる。特徴的な点として、構造相転移温度がほぼ Tr

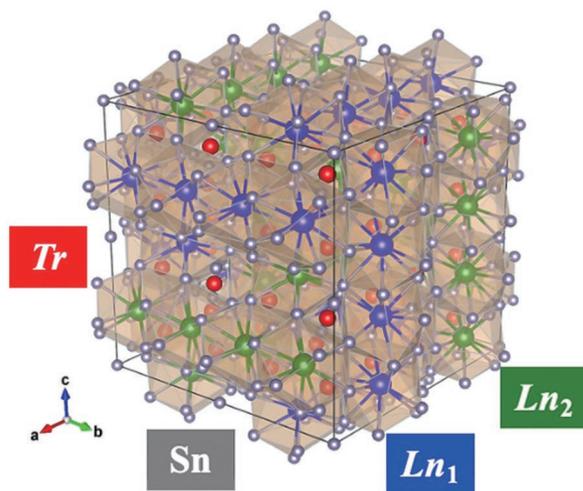


図1. Remeika 相の空間群 $I2_13$ の結晶構造

の種類に対応しており、Co系が160 K、Rh系が約350 K、Ir系が約500 Kである（ただし後述するEu系は例外である）。いずれの物質でもSnの原子変位が最も大きい、例えば $Tr = Co$ のX線吸収端エネルギーの温度依存性が指摘され[9,15]、 $Tr-Sn$ 間の結合の不安定性が相転移に寄与している可能性が考えられる。

さらに都立大グループとの共同研究において、図1のSnサイトがGeに置き換わった超伝導体 $Y_3Rh_4Ge_{13}$ の結晶構造も空間群 $I2_13$ であることを放射光X線回折により明らかにした[16]。やはりカイラルな結晶構造であるため、常伝導相での半金属的な状態をもたらすトポロジカル電子と特殊なパリティによる超伝導が期待できる。しかし空間反転対称性が破れるだけでなく、Geサイトの安定位置がランダムに2箇所に分裂しており[17]、バンドネスティングによる協力的な原子変位の変調構造を伴う電荷密度波よりも、化学結合における電荷状態の変化が構造相転移をもたらしていることが示唆される。

4. $Ce_3Rh_4Sn_{13}$ におけるWeyl-Kondo半金属

$Ce_3Tr_4Sn_{13}$ ($Tr = Co, Rh, Ir$)は重い電子系とされたが、電気抵抗の温度依存性が弱く、少数キャリア密度系、あるいは半金属と言える[18-21]。我々は主に $Ce_3Rh_4Sn_{13}$ の研究を進め[22]、SPRING-8で実施した共鳴光電子分光からフェルミ準位の状態に伝導電子と4f電子が混成する近藤効果が確認できた。中性子非弾性散乱実験の結果、図1の緑色と青色で示したカイラル対称構造での異なるWyckoffサイトを占める二種類のCeイオンがそれぞれ固有の4f電子結

晶場分裂準位をとり、かつ近藤効果を示すサイトと比較的局在性の強いサイトに分裂することを見出した。結晶場準位基底状態はKramers二重項であるものの磁気秩序が0.05 Kでも観測されない。代わりに図2(左)に示した1 meV以下の特性エネルギーをもつスピン揺らぎが存在し、これを反映した極低温の電子比熱(図2(右))が通常金属物質とは大きく異なって温度の3乗に比例している。これらの実験結果から、伝導電子とf電子の混成バンドギャップ中に、カイラル対称性によって保護された波数に対して線形な分散関係を持つ電子状態が存在すると言える。これまで重い電子系と考えられた $Ce_3Tr_4Sn_{13}$ ($Tr = Co, Ir$)も、 $Ce_3Rh_4Sn_{13}$ と同様に、反強磁気秩序が極端に抑制されて低エネルギーのスピン揺らぎを示す。すなわちこれら $Ln = Ce$ の系がWeyl-Kondo半金属状態を示すトポロジカル電子系であることが示された。Weyl-Kondo半金属は反転対称性の破れた空間群 $\bar{I}43d$ の結晶構造を持つ $Ce_3Bi_4(Pt_{1-x}Pd_x)_3$ などでも指摘され[23,24]、本研究を含めてトポロジカル強相関電子系が発見されたと言える。

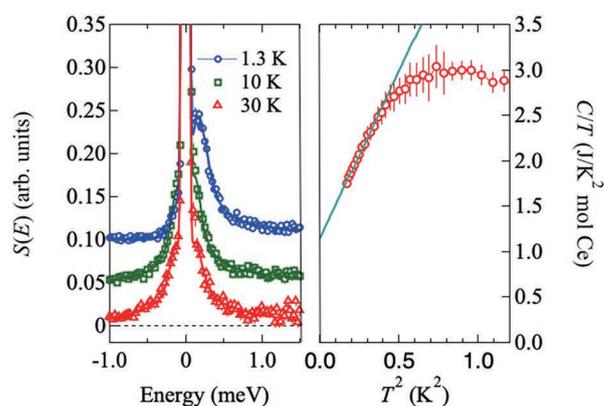


図2. $Ce_3Rh_4Sn_{13}$ の中性子散乱で得られた低エネルギー磁気励起(左図)と比熱の温度依存性(右図)

5. $\text{Nd}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ のカイラル対称結晶構造相における反強磁気秩序

Weyl-Kondo半金属状態をもたらすトポロジカルな性質を帯びた電子状態は、RKKY相互作用やDzyaloshinskii-Moriya相互作用を媒介することで、新しい磁気秩序をもたらすと期待でき[25]、Remeika相化合物における反強磁気秩序を調べている。

$\text{Nd}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ における338 K以下の結晶構造も、図1に示したカイラル対称(空間群 $I2_13$)である[26,27]。さらに磁気測定と粉末中性子回折(HERMES(JRR-3 T1-3ビーム孔))によって、図3に示した1.65 K以下の反強磁気構造を決定した。Ce系同様に、異なるWyckoffサイト Nd_1 、 Nd_2 を占めるそれぞれの結晶場分裂状態による固有磁気モーメントが交替的に秩序した1次元スピン反強磁気鎖を基本構造とする。そのスピン鎖が三角格子を介して3次元的に結合する幾何学的特徴から磁気フラストレーション効果が予想でき、実際に磁化率の温度依存性は磁気転移温度よりも高温の3 K程度から上凸に振る舞い、常磁性相での短距離磁気相関の発達と考えられる。結晶構造

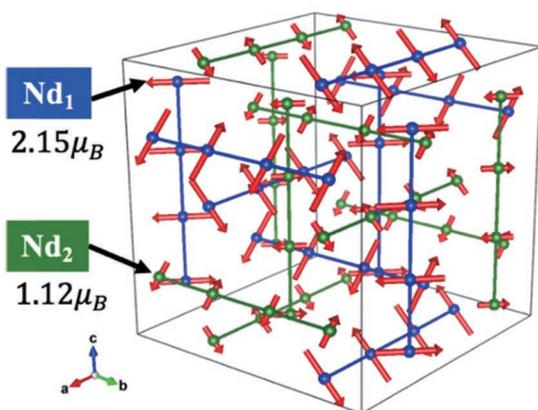


図3. $\text{Nd}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ の反強磁気構造

相転移と反強磁気秩序を示す $\text{Nd}_3\text{Co}_4\text{Sn}_{13}$ [28,29]と $\text{Nd}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ [5,26]も含め、今後はトポロジカル電子による磁気相互作用を追究することが課題である。

6. そのほかのRemeika相化合物

上記以外の希土類元素からなるRemeika相化合物も報告されているが、結晶構造との磁気秩序の詳細は未解明であった。 $\text{Eu}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ では57 Kにおける構造相転移が報告され[30-32]、我々も新たに $\text{Eu}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ における約26 Kでの構造相転移を観測した[33]。上記の $Ln = \text{La}, \text{Ce}, \text{Nd}$ 系とは異なり、 $\text{Eu}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ における正方晶(空間群 $P4_2/mnm$)の低温相結晶構造を見出した。さらに両物質はおよそ10 K以下で Eu^{2+} の $4f^7$ 電子配置による反強磁気秩序を示すが[33-35]、 $\text{Eu}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ では反強磁気秩序相にも関わらず低温に向かう磁化率の増大が報告されており[30,35]、新たに見出した正方晶結晶構造の持つ局所的な反転対称性の破れによる磁気相互作用の競合が想起される[34]。我々は Eu^{2+} と同じ $4f$ 電子構造の Gd^{3+} を含み、14.5 Kで反強磁気秩序を示す $\text{Gd}_3\text{Co}_4\text{Sn}_{13}$ [36]にも、104 Kでの正方晶低温相への構造相転移を発見し、さらにHQR(JRR-3 T1-1ビーム孔)において単結晶の平滑な面からの中性子磁気回折の測定に成功した[37]。最近、中性子を強く吸収するGdを含む化合物に対しても、JRR-3における高いS/N比の測定条件や[38]、J-PARC物質・生命科学実験施設の高エネルギー中性子を用いて吸収効果を軽減する方法[39]による中性子測定のフィージビリティが示されており、放射光X線共鳴磁気散乱と相補的にEu, Gd系におけるアシンメトリ量子の開拓と可視化も可能である。

7. まとめと展望

Remeika相化合物における空間反転と時間反転の対称性の自発的な破れによって生じる低温構造は複雑であるものの、その一端が明らかになり、上述のトポロジカル電子物性に加えて交差相関現象も期待される。後者の抽出に向けて、等価な対掌構造が形成するマイクロオーダーのドメイン構造を、共鳴軟X線散乱の円偏光依存性により分離観察する試みをKEK放射光実験施設で始めている。また、協力的な原子変位や磁気構造のクラスター拡張多極子による表現によって相転移の秩序変数を議論することも考えられる[40]。加えて、構造相転移や超伝導に関わるフォノンにおけるカイラリティの動的効果も量子ビーム研究によってアプローチしうる興味ある課題と考えている。今後も多彩なRemeika相化合物などの結晶構造と磁気秩序構造を

明らかにすることにより、空間・時間反転対称性に依拠する電子状態研究の発展を目指したい。

本研究は、主に、茨城大学理学部物理・大学院理工学研究科量子線科学専攻の岩佐研究室学生の皆さんと共に推進している。また茨城大学の桑原教授、横山教授、大山教授、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所の中尾教授、佐賀山准教授、奥山准教授、J-PARC物質・生命科学実験施設の河村博士、村井博士、大原博士、中尾博士、総合科学研究機構の石角博士、東北大学の南部准教授、東京都立大学の青木教授、松田教授、東中助教をはじめとする多くの方々に協力いただいている。本研究は、文科省科研費 (JP18H01182, JP20H01848, JP21H03732, JP22H05145, JP23H04867) および山田科学振興財団の支援を受けた。

[1] J. P. Remeika *et al.*, *Solid State Commun.* **34**, 923 (1980).
[2] R. Gumeniuk, Structural and Physical Properties of Remeika Phases, in *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, edited by J.-C. G. Bünzli and V. K. Pecharsky (Elsevier Science B. V., North-Holland, 2018) Vol. 54, p. 43–143.
[3] G. P. Espinosa *et al.*, *Mater. Res. Bull.* **17**, 963 (1982).
[4] J. L. Hodeau *et al.*, *Solid State Commun.* **42**, 97 (1982).
[5] H. Sato *et al.*, *Physica B* **186–188**, 630 (1993).
[6] E. Lyle Thomas *et al.*, *J. Solid State Chem.* **179**, 1642 (2006).
[7] L. E. Klintberg *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 237008 (2012).
[8] A. Ślebarski and J. Goraus, *Phys. Rev. B* **88**, 155122 (2013).
[9] Y. Otomo *et al.*, *Phys. Rev. B* **94**, 075109 (2016).
[10] K. Suyama *et al.*, *Phys. Rev. B* **97**, 235138 (2018).
[11] K. Iwasa *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 124701 (2021).
[12] A. Shimoda *et al.*, *Phys. Rev. B* **109**, 134425 (2024).
[13] J. Welsch *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **3**, 125003 (2019).
[14] C. S. Lue *et al.*, *Phys. Rev. B* **85**, 205120 (2012).
[15] A. Singh *et al.*, *Phys. Rev. B* **98**, 235136 (2018).
[16] Md A. Afzal *et al.*, *J. Alloys. Compd.* **978**, 17291 (2024).
[17] B. K. Rai *et al.*, *Chem. Mater.* **27**, 2488 (2015).
[18] A. L. Cornelius *et al.*, *Physica B* **378–380**, 113 (2006).
[19] U. Köhler *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **19**, 386207 (2007).
[20] J. R. Collave *et al.*, *Solid State Commun.* **177**, 132 (2014).

[21] J. R. Collave *et al.*, *J. Appl. Phys.* **117**, 17E307 (2015).
[22] K. Iwasa *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **7**, 014201 (2023).
[23] S. Dzsaber *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 246601 (2017).
[24] D. M. Kirschbaum *et al.*, *J. Phys. Mater.* **7**, 012003 (2024).
[25] H.-R. Chang *et al.*, *Phys. Rev. B* **92**, 241103(R) (2015).
[26] A. Shimoda *et al.*, *JPS Conf. Proc.* **38**, 011091 (2023).
[27] A. Shimoda *et al.*, *Phys. Rev. B* **109**, 134425 (2024).
[28] C. W. Wang *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **29**, 435801 (2017).
[29] C. W. Wang *et al.*, *Physica B: Phys. Condens. Matter* **551**, 12 (2018).
[30] Y. Aoki *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **65**, 1005 (1996).
[31] L. Mendonça Ferreira *et al.*, *Physica B* **384**, 332 (2006).
[32] J. R. L. Mardegan *et al.*, *IEEE Trans. Magn.* **49**, 4652 (2013).
[33] 熊田隆伸ほか、日本物理学会第79回年次大会 18pPSA-26 (2024).
[34] T. Kumada *et al.*, submitted to *Phys. Rev. B*.
[35] A. Maurya *et al.*, *JPS Conf. Proc.* **3**, 017022 (2014).
[36] M. A. Pires *et al.*, *J. Appl. Phys.* **99**, 08J311 (2006).
[37] 鈴木貴太ほか、日本中性子科学会第24回年会 P1-07 (2024).
[38] K. Kaneko *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 085001 (2023).
[39] H. Yoshimochi *et al.*, *Nature Phys.* **20**, 1001 (2024).
[40] S. Hayami and H. Kusunose, *J. Phys. Soc. Jpn.* **93**, 072001 (2024).



非クラマース二重項系PrIr₂Zn₂₀の 反強四極子秩序相内で発現する 磁場誘起相ポケット

橘高 俊一郎

東京大学大学院総合文化研究科 准教授

多電子系が創出する新奇な基底状態の発見と解明は、凝縮系物理学の発展において重要な役割を果たしてきた。本稿では、高次多極子モーメントによって駆動される新奇量子相の理解を深めるために、非クラマース二重項の Γ_3 基底状態を持つ立方晶化合物に注目する。 Γ_3 基底二重項は磁気双極子モーメントを持たないため、電気四極子や磁気八極子といった高次多極子が物性の主導的な要因になることが期待される。例えば、 Γ_3 基底状態を持つPrPb₃は、 $T_0=0.4$ K以下で反強四極子 (AFQ) 秩序を示し、[110]軸方向の磁場下では O_{20} 型から O_{22} 型の四極子秩序相へと相転移することが知られている[1]。このように、多極子と外場の相互作用によって、通常の磁性体とは異なる相転移現象が引き起こされることが明らかになっており、高次多極子による多彩な基底状態の研究が進められている。

2010年代以降、立方晶CeCr₂Al₂₀型構造を持つPrT₂X₂₀系 (T: 遷移金属; X: Al, Zn, Cd) の研究が活発に行われてきた。先行研究により、いくつかのPrT₂X₂₀化合物の結晶場基底状態が非磁性 Γ_3 二重項であることが明らかとなり、多様な多極子現象が報告されている。例えば、PrTi₂Al₂₀は $T_{FQ}=2$ K以下で強四極子秩序を示し、磁場下では四極子間相互作用とゼーマン効果の競合により、秩序変数が不連続に変化する磁場誘起一次相転移を起こす[2, 3]。また、PrV₂Al₂₀ではゼロ磁場の比熱測定において、0.6 K以下で四極子秩序と磁気八極子秩序に関連すると思われる2段転移が観測されている[4]。さらに、これらのPr系物質では、多極子秩序相内で超伝導転移が確認されており[5]、多極子ゆらぎがクーパー対の形成にお

いて重要な役割を果たしている可能性が期待される。

本研究[6]では、非クラマース二重項の Γ_3 結晶場基底状態を持ち、 $T_0=0.12$ KでAFQ秩序を示すPrIr₂Zn₂₀を研究対象とした。この物質では、2011年の先行研究[7]で磁場中の比熱測定により2段転移が観測され、磁場誘起多極子秩序相の存在が示唆された。しかし、2016年の研究[8]では、同条件での比熱測定において磁場中の2段転移が再現されず、本質的でない可能性が指摘された。このような経緯から、PrIr₂Zn₂₀における磁場誘起多極子秩序相の実態は未解明のままであった。そこで本研究では、磁場角度分解比熱測定により温度・磁場・磁場角度相図を精密に構築し、PrIr₂Zn₂₀の基底状態の詳細を明らかにすることを目的とした。特に、磁場により誘起される相転移 (2段転移) が本質的な現象であるかを検証するため、「質の高い」単結晶試料を用いた精密測定を重視した。

本研究では、以下の2点を「質の高い」試料の条件として定義した：

- (1) 相転移に伴う比熱異常が鋭いこと。
- (2) 試料の結晶軸方位が揃っていること。

図1は、先行研究[7, 8]で用いられた試料と本研究[6]の試料におけるゼロ磁場比熱測定の結果を比較したものである。本研究の試料は従来の試料に比べて鋭い比熱ピークを示し、「質の高い」条件(1)を満たしている。また、AFQ相転移温度は $T_0=0.125$ Kに上昇した。ただし、試料の質を評価する指標として一般的に用いられる「残留抵抗比」は先行研究[8]の試料と同程度であり、PrIr₂Zn₂₀の単結晶試料の質が本質的に改善されたかについては結論が得られていないことを付記しておく。

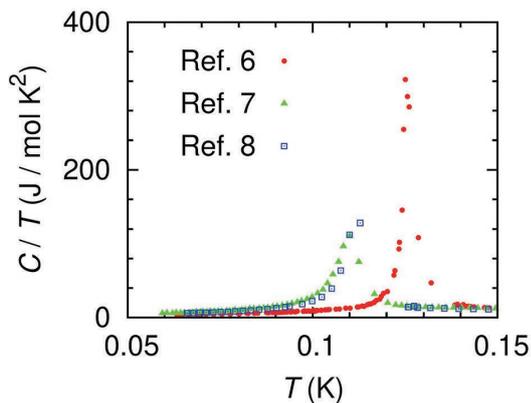


図1: PrIr₂Zn₂₀のゼロ磁場における比熱の温度依存性。赤丸が本研究で用いた試料の測定結果[6]。

この「質の高い」条件(1)を満たす試料を用いて、[100]軸方向の磁場下で比熱測定を行った。磁場を細かく変化させながら測定した比熱の温度依存性を図2に示す。ゼロ磁場から磁場を上昇させると、2.2 T以上で T_Q より高温に新たな比熱異常が発達することが分かった。特に、2.6 Tでは明確な2段転移が観測されたが、2.9 T以上では低温側の比熱異常が消失し、1段の鋭い相転移へと変化した。[100]軸方向の磁場下で得られた温度-磁場相図を図3に示す。この図には、 T_Q 近傍の高温領域に磁場誘起による相ポケットが現れており、これをA相と呼ぶことにする。

先行研究[8]では、磁場を1 T刻みで変化させながら比熱の温度依存性が測定され、その結果、A相の存在は確認されなかった。しかし、今回2段転移が観測された磁場領域での測定は行われていない点に注意する必要がある。すなわち、2段転移が観測されない条件下では、本研究の結果と先行研究[8]の結果は矛盾しないと言える。一方、先行研究[7]では $1.5 \text{ T} < B < 3 \text{ T}$ の比較的広い磁場範囲で2段転移が観測されており、このことから、A相の境界が試料の質に強く依存する可能性が示唆される。

単結晶試料においては、結晶軸方位が互いに傾いた部位が混在している場合があり、このような試料では外場に対する物性の異方的応答によって、一つの相転移が分裂して観測されることがある。そこで本研究では、 $(\bar{1}10)$ 面内で磁場を回転させながら比熱測定を行い、試料がモザイク性を示さないこと、すなわち

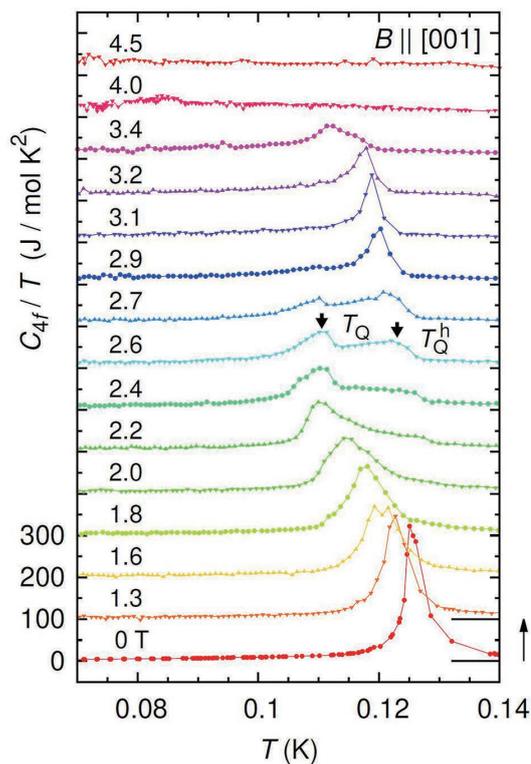


図2: [001]軸方向の様々な磁場下でのPrIr₂Zn₂₀の比熱の温度依存性。各磁場のデータは見やすくするために上下にずらしている。

「質の高い」条件(2)を満たしていることを確認した。図4は、0.12 Kにおける磁場-磁場角度相図を示している。丸印は比熱の磁場角度依存性においてピークが観測された条件を示している。[100]軸近傍で観測された2本の相転移線は、定性的に異なる磁場角度依存性を示しており、それらが本質的に異なる相転移であることは明らかである。

最後に、A相の起源について議論する。まず考えられるシナリオは、 O_{22} 型から O_{20} 型へのAFQ秩序変数

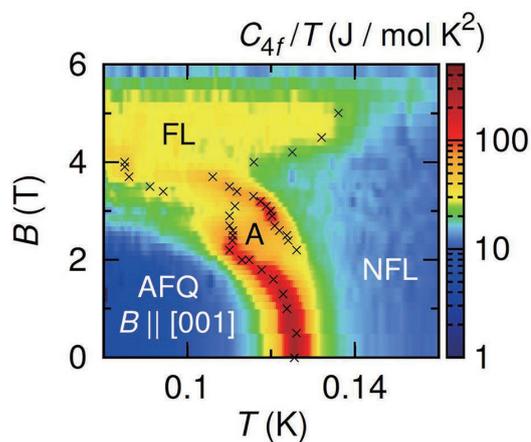


図3: [001]軸方向におけるPrIr₂Zn₂₀の温度磁場相図。色は比熱を温度で割った大きさを表している。

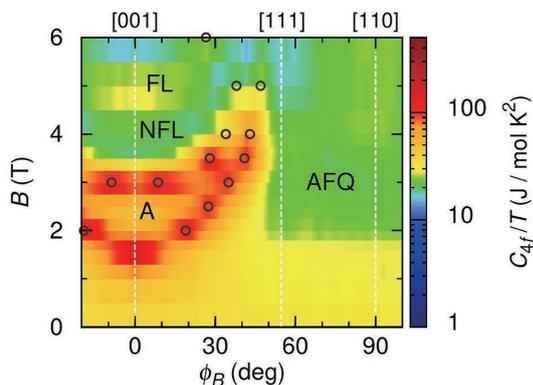


図4：0.12 KにおけるPrIr₂Zn₂₀の磁場-磁場角度相図。色は比熱を温度で割った大きさを表している。

のスイッチングである。実際、PrTi₂Al₂₀においては、四極子間相互作用とゼーマン効果の競合により秩序変数が切り替わることが報告されている[2,3]。しかし、秩序変数の変化による通常の磁場誘起相転移は、絶対零度における基底状態も変化させることが一般的である。これは、PrPb₃で観測された磁場誘起相転移[1]も例外ではない。それに対して、絶対零度での基底状態が変化せず、有限温度領域に限定される相転移現象は、 Γ_3 二重項系では非常に珍しい。

次に考えられる可能性は、四極子のmultiple- q 秩序のようなエキゾチックな多極子秩序状態の実現である。PrIr₂Zn₂₀の磁場誘起相ポケット(A相)は、MnSiにおけるスキルミオン格子相に類似している。MnSiでは、ヘリ磁性転移温度直下の狭い温度・磁場範囲に磁場誘起相(A相と呼ばれる)が現れ、相内で3つ

のらせん状態の重ね合わせ(いわゆるtriple- q 状態)が中性子小角散乱実験によって観測されている[9]。理論的にも、 Γ_3 二重項系において、多極子のtriple- q 秩序やmultiple- q 秩序を含む多彩な相図が提案されている[10-12]。

中間磁場領域で、相境界付近の高温にのみ発現する磁場誘起相ポケットは、磁気双極子モーメントが不活性な Γ_3 二重項系では前例のない現象である。この未知の現象を解明するためには、中性子散乱や核磁気共鳴、超音波などの実験から、秩序変数に迫るためのさらなる研究が必要である。本研究は、多極子自由度が引き起こす多様な秩序状態に光を当てるとともに、アシンメトリ量子現象を探求する新たな研究領域の開拓にも貢献することが期待される。

共同研究者

鬼丸 孝博

(広島大学大学院先進理工系科学研究科、教授)

松本 圭介 (愛媛大学大学院理工学研究科、准教授)

榎原 俊郎 (東京大学物性研究所、名誉教授)

[1] T. Onimaru *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 2377 (2004).

[2] T. Taniguchi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 084707 (2019).

[3] S. Kittaka *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 043701 (2020).

[4] M. Tsujimoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 267001 (2014).

[5] T. Onimaru *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 033704 (2010).

[6] S. Kittaka *et al.*, Phys. Rev. B **110**, L081106 (2024).

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

[8] T. Onimaru *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 075134 (2016).

[9] S. Mühlbauer *et al.*, Science **323**, 915 (2009).

[10] H. Tsunetsugu *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 043701 (2021).

[11] T. Ishitobi and K. Hattori, Phys. Rev. B **104**, L241110 (2021).

[12] K. Inui and Y. Motome, Phys. Rev. B **102**, 155126 (2020).



北大速水グループ研究室紹介&研究紹介

印田 朱音

北海道大学理学院物性物理学専攻 統計物理学研究室 修士2年

北海道大学統計物理学研究室速水グループ 修士2年の印田朱音と申します。所属研究室紹介と自身の研究内容紹介を2ページ程させていただきます。

速水グループってどう?

研究室紹介については、研究室の1日、研究室の売り、苦労する点、速水先生の秘密(?)について書いて欲しいとのことでしたので、私から見た速水グループの日常をお伝えしたいと思います。

私が現在所属している統計物理学研究室速水グループはスタッフ1名(速水先生)とPD2名、学生12名(!)(うち1名東大所属)で構成されています(右上図)。

1日の流れですが9:30頃速水先生がみえます。11:30頃研究室の皆でゼミ室にてランチタイムです。この時間を使って議論することもできますが、大抵は世間話をしています(この間は好きなおせちの話でした)。午後は研究室ゼミ(週一)や、速水先生とのミーティング(週一)があります。ミーティングは1人当たり30分~1時間程度時間を割いていただけるのですが、これを14人分こなして何故仕事が回っているのかは、速水グループ七不思議の一つです。夕方には理学部棟内の卓球台で卓球をする人や、トレセンに行く人も居ます。コアタイムはないので、それぞれ適当な時間に帰宅します。

当グループの一番の売りは、道外出没率が低い速水先生と頻繁に議論できる点です。一方で速水グループならではの大変さについてですが、特に思いつかなかったので研究室メンバーに聞いたところ「雪」、「路面凍結」、「雪」、「冬場のJR運休」、「雪」、「居室が11階なのにエレベーターが1機しかない事」、「雪」、「雪」、「雪」とのことでした(右下図)。皆あまり



大変さは感じていないみたいです(エレベーター増設お願いします)。

また、速水先生の秘密(?)ですが、すぐ体重が落ちてしまうことを気にしている点です(嫌味でしょうか)。効果的な筋トレがあったら教えて欲しいとのことでしたので、有識者からのご助言お待ちしております。

以上が研究室の概要になりますが、これで研究室の雰囲気伝わっているのかはよく分かりませんの

で、札幌にお越しの際は是非お立ち寄りいただき、ご自分の目でお確かめになってください。

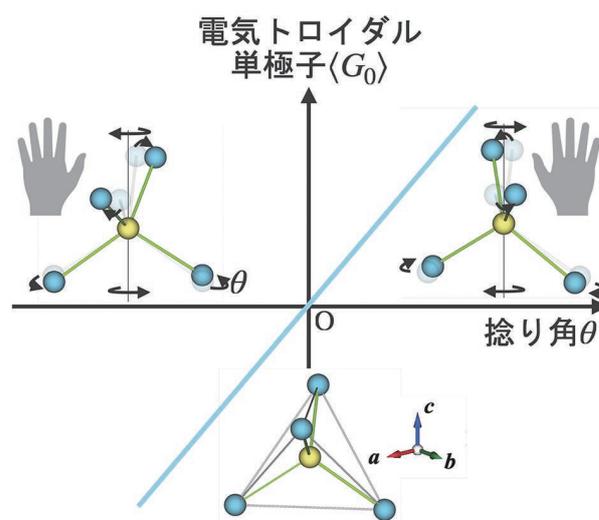
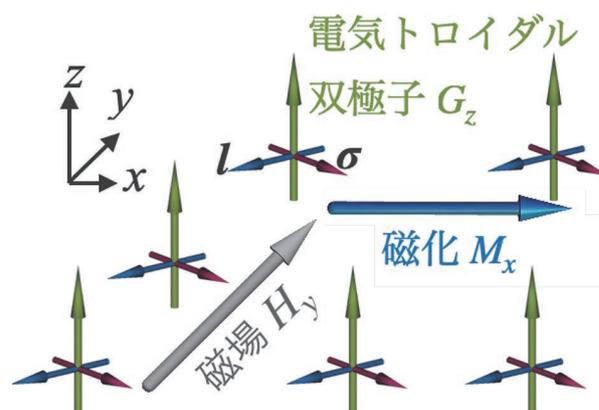
研究内容の紹介

私はフェロアキシャル(FA)秩序相の物性評価、そしてキラリティの定量的評価と応答現象の解明に取り組んでいます。FA秩序は時間反転偶の軸性ベクトルが強的に配列した状態であり、多極子の言葉では電気トロイダル双極子が秩序変数となります。FA秩序相は時間反転対称性も空間反転対称性も破らないため、電場や磁場と直接は結合しません。しかし近年、秩序した電気トロイダル双極子モーメントに平行な鏡映対称性の破れに伴う、共役な外場に対する横応答の発現が提唱されています[1,2]。

そこで我々は、FA秩序下で外部磁場の3次に比例する横磁化応答を解析、数値的に評価しました(右上図)[3]。さらに、FA秩序の後、時間反転対称性が破れ磁気秩序が生じた系において、電気トロイダル双極子モーメントとスピン軌道相互作用に起因する磁気異方性を解析的に求め、安定となる磁気構造を評価しました[4]。

また、電気トロイダル双極子の表現 $l \times \sigma$ より、FA秩序相ではスピン σ と軌道角運動量 l が外積の形で結合しうることが予想されます。そこで遷移金属酸化物を意識した D_{4h} のクラスターモデルにおいて $l \times \sigma$ 型の結合が誘起される条件を解析しました[5]。その結果、スピン軌道相互作用 $l \cdot \sigma$ と、面直の鏡映対称性の破れに伴う軌道混成の結合により、FA特有の非自明なスピンと軌道の結合が生じることを明らかにしました。

一方でキラリティとは、自身とその鏡像を重ねることができないという構造的な性質であり、多極子表現論に基づくと、電気トロイダル単極子 G_0 がその



微視的表式に対応します[6,7]。そこで我々は、構造歪みに伴いキラリティ化したメタン分子を微視的に解析し、 G_0 がキラリティ度合いの良い指標になりうることを提案しました[8]。数値解析の結果、 G_0 の期待値の符号が歪んだメタン分子の掌性に対応すること、 G_0 を誘起するにはスピン依存する電子ホッピングが重要であることを明らかにしました(右下図)。

現在は外場誘起の交差応答・秩序を実空間シミュレーションによって評価することに取り組んでいます。非局所効果や、誘起された多極子の空間分布等が計算できたら楽しいなと思い、日々研究しています。

[1] A. Roy, M. H. D. Guimarães, and J. Sławińska, Phys. Rev. Materials **6**, 045004 (2022).
 [2] J. Nasu and S. Hayami, Phys. Rev. B **105**, 245125 (2022).
 [3] A. Inda and S. Hayami, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 043701 (2023).
 [4] A. Inda and S. Hayami, Phys. Rev. B **109**, 174424 (2024).
 [5] A. Inda and S. Hayami, Phys. Rev. B **111**, L041104 (2025).

[6] S. Hayami, M. Yatsushiro, Y. Yanagi, and H. Kusunose, Phys. Rev. B **98**, 165110 (2018).
 [7] J.-i. Kishine, H. Kusunose, and H. M. Yamamoto, Isr. J. Chem. **62**, e202200049 (2022).
 [8] A. Inda, R. Oiwa, S. Hayami, H. M. Yamamoto, and H. Kusunose, J. Chem. Phys. **160**, 184117 (2024).



トピカルミーティング「擬カゴメ構造を有する物質のアシンメトリ量子物性」@富山

服部 一匡

東京都立大学理学研究科 准教授

2024年8月29、30日に富山県富山市「ボルファートとやま」にて表題の擬カゴメ構造に特化したトピカルミーティングが開催されました。話題を歪んだカゴメに絞り少数で深い議論を行うべく、参加者は23名（領域内13、領域外7、学生4名）で、15件の口頭発表とポスター発表4件がありました。領域外から富山県立大学の谷田先生、室先生のご助力もいただき、史上稀に見るのろのろ台風10号に怯えながらも全プログラムが行われました。某先生に「服部くん、新幹線止まってやん」、というガセ情報を二日目に聞かされた時はドキッとしましたが、米騒動下、富山のお米を購入し帰宅できました。

さて、「擬カゴメ構造」というのは通常のカゴメ構造の六角形を3回対称に一樣に歪ませたものです。単位胞は不変のまま、反転対称性は消失し、鏡映対称軸の数も減ります。擬カゴメと言われて思い出される物質としては、速水先生も携わっていたCePdAlにおける部分秩序状態などがあります。この研究会でもCePdAlと同じ空間群(No.189)に属する物質を中心に様々な発表がありました。最初に、吉田先生から物質探索を目指す準備として過去の膨大なデータを系統的に整理した報告がなされ、どの元素・組成を狙って物質開発をすべきかの議論が行われました。この研究会の趣旨を参加者に再確認させる、よく考えられたプログラムでした。その後のいくつかの物質についての発表の中でも、領域で注目しているHoAgGeや筆者も関わっているURhSnはある程度理解が進んだように思います。前者の磁気トロイダル双極子の逐次転移は典型的なK点波数のイジング相転移として理解できることがわかり、とても有意義で

した。後者に関しては、電子系由来の非磁性カイラル秩序ということで、珍しい系になっています。実験、理論が以前から出揃っているにもかかわらず、論文が発表されていないのは大問題だと思います。

二日目にはフラストレート磁性関連の話題と新しい試みの学生セッションがありました。大きい会議での講演に比べて、今回のような規模の発表でのつこんだ議論はとても教育的で、今後も継続できると良いと思います。最後に大槻先生から現状のまとめと今後の課題についてコメントがあり、今後さらに面白い物質・現象を合成・考案する努力が必要になるとあらためて感じた次第です。



図1: 発表の様子（終始なごやかな雰囲気）



図2: 1日目集合写真（会議室にて）



アシンメトリ量子 若手秋の学校

総括班 大原 繁男

名古屋工業大学大学院工学専攻 教授

アシンメトリ量子若手秋の学校について終了後のアンケート調査結果も含め報告します。

秋の学校は2024（平成6）年9月20日（金）から23日（月）まで3泊4日の日程で実施しました。北海道大学での秋の物理学会に連続させることで、旅費の節約と涼しい場所での開催を図りました。宿泊費を抑えるために、美瑛にある国立大雪青少年交流の家を合宿所を選んでいきます。

定員60名で参加者を募りましたが、すぐに超過してしまいました。講義室の最大収容人数の90名まで受け入れましたが、5月10日とした締め切り2週間前には受付を閉じざるを得ませんでした。先着順としていたものの、参加できなかった方々にはお詫び申し上げます。最終参加者は93名でした。内訳は講師10名、学生58名（学部生:4、博士前期:39、博士後期:15）、博士研究員と若手教員15名、運営10名です。女性は10名の参加でした。

図1は秋の学校のタイムテーブルです。2つのチュートリアル講演と8つの講義が行われました。講師と講演題目は次の通りです（敬称略、所属当時）
新居陽一（東北大学）

表面弾性波に関する最近の話題（チュートリアル）
木俣基（東北大学）

FIB微細加工について（チュートリアル）
平井大悟郎（名古屋大学）

5d 遷移金属の多極子秩序とフラックス法による結晶育成

石井祐太（東北大学）

共鳴X線散乱の基礎から、X線イメージング等の最先端の研究例

河野洋平（中央大学）

熱力学量測定による量子臨界現象の検証

角田峻太郎（東京大学）

遍歴強相関電子系における多極子秩序の理論

藤原秀紀（大阪大学）

放射光を利用したX線電子分光の基礎と元素選択的電子状態研究

石飛尊之（日本原子力研究開発機構）

多極子を用いた異方性の記述に基づく現象論

飯田一樹（CROSS）

最新の研究から学ぶ中性子磁気散乱とスピン波

栗原綾佑（東京理科大学）

超音波による多極子秩序に伴う臨界減速の観測

	9月20日(金)	9月21日(土)	9月22日(日)	9月23日(月)
6:30	zzz			
7:00	起床 清掃			
7:30	さわやかタイム（全員出席）			
8:00	朝食			
8:15	8:00 札幌駅北口 バスターミナル集合 8:15 出発			
9:00	石井祐太	飯田一樹	チュートリアル講演 木俣基	
10:30	5分休憩			閉校式
10:35	河野洋平	栗原綾佑	10:45 おにぎり受取	
12:05	12:00 到着 入所式（入所説明） 食事代受付、名札配布			11:00 交流の家出発
13:00	平井大悟郎	角田峻太郎	11:15 青い池到着 11:45 青い池出発	
14:30	10分休憩			16:00 新千歳空港到着
14:40	チュートリアル講演 新居陽一	藤原秀紀	エクスカージョン （雨天中止）	
16:10	質疑応答・自由時間 入室・リネン班受取	質疑応答・自由時間	18:00 札幌駅北口到着	
17:00	ゆーずびあタイム（全員出席）			
17:20	夕食			
19:00	ワークショップ	石飛尊之 20:30まで+質疑応答	懇親会	
22:00	就寝準備（22:30 消灯就寝）			
22:30	zzz			

図1. 秋の学校のタイムテーブル

8つの講義については、教科書も執筆していただきました。長く学びに使える質の高い教科書になり

ました。教科書をグレースケール印刷にしてしまったことは反省です。図がわからなくなってしまったことをお詫びします。カラーの教科書（改訂版）を広島大学の学術情報リポジトリで公開しています。

講義は随時質問を受け付ける形式にしました。質問が多く、講義がなかなか進まなくなりましたが、質問の水準が低くなかったことから形式を変えずに進めました。講師のみなさまには、ご準備いただいた講義内容を語りきれなかったかと思います。講義時間の不足を指摘する声もありました。この点は申し訳なく思っています。しかし、活気のある学びの時間を共有できました。図2の写真は受講のようすです。



図2. 受講のようす

初日の夜のワークショップでは、エレベータピッチでの自己紹介と「アシメ★通信」のアイデア出しのブレインストーミングを行いました。打ち解けてもらうことを狙って、宿泊が相部屋となるメンバーで班を形成しています。最後の班ごとのアイデア発表では、たくさんの笑いが起きました。

3日目の日曜日の午後は、勉強はお休みにして、遠足と懇親会を楽しみました。遠足はガイド付きで



図3. マグマ越えコース 参加者が沢を渡るところ

小松原原生林コースかマグマ越えコースを体力に応じて選んでもらいました。解説していただきながら、大自然を楽しめたようです。夜の懇親会はお酒も提供して講堂で開催しました。参加者はすっかり親しくなっていて、ピアノ演奏もあり、席替えもしながら会話が弾んでいました。

大雪青少年交流の家は自然の中にあり、徒歩圏にお店などありません。宿泊棟だとWi-Fiも入らず、相部屋などの環境について不便を指摘する声がありました。しかし、朝のラジオ体操に始まり、食堂で共に食事し、活動し、旗の降納に集い、22時半には就寝という非日常もよかったのではないかと思います。



図4. 懇親会のようす



図5. 全体集合写真

札幌と美瑛の移動には大型バスを二台チャーターしましたが、約3時間の所要時間は長すぎるとの意見がありました。帰りは新千歳空港を経由しましたが、何時の飛行機に乗れるか時間が読みにくく、この点も不便をおかけしました。

開催後のアンケート調査には、40件の回答をいただきました。内容の満足度は、満足が68%、やや満足が30%と高い評価をいただきました。開催場所と施設については、満足が40%、やや満足が35%でしたが、普通12%、やや不満10%、不満3%となり、上述したように遠距離移動と不便さ、相部屋などについて不満を感じたようです。

開催日数についてはちょうどよいとの声が90%でした。今後も若手の学校に参加したいかどうかについても95%が参加したいとのことで、主催者としてもまたやりたいと感じています。

全体を振り返ると講義時間の不足が一番の反省です。一番の手応えは、参加者がとても仲良くなり、やがては研究ネットワークに成長していくであろう絆を

作れたようすです。将来はライバルとなることもあろうかと思いますが、互いに尊敬し、真摯に議論できる関係になっていけると信じます。今回の参加者が何年後かに次の世代の若手の学校を担ってくれることでしょう。

最後になりましたが、講師のみなさま、参加いただいた方々にあらためて感謝申し上げます。多くの方、特に北大の皆様へ支援していただきました。また、名簿作成、宿泊やバスの手続きなど、事務を一手に引き受けていただいた秘書の三木玲子さん、楠戸貴子さんにお礼申し上げます。

注釈：著者近影は夕方のゆーすぴあタイムや朝のさわやかタイムで交流したダンスグループの代表との記念写真です。



「アシンメトリ量子若手秋の学校」に参加して

南 晶子

神戸大学大学院理学研究科物理学専攻 博士前期課程1年

私は、9月に北海道美瑛にある国立大雪青少年交流の家で開催された「アシンメトリ量子若手秋の学校」に参加しました。秋の学校は、研究に関する知識を得て、さらに参加者との交流を深める貴重な機会となりました。

秋の学校では、10名の講師の先生方から物性物理や実験技術に関する講義が行われました。講義のレベルが高く、内容も専門的であり、私にとって難しく感じる部分もありましたが、同時に興味深かったです。また、私は「重い電子超伝導体 UBe_{13} の超伝導状態におけるNMRによる研究」というテーマで、核磁気共鳴法を用いた物性測定の研究を行っています。特に、自分が行っていない実験方法についての講義は新鮮で、新たな視点を得ることができ、今後の研究にも活きると感じました。このような講義を受けることで、より一層研究に対するモチベーションが上がりました。

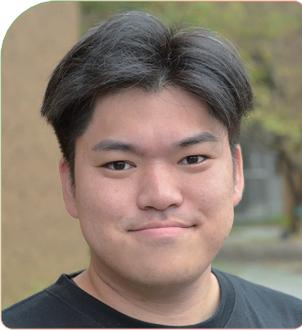
また、ワークショップや食事の時間、懇親会などで、参加者同士で交流をする時間も多く設けられていました。その中でも、特に、共同部屋での生活は非常に貴重な時間であったと感じています。私は同級生の女子学生と同じ共同部屋で4日間過ごしていく中で、自然に会話も増えていき、お互いの研究内容などに関する話題から日常生活の話題まで、深く話すことができました。私の所属する大学院の物理学専攻では、修士1年生の女子学生が私以外にいないので、同じ物性物理の研究に取り組んでいる女子学生と関係を築くことができたことが非常に嬉しかったです。

さらに、プログラムの途中にはハイキングや青い

池の観光の時間も設けられており、北海道の自然を体感することができました。プログラムの進行も規則正しく、普段の大学生活とは異なり、慣れるまで少し大変でしたが、心身ともにリフレッシュする良い機会であったと感じます。

最後になりますが、秋の学校を開催してくださった先生方に感謝申し上げます。先生方のサポートにより、多くの知識と経験を得ることができました。この経験を今後の研究活動に活かし、さらなる成長を目指していきたいと思います。





アシンメトリ量子若手秋の学校はすごい

松本 峻平

広島大学大学院先進理工系科学研究科 博士課程前期2年

9月20日(金)から23日(月)にかけて、北海道美瑛町で開催された「アシンメトリ量子若手秋の学校」に参加させていただきました。ここでの経験と感じたことを、私の視点で綴らせていただきます。加えて、これまで参加した「アシンメトリ量子」「1000テスラ科学」「超セラミックス」の3領域の雰囲気について紹介いたします。

宿泊先の国立大雪青少年の家は、十勝岳をはじめとする雄大な山々に囲まれ、自然豊かで心地よい環境でした。エクスカッションでは「マグマ越え」と呼ばれるハイキングに参加しました。予想以上に険しい岩登りや川渡りを通して、自然の大きさを体感しました。ハイキング後の温泉は格別でした。

講義は基礎からアシンメトリ量子に関連する最新の研究成果まで丁寧に教えていただきました。講義中は活発に質問が飛び交っていました。この雰囲気のおかげで私も気軽に質問でき、内容をより深く理解することができました。いただいた300ページ以上の充実した講義資料を用いて、今も学んでいます。大阪大学の藤原秀紀先生によるPESとXASに関する講義は、終始こてこての大阪弁で進められ、大変おもしろく惹きつけられる印象的なトークでした。

合宿形式の4人部屋は世代の近い研究者と深く交流する貴重な機会となりました。私の所属する研究科では若手の助教が少ないため、同じ部屋だった兵庫県立大の山根悠先生とお話できたことは大変有り難かったです。博士号取得後のキャリアパスについてのお話を聞いたことで将来の見通しがより明瞭になりました。

これまで3つの領域の研究会やワークショップに参

加させていただきました。「アシンメトリ量子」は教員と学生の距離感が非常に近い領域だと思います。学生が自身のポスター発表を見に来てほしい教員を指名できる制度や今回の秋の学校における教員と学生の相部屋など、学生が教員と直接話せる機会が豊富でした。「1000テスラ科学」は物性物理にとどまらず、素粒子・宇宙、化学、生物といった幅広い分野の研究者が集まって議論していることが印象的でした。ミニバンクを作ろうでは実際に実験で使用する強磁場発生装置の製作を体験することができました。「超セラミックス」は毎回50名以上の学生が参加しており、学生同士の交流が活発であると感じました。計算科学セミナーでは、実験系の私でも取り組めるように第一原理計算を教えていただきました。

このような素晴らしい機会を設けてくださった秋の学校校長の大原繁男先生、講師の皆様、主催のアシンメトリ量子関係者の皆様に感謝申し上げます。



マグマ越えハイキングの川渡り



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

井澤 公一

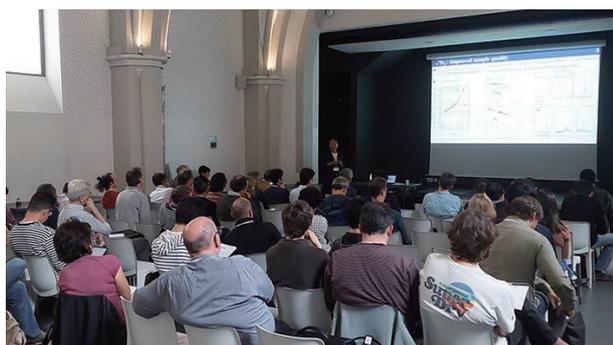
大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

2024年10月14-18日の5日間に渡り、フランスのトゥールーズで開催されたSUPERMAX – International Workshop on Superconductivity & Magnetism in f-Electron Quantum Materials under Extreme Conditionsに参加しました。トゥールーズは、パリ、リヨン、マルセイユに次ぐフランスの第4の都市であり、エアバス本社が所在する航空・宇宙産業の街として知られています。赤レンガ作りの建物が立ち並ぶその美しい歴史的街並みは、フランスの他の都市にみられる石造建築とは違う独特の風情を醸し出しており、ワークショップに彩りを添えていました。

ワークショップは、本領域との共催で行われ、フランスをはじめ、日本、ドイツ、イギリス、アメリカなど、世界各国から約70名の研究者が集まりました。議論は、 UTe_2 、 $CeRh_2As_2$ などの超伝導に関する最新のトピックを中心に、EuやCe、Ybなどの希土類化合物における非相反伝導やスキルミオンといった先進的な現象、さらには強磁場・高圧における最先端実験技術まで多岐に渡りました。全体で47件の口頭発表と14件のポスター発表が行われ、本領域からは鬼丸、木俣、小手川、井澤の4名が招待講演を行い、アシンメトリ量子物質のコンセプトとそれに基づく最

近の成果を参加者に向けて広く発信しました。ワークショップの全14セッションのうち6セッションを占め、中心的なトピックとなったのは UTe_2 でした。ここでは、紙面の都合上、議論された各話題を詳述するのではなく、 UTe_2 に焦点を絞り、私が受けた印象を報告したいと思います。

UTe_2 については、試料の高純度化に伴い、より本質的な結果が得られるようになったこともあってか、超伝導対称性やギャップ構造、温度-磁場-圧力相図、スピン揺らぎ、フェルミ面の形状など、多岐にわたる議論が活発に交わされました。なかでも3次元フェルミ面の存在をめぐる、意見が分かれていたのが印象的でした。それぞれの主張は興味深いものでしたが、一部、結論の先にある主張したいことが議論の中に見え隠れしているような気がしたのは、私だけでしょうか。一方、超伝導対称性については、様々な可能性が提案されていました。それ自体は決して悪いことではないですが、実際にはなんでも同様に起きて良いわけではなく、物質のバックグラウンドや物理的な要請から選択肢はある程度制限を受けるはずで、現状、自由すぎると言えるような議論が多い印象で、その収束には、一旦不自然な可能性は脇に置き、物理





的に自然な前提に基づいた議論の検討が重要かつ必要なのではないかと感じました。ワークショップでは、休憩時間やランチタイムが長めに設定されていたため、こうした情報や議論の整理や解釈を再考する観点からも、参加者同士が講演内容や研究についてじっくり意見交換を行うことができたように思います。

3日目の夕方に世界遺産であるミディ運河を巡る船上クルーズパーティーが開催されました。参加者はワイン、チーズ、そして生演奏のコンサートを楽しみながら語り合い、交流を深めることができました。特に、講演を終え緊張から解放された鬼丸代表が、美しい運河の景観を背景に参加者と共に大いに盛り上がり、至福のひとつきを過ごしている姿がとても印象的でした。この交流の時間が翌日以降のセッションに向けての大きな活力になったのは言うまでもないでしょう！

一方、プログラムの中でひととき異色を放ち強く印象に残っているのがLuigi Paolasini氏による「The Paganini's violin "the Cannone": history, music and science」と題した講演です。あのパガニーニが所有していたという「イル・カンノーネ」と名付けられたバイオリンに焦点を当てたこの講演は、音楽と物理が交差するユニークな内容で、音楽を少し齧ったことのある著者にとって興味をそそらない筈はありません、、、と書くと講演をしっかりと聴いたかのように

聞こえてしまうかもしれませんが、実際にはその時間帯にJacques Flouquet氏とベルソレイユで会う約束をしていたため聴くことは叶いませんでした。講演を聴いた方に伺うと、非常に興味深い内容だったとのことでした。特に、バイオリンにおいても「アシンメトリ」が重要な役割を果たしているということらしく、本領域にとっては非常に関連深く、嬉しい(?)内容だったかもしれません。対称な形状をもつバイオリンにおいて、魂柱や力木といった構造による非対称性が、誘起される定在波の各モードを通じて音色に大きく影響していることくらいは知っていますが、実際にはどんな話だったか、講演を聴くことができなかったのは本当に残念でした。

最後に、このワークショップは、近年よく見られる逆オッカムの剃刀[1]的な議論がそれほどなく、そのような議論に辟易していた私にとって、心地よい場でした。旧友との議論を通じて、むしろオッカムの剃刀的なシンプルで本質を重視した考えに基づき、物理の基本からじっくりと見直すことができたのは、非常に有意義でした。このような機会を得られたことで、自身の研究に対する姿勢を改めて考える良いきっかけとなったと感じています。そのような機会を与えてくれた主催者のWilliam Knafo氏をはじめ関係者に感謝したいと思います。

[1] I. Marzin, Nat. Phys. **18**, 367 (2022).



第18回物性科学領域横断研究会 「凝縮系科学の最前線」@神戸

桐越 研光

岡山大学異分野基礎科学研究所 特任助教

2024年11月26、27日に神戸大学の100年記念館六甲ホールにて表題の研究会が開催された。神戸大学の六甲台第2キャンパスへ向かう坂道は急峻で運動不足の身体には堪えたが、大学キャンパスは神戸の街並みを一望できるところにある(図1)。

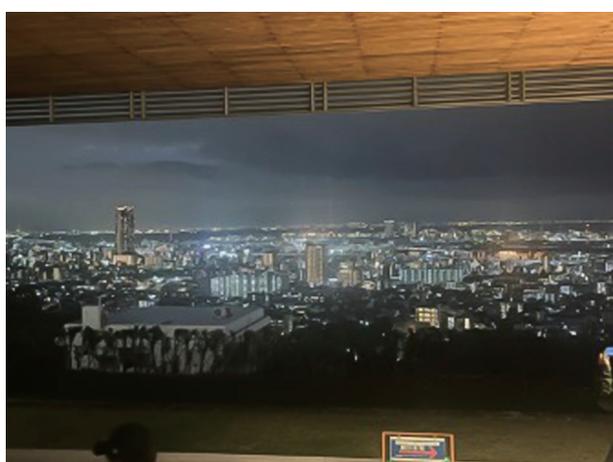


図1 100年記念館から望める夜景

本研究会は物性関連の学術変革領域が一堂に会して、研究内容を専門外の研究者に解説し、領域間のシナジー効果を高めることを目的としており、福山秀敏代表と秋光純副代表が中心となって年に一度開催されている。我々の領域からは、神戸大学の小手川恒氏による「偶パリティ多極子由来の異常ホール効果を示す新規物質」、大阪大学の高橋英史氏による「トポロジカル半金属における逆フレキシエレクトリック効果の観測」というタイトルの講演と、私を含めた6件のポスター発表があった。二日間にわたる講演の中には、今年度が最終年度である領域からの総括的報告や、逆に今年度から始まる研究領域の代表からはプロジェクトの展望や期待が述べられており、凝縮系科学が連続と続く様が見られた。初日

の最後には福山・秋光両代表によって創設された凝縮系科学賞の授与式および受賞者記念講演があった。

クロージングの秋光副代表による本研究会の開催意図の説明が印象的であった。昔のプロジェクトは広いテーマの下で様々な分野の専門家が参入する学際的研究が多かったが、昨今は専門性が増し、他分野の研究者が参入するハードルが高くなっていること、この研究会は異分野間のコミュニケーションの活性化させ、分野横断の研究を生み出すことを目的として開催されているとのことだった。このコメントを聞いたとき、以前、本研究領域に参加していない研究グループにて多極子のレクチャーを行ったときに「多極子物性の研究は面白そうで、内部では盛り上がっているように見えるが参入しづらい」という旨のコメントをもらったことを思い出した。他分野の研究内容を理解することは難しいが、その要因の一つとして異分野間コミュニケーションの機会が少ないことが挙げられるだろう。また、研究会の冒頭で福山代表が劇作家の井上ひさし氏の「むずかしいことをやさしく、やさしいことをふかく、ふかいことをゆかいに、ゆかいなことをまじめに」という言葉を引用しながら説明されていたように、専門外の研究者に(例えば研究領域内の理論家と実験家の間であっても)分かりやすく説明する技術は必要である。

本研究会への参加は、異分野の最新トピックに触れると同時に、異分野間のコミュニケーションや新たなテーマの創出といった研究者としての必要な素養に関しても個人的に学ぶことのできる良い機会となった。



トピカルミーティング「アシンメトリ量子物質における交差相関の開拓」@神戸

小林 達生

岡山大学環境生命自然科学研究科 教授

2024年12月6、7日に神戸大学にて表題のトピカルミーティングが開催されました。参加者は77人（領域内28人、領域外11人、学生38人）で、12件の口頭発表とポスター発表38件と全体会議並みの盛り上がりでした。

今回のトピカルミーティングは、本学術領域のメインテーマである、“アシンメトリ量子物質における交差相関”をテーマとし、理論・物質開拓・先端計測の研究者が集まって、最近の成果やアイデアを共有することで、物質開発や共同研究を促すことを目的として企画されました。会議では、領域内外の方々から、altermagnetの最近の展開、FIBや制御された応力、熱流等を用いた精密計測による交差相関研究の展開、カイラルやフェロアキシャル系の物質開発と交差相関、フレキソエレクトリック効果や異常ホール効果の最近の展開など交差相関に関わる様々な最先端の研究が紹介されました。今回、JPhysicsの

領域代表だった播磨尚朝名誉教授（神戸大学）が初めて参加されて、ちょっと引き締まったセッションになった気がします。

初日の夕方には、ポスターセッションが行われました。学生による講演が28件あり、非常に活発な議論が行われ、5件の優秀ポスター発表賞が授与されました。個人的に気になったのは、残念ながらポスター賞をもらえなかった学生さんで、私が聞いた発表はいずれも甲乙付け難い印象を受けました。腐らずにいい研究をしてください。発表に引き続き開催された情報交換会でも、和気藹々とした雰囲気で大いに盛り上がりました。

余談ですが、神戸大学は筆者の母校です。二日とも晴天に恵まれ、紀伊半島と淡路島それらにはさまれた友ヶ島もよく見えていました。初めて神戸に来られたのであろう学生さんたちが、興奮気味に写真を撮っていたのが印象的でした。



図1 集合写真



集束イオンビーム-走査電子顕微鏡システム (FIB-SEM) の導入

木俣 基

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター 研究副主幹

試料の正確な整形は実験精度向上のためにしばしば重要になります。例えば電気抵抗を測定したことがある人ならば、「もう少し試料を細長くできたなら、」、「もう少し電極を対称につけることができたなら、」と思ったことはないでしょうか?今回導入された集束イオンビーム(Focused ion beam: FIB)加工装置は、実験家のこのような願望を非常に高い精度で叶えてくれる装置です。

図1にFIB加工装置の外観(a)と試料チャンバー内部の写真(b)を示します。図1(b)のオレンジの部分と青い部分がそれぞれFIBと走査電子顕微鏡(SEM)の鏡筒です。FIBでは高電圧で加速したイオンビーム(今回の装置ではGaイオン)を局所的に照射し、試料の特定の部分を削り取ります。これにより、バルク体の試料からサブミクロン~ミクロン程度の厚さの薄片を作ることができます(図1(c))。作製した薄片はチャンバー内のナノマニピュレータにより取り出し、あらかじめ電極薄膜を作製しておいた基板上に輸送します。

FIB装置のもう一つの重要な機能に局所蒸着があります。これは、金属錯体ガスの雰囲気中でイオンビームを照射することで分子の化学結合を乖離させ、ビームを照射した部分に金属含有膜を堆積させるものです。導電性の薄膜を局所的に形成できるので、結晶薄片への電極付けに利用できます。今回の装置ではPtとWの局所蒸着が可能です。その後、最終的な素子形状へとさらに加工を進めていきます。またこれら一連の加工プロセスはSEMによるほぼリアルタイムでの観察が可能です。

上記のようにFIB-SEMを使うと、普段のワイヤー放電や紙やすりによる試料加工をサブミクロンスケールで行うことができます。これはまるで高精度な“手”のようなもので、気軽にアイデアを試しながら多くの方に活用していただくことが一番だと思っています。

例えば図2(a)に示したような素子では、結晶方位に対する抵抗率の異方性を精密に測定することができます[1]。また、非常に薄い結晶を厚み方向に切り出したり、というようなことも可能です。図2(b)に示

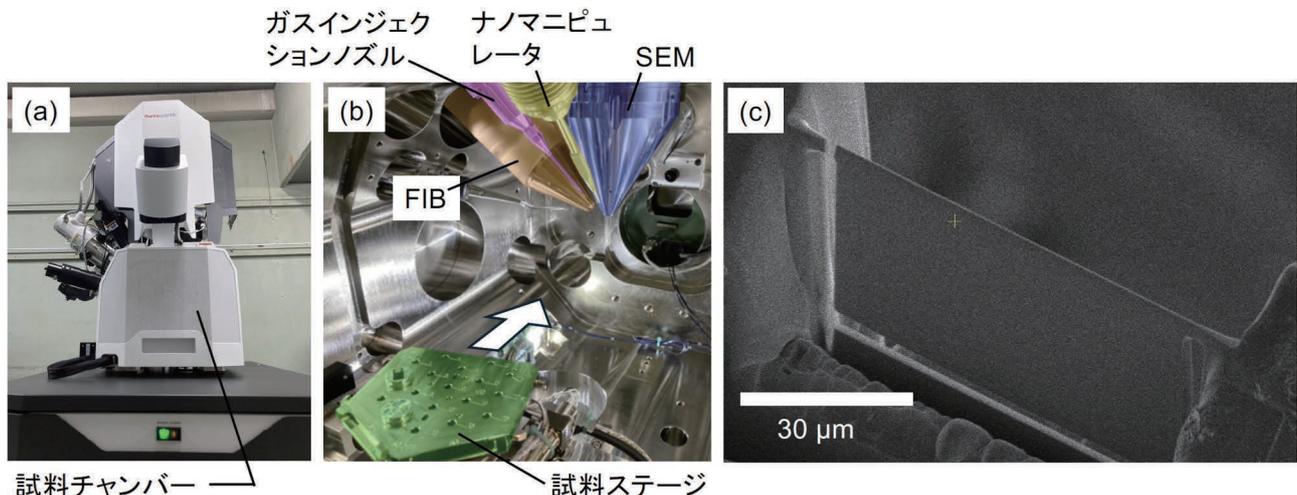


図1：(a)導入されたFIB加工装置の外観と(b)試料チャンバー内部の写真。(c)バルク結晶から作製した薄片試料のSEM像。厚みは約2 μm。

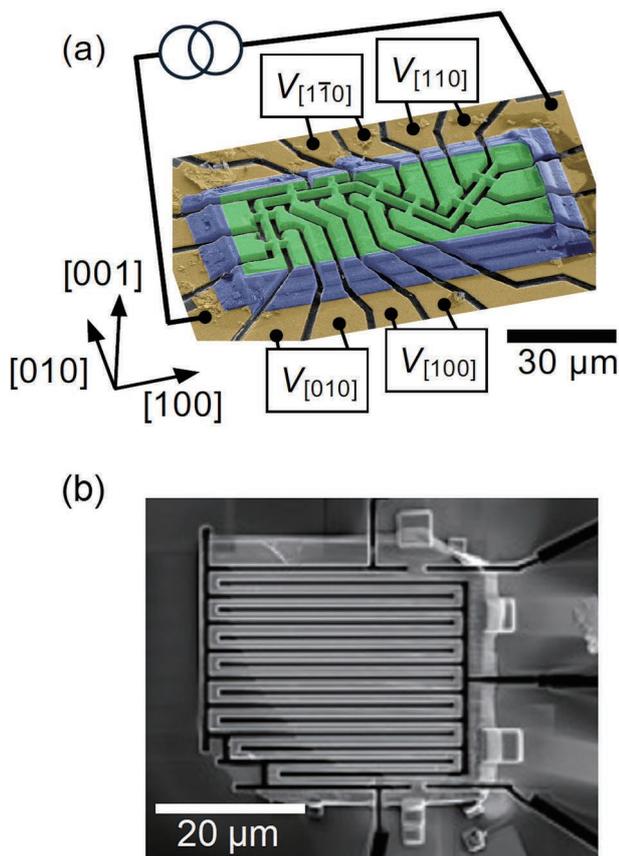


図2：FIB微細加工を用いた電気抵抗測定素子の一例。(a)電気抵抗の異方性測定用に作製した素子。緑、青、オレンジで色付けした部分はそれぞれ、単結晶試料、FIB蒸着したPt、Auの薄膜電極を示している。(b)電流経路を長く蛇行させ、測定抵抗を大きくすることで高感度測定を実現できる。

した素子では、電流経路を蛇行させることで長さを稼ぎ、測定する抵抗の絶対値を大きくしています。このような加工により、抵抗率の小さな物質でも精度の高い測定が可能になりますし、また、強磁場中のようにノイズの大きな環境下でもS/N比の高いデータを得ることができます[2]。

一方で試料サイズを小さくすることで、質的に新しい現象を観測することも可能になります。スピンの伝導のように短い距離でしか生じない現象や、非相反・非線形応答のように高い電流密度や外場が必要な交差相関応答の観測はその一例であり、これらの課題の一部は領域内外との共同研究として現在進行しています。今後は電氣的測定以外にも、超音波や高周波を用いた実験、熱測定、高圧下での実験も実

現できるよう技術開発も行なっていきたいと考えています。また量子ビーム計測を担当するA01メンバーとも協働し、ドメインの可視化やそれに依存した現象の解明も目指します。

また広島大学に導入された無冷媒型物性測定装置との連携を強化することで微細加工試料を迅速に測定し、成果創出に繋げる体制を作ります。さらにスキル相伝プログラムを通じて、実験技術の普及と継承にも努めていきます(図3)。

このようにFIB微細加工は、さまざまな実験の精度向上に有効であることは間違いありません。しかしそれはあくまで手段の一つである、ということを最後に強調しておきたいと思います。この装置がアシンメトリ量子物質の「創出」という目的に大きく貢献し、コミュニティの活性化に繋がるよう力を尽くしていきたいと考えています。どうぞよろしくお願いいたします。



図3：チャンパー内のマニピュレータの針を交換の様子(写真は北澤崇文さん)。

[1] A. Yokoyama, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **94**, 023701 (2025).
 [2] T. Helm, *et al.*, *Nature Communications* **15**, 37 (2024).

アシンメ★通信

第4話

「アシンメトリ量子のロゴって家紋みたいじゃね？」の巻



芦芽量子



アシンメトリ量子のロゴ(図1)って、家紋みたいじゃね

図1
アシンメトリ量子ロゴ

「非」と、「生」の漢字が隠れているロゴは、グループの思想をあらわすもので確かに家紋みたいですね



家紋には点対称や線対称(左右対称)のものが多いけど、アシンメトリ量子のロゴは、流石にアシンメトリ(非対称)なんじゃね

そこは譲れませんので(笑)
家紋にも対称性が高いものもあれば低いものもありますね



対称性が高い? って改めて考えてみると難しいんよ

群論という数学の考え方では、回転したり鏡に映したりして元に戻る操作(対称操作)の数が多いうことを「対称性が高い」といいます。逆もまた然りです



そうなんじゃー、わかりやすいね

さてここでクイズです。
次(図2)の家紋(丸に三つ鱗)には対称操作はいくつ?



図2 丸に三つ鱗



トライフォース [2] みたいじゃね!
家紋の真ん中に垂直に回転軸を立てて回したときに重なる操作と、覗き込んだときに元と同じに見える鏡の立て方(鏡映面)がそれぞれ120°おきに3つあって、家紋自体を裏返しにしても重なる操作がもう1つあるんじゃろ!

すごい! でも二次元の紋様を考えているので裏返す操作は含まないことにしましょう(笑) [3]



じゃ、次はちょっと難しいですよ。
初期の徳川家の家紋(図3 三つ葉葵)には対称操作はいくつあるでしょう?



図3 徳川葵(中期)



対称性はさっきの家紋と一緒にやね(えへん)

惜しい! ... 葵の付け根に注目してみてください





あれ？ 茎の付け根が曲がってる！ぶち意地悪いけー？

あはは、失敬失敬（死語）。でもそのおかげでこの家紋は**カイラリティ**を持っていますね



ほんじゃったら**徳川家もアシンメトリ**じゃったんやねえ。鬼丸家の家紋はどなん？まさか丸に鬼？

いえいえちがいますよ（汗）うちの家紋は「丸に五本骨扇」というものです。



図4 丸に五本骨扇



おー！左右対称・・・と思いきや、扇の要の部分**が立体的だからこれもアシンメトリ**！

量子さんのお家の家紋はどのようなものですか？



うちの母方は「杏葉九曜」じゃわ



図5 杏葉九曜

すごっ・・・相当由緒あるご家系みたいですね。ただ、**真ん中に鏡映面**があります。アシメさんなのにシンメトリックでしたね！



みなさんもおうちの家紋の対称性を調べてみんちゃい☆[2]

うろたんの豆知識コーナー



豆知識① カイラルでない葵の御紋もあるニョロ。徳川3代と中期ごろまでは捻れてるらしいニョロ。



初期



中期



後期

豆知識② 杏葉九曜は、実は**厳島神主家**の家紋ニョロ。
<https://ja.wikipedia.org/wiki/厳島神主家>

[1]「トライフォース」とは任天堂「ゼルダの伝説」に登場する象徴である。近年ではグラフ理論 (J. Fox, A. Sah, M. Sawhney, D. Stoner, and Y. Zhao, Math. Proc. Cambridge Philos. Soc. **169**, 209 (2020)) や、UNi₄Bの多極子秩序相の理論 (T. Ishitobi and K. Hattori, Phys. Rev. B **107**, 104413 (2023)) でも用いられている。

[2] 本エピソードはアシンメトリ量子秋の学校2024 (@美瑛 2024年9月20-23日) の夜のワークショップにて、山根悠さん、今布咲子さん、内藤和泉さん、南晶子さん、榎原みら乃さん、喜多山鉄平さん、小原楓さん、松本峻平さんによるグループが創作された「校章の対称性」にまつわるエピソードに基づいて構成されています。

[3] 実は動かさない操作、つまり「何もしない操作」(恒等操作、記号はE)もあります。

2025年4月からの関連行事

■ トピカルミーティング

「アシンメトリ量子物質の新展開：多極子のスケールシームレス化に向けて(仮)」

日時：2025年6月11日(水)～13日(金) (予定)

場所：山梨県立図書館 (甲府市)

アシンメトリ量子主催

■ International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2025)

日時：2025年7月6日(日)～11日(金)

場所：Montreal Bonaventure Hotel, Montréal, Canada

■ 30th International Conference on Low Temperature Physics (LT30)

日時：2025年8月7日(木)～13日(水)

場所：Bilbao Exhibition Centre, Bilbao, Spain

■ ワークショップ「高次にもつれた量子相探索の展開」

日時：2025年9月1日(月)～3日(水)

場所：京都大学基礎物理学研究所

極限宇宙 (学術変革領域研究 (A)) との共催

■ 日本物理学会

日時：2025年9月16日(火)～19日(金)

場所：広島大学 (東広島キャンパス)

■ HVAR 2025: International Conference on Strongly Correlated Quantum Materials (ICSCQM)

日時：2025年10月12日(日)～17日(金)

場所：Hvar, Croatia

URL：<https://hvar2025.ifs.hr>

アシンメトリ量子共催

■ 第19回物性科学領域横断研究会 凝縮系科学の最前線

日時：2025年11月下旬

場所：東京大学物性研究所

アシンメトリ量子主催

■ 令和7年度 領域全体会議・成果報告会議

日時：2026年1月8日(木)～10日(土) (予定)

場所：名古屋工業大学

アシンメトリ量子主催

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

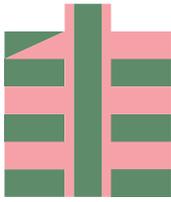
24H01654 交替磁性揺らぎによる超伝導発現の実証



編集後記

早めに編集担当を済ましてしまった方が楽に違いない、という不純な動機で#04の編集を担当させていただきました。お忙しい中、記事をご執筆いただきました皆様に深く感謝いたします。結果的に楽だったのは今後の大変さを観測してみないことにはわかりませんが、無事に発刊され安堵しております。

さて、早いもので本領域も既に二年目が終わろうとしています。ニューズレターでは、面白い研究結果や領域内外に知ってもらいたい重要な知見を多くの人の目にとまるようにすることが一番だと思っております。その意味での反省点として、#04は若干「会議報告」が多くなってしまったことは、私の不徳の致すところであります。「～さんのこういう記事を読みたい」、などのリクエストがありましたら編集委員までお伝えいただけると光栄です。また、#04では新しい試みとして、学生の方から見た率直な所属研究室の光と影の紹介をご自身の研究紹介とともに掲載しています。今後も領域内の先生と学生の方に依頼があるかもしれません。特に領域内の先生におかれましては、恐れることなく快く引き受けていただけますよう、どうぞよろしくお願いいたします。(服部 一匡)



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4号

2025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/>

