

NEWS LETTER

J-Physics

Physics of Conductive Multipole Systems

#09

March



巻頭言

同じ絵を見る 播磨 尚朝 002

計画研究報告

A 0 1 計画研究 まとめ 中辻 知 004

B 0 1 計画研究のまとめ 青木 大 011

C 0 1 計画研究 まとめ 網塚 浩 015

D 0 1 計画研究 まとめ 野原 実 022

研究解説

カイラル磁性：実験の立場から 大原 繁男 027

公募研究報告

A 0 1

α'' -(BEDT-TTF)₂Rb_{1-x}Co(SCN)₄の
dスピン- π スピン- π 電荷結合の解明 井口 敏 036

電子面とホール面を持つ相関電子系の
マルチチャンネル近藤効果と非従来型超伝導 星野 晋太郎 037

高圧力で拓く多極子と伝導電子の
混成効果による新奇物性 松林 和幸 038

内殻光電子線二色性のここまでの研究まとめ：
4f電子系に対する新たなプローブとしての確立 関山 明 039

多極子伝導物質の高品質単結晶化と
量子振動効果によるフェルミ面の研究 菅原 仁 041

価数転移に由来する新しい量子現象 渡辺 真仁 042

SmおよびEu化合物に見る
価数揺動系の物理とその発展 椎名 亮輔 044

フラストレーション系の
量子スピネマティック相と
新奇伝導の理論的・計算科学的研究 坂井 徹 045

多極子を含む局所電荷分布の揺らぎ 水戸 毅 046

新たな非クラマース二重項系の多極子物性と
その圧力効果 脇倉 和平 047

B 0 1

U(Rh,Ru_{1-x})₂Si₂の強磁場相における
整合-非整合転移と隠れた秩序 野尻 浩之 048

Sr₂RuO₄の超伝導パリティ問題への取り組み
～ 研究手法の発展に伴う新展開～ 橘高 俊一郎 049

5dパイロクロア酸化物Cd₂Re₂O₇の
電気トロイダル四極子秩序相における
ドメイン制御 平井 大悟郎 050

ワイル超伝導と
ネマティック・トポロジカル超伝導の
電磁応答・熱応答・幾何学的応答 藤本 聡 052

ジグザグ構造を持つ物質, 及び
関連物質における特異な量子相の
解明と新規探索 小手川 恒 053

Cd₂Re₂O₇の高圧下における
奇パリティ多極子秩序とパリティゆらぎ超伝導 小林 達生 054

スキルミオン化合物 EuPtSi の磁気モーメントと
伝導電子のスピンテクスチャー 大貫 惇睦 055

遍歴多極子と多極子超伝導体の発展 池田 浩章 056

C 0 1

局所的な軌道混成に由来する
トロイダル多極子がもたらす
新奇マルチフェロイクスの開拓 速水 賢 057

単サイト四極子近藤効果の検証：
Y_{1-x}Pr_xIr₂Zn₂₀の弾性応答に観る
対数的温度変化 柳澤 達也 058

動的平均場法に基づく
非局所相互作用の新しい公式 大槻 純也 059

遍歴反強磁性体Ba_{1-x}K_xMn₂As₂の
磁気輸送現象 大串 研也 060

反強磁性体における磁気キラル二色性 阿部 伸行 062

スピン軌道結合金属Cd₂Re₂O₇における
反転対称性を破る相転移と電子系の秩序状態 瀧川 仁 063

反強磁性金属EuMnBi₂における
磁気圧電効果の観測 塩見 雄毅 064

CONTENTS

反転対称性の破れた物質の
フラックス法による合成 大原 繁男 065

Magnetism in non-centrosymmetric
f electron systems Robert Peters 066

Ceジグザグ鎖構造を持つ
新しい重い電子系化合物における
電流誘起磁化現象の探索 本山 岳 067

12 GPaまでの比熱とホール抵抗測定から見た
4f電子系キラル化合物YbNi₃Ga₉の
特異な磁気相図 梅尾 和則 068

D01

New hybrid f-/p-electron mixed
valence molecular materials Kosmas Prassides 069

遍歴反強磁性物質BaMn₂Pn₂における
電気磁気効果 谷垣 勝己 071

空間反転対称性が破れた
立方晶の結晶構造をもつ
Pt化合物における新超伝導体探索 岡本 佳比古 072

層状・3次元遷移金属化合物の
スピン軌道相互作用由来の
異常電子相制御と新規物性探索 宮坂 茂樹 073

幾何学的フラストレート系
イリジウム酸化物Ca₅Ir₃O₁₂の
フォノン分散の研究 松平 和之 074

今号の研究成果

磁気量子臨界点近傍の比熱、
熱膨張係数、グリュナイゼンパラメーター 渡辺 真仁 075

研究会報告

J-Physics ものづくり学校第4回
「対称性・群論トレーニングコース in 高野山」
報告 本山 岳 080

会議報告「J-Physics 2019
International Conference &
KINKEN-WAKATE 2019 Multipole Physics」 青木 大 083

International Conference on
Strongly Correlated Electron Systems
(SCES2019) 会議参加報告 松田 達磨 085

第13回物性科学領域横断研究会
「凝縮系科学の最前線」報告 榊原 俊郎 087

橘高俊一郎さん 凝縮系科学賞受賞 榊原 俊郎 089

J-Physics令和元年度
領域全体会議報告 藤 秀樹 090

滞在記

Ames滞在記 桑田 祥希 095

PSI滞在記 比嘉 野乃花 097

イギリス・ISIS滞在記 山本編 山本 理香子 098

海外派遣制度によるラザフォード・
アップルトン研究所滞在の報告 草ノ瀬 優香 099

グルノーブル滞在の抱負 佐藤 芳樹 100

チェコ・ブラハにおける滞在記 高力 暁成 101

コラム

国際周期表年2019 播磨 尚朝 102

アウトリーチ活動「日本語からはじめよう」 大原 繁男 104

評価委員の先生から

J-Physicsを振り返って 鹿野田 一司 105

J-Physics、そのなんと深い物理の世界 上田 寛 106

事務局からのお知らせ

今後の予定 107

編集後記 108



J-Physics
多極子伝導系の物理
Physics of Conductive Multipole Systems

同じ絵を見る

領域代表 播磨 尚朝

神戸大学大学院理学研究科 教授

新学術領域も活動の最終年度となり、9月には国際会議J-Physics2019を開催して、1月には全体会議を行いました。ニュースレターも最後の号になりました。最終的な成果の取りまとめはこれからですが、領域発足前からの長い間、大変お世話になりました。領域発足後に知り合った、特に若い人たちとも、楽しい時間を過ごすことが出来ました。

楽しいと言えば、学問の世界ではありませんが、去年はラグビーのワールドカップで大いに盛り上がり、試合観戦を楽しみました。日本は初のベスト8に進んで、テレビなどでも多く取り上げられたこともあり、これまでラグビーに興味のなかった人でも、ラグビーの試合を観戦した人が多かったのではないのでしょうか。私の予想は予選リーグでは3勝1敗でベスト8進出でしたが、結果は4連勝でした。2戦目のアイルランド戦は素晴らしい逆転勝ちを収めました。4戦目のスコットランド戦はさらに興奮する試合でした。後半開始早々に28-7と20点以上のリードをしたにも関わらず、間もなく28-21と追い上げられて、ワンチャンスで追いつかれる点差になりました。試合終了までの25分間はスコットランドの猛攻を凌ぐだけの時間が続きました。

年末に放映されたテレビ番組で、試合を見ても気がつかなかった選手達の考えを知りました。後半に日本が21点差をつけたときに、その時の点の取り方を見てスコットランド側が勝てるかと確信した、という話は驚きでしたが、さらに興味深かったのは、その後の日本チームの戦い方です。ラグビーは団体競技ですが、15人の選手の役割が異なっていて、さらに攻めている時と守っている時が明確に分かれています。この時に、15人の選手が一つになって力を発揮する時のキーワードが「同じ絵を見る」だったそうです。詳細は省略しますが、日本チームは同じ絵を見ていなかった時間帯があり、7点差になった後も防戦一方でした。しかし、あるプレーをきっかけに「攻めるディフェンス」に意識が統一され、スコットランドの攻めを凌ぎきりました。再び、「同じ絵を見る」ようになることで、最終的に勝利することが出来たわけです。

「同じ絵を見る」とは英語で“on the same page”のことだそうです。辞書による訳は「同じ考えを持っている/目指すものが同じである」ですが、「同じ絵を見る」の方が雰囲気をよく伝えます。個性のある多くの選手が同じ絵を見てプレーすることで、集団としての力を発揮するのです。

新学術領域の様な大きなプロジェクトは、正に同じ絵を見て研究を行おうというものではないのでしょうか。そして私たちは、同じ絵を見てきたのでしょうか。私は、たくさんの人たちが同じ絵を見る事が出来たおかげで、多くの共同研究や新しい成果が生まれてきたと思っています。そして、もうしばらくは、同じ絵を見て行きたいと思っています。

---旅の終わり---

「ああ、これで旅が終わったんだ」、2011年9月、リオデジャネイロのコパカパーナ海岸に面して建つホテルのバーでカイピリーニャを独り飲みながら、そう感じた。地球の反対側で旅が終わるとは奇妙なものだが、終わりがあれば始まりがある。始まりは、2000年8月、同じブラジルのレシフェでのICMのバンケット。ブラジル伝統のカクテルであるカイピリーニャの列で前に並んでいた物性研のM先生に、「面白そうな短期研究会を提案されていますね」と声をかけてもらった時だった。その年の10月にスクッテルダイトの短期研究会を柏に移転したばかりの物性研で開催したのが、スクッテルダイトの特定領域研究の始まりだった。翌2001年に $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ で超伝導が発見され、2002年のクラコウのSCESと広島でのLTでは、スクッテルダイトの知名度は上がっていった。佐藤英行さんを代表とする特定領域研究の期間(2003~2007)が過ぎても、旅はまだ終わらない。ウイーン工科大学のBauer先生に間を取り持ってもらい、オスロ大学との研究会を提案したのが2010年の10月だった。ノルウェーから15,000ユーロの補助金が得られることになり、2011年9月にケンブリッジで開催されたSCESの後に、ノルウェーのSkuterudで研究会を開催することになった。Skuterudにはコバルト鉱山があり、ここで産出される CoSb_3 がスクッテルダイト(skutterudite)と呼ばれたのが、スクッテルダイトの始まりとされている。2000年からずっと「同じ絵を見」てきたMaple先生もアメリカから奥さん同伴で参加した。このSkuterudでの研究会のあと、別の研究会に参加するために向かったのがリオデジャネイロだった。

新学術領域J-Physicsの領域設定期間は3月で終わりますが、旅はまだ続きます。次に、同じ絵を見に集まる機会を楽しみにしています。



A01 計画研究 まとめ

中辻 知

東京大学理学系研究科物理学専攻 教授

<p>榊原 俊郎 東京大学 物性研究所 教授</p>	<p>小林 寿夫 兵庫県立大学 大学院物質理学研究科 教授</p>	<p>中西 良樹 岩手大学大学院理工学専攻 教授</p>
<p>鈴木 通人 東北大学 金属材料研究所 准教授</p>	<p>佐藤 卓 東北大学 多元物質科学研究所 教授</p>	<p>有田 亮太郎 東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授</p>

2015年の夏の発足以来、もはや5年が経つと思うと非常に感慨深いものがある。A01の研究目的は、局在した多極子が伝導電子と相関することにより誘起する新しい量子現象に関する学理を構築することであった。発足当初設定した目標は主に以下の4つである。

- (1) 局在した多極子の遍歴化プロセスと、それによる異常金属や新奇超伝導発現の機構解明。
- (2) 価数の量子臨界揺らぎが創出する新しい金属状態及び超伝導状態の究明。
- (3) 多極子モット絶縁体の局在・遍歴相転移の機構と、その近傍の新奇量子状態の解明。
- (4) 多極子の遍歴・局在状態について、第一原理計算による微視的理解と新物質創成への指針の構築。

5年間の成果としては、(1)~(4)について、それぞれに強弱はあるものの、それなりに目標を達成できたように感じている。また、EuPtSiやMn₃Sn等の登場でB01,C01,D01と緊密な協力関係が自然な形で構築でき、当初想定していなかった新しい概念を次々と生み出したことで、dとf電子系の研究者間の敷居はなくなったと同時に、分野を超えてスピントロニクス分野への波及効果を持つ成果に繋がった。ここでは、メンバーの方々の代表的な成果についてご紹介する。

1. トポロジカル磁性体におけるクラスター多極子と巨大非対角応答

本領域発足直後、中辻グループは反強磁性体Mn₃X (X = Sn, Ge)が、微小磁化(~3 mμ_B)しか持たないにもかかわらず、強磁性に匹敵する巨大異常ホール効果を室温かつゼロ磁場で示すことを発見した[1, 2]。

この起源は内因性機構(ベリー曲率)であると考えられる。ベリー曲率は波数空間の仮想磁場であり、ワイル点等トポロジカルな構造があると大きくなる。実際角度分解光電子分光 (ARPES) 測定及び磁気抵抗測定から、強相関効果によりバンド構造が5倍狭くなっていることを除いては理論計算と良く一致しており、さらにワイル半金属で予言されているカイラル異常と考えられる負の磁気抵抗効果が観測され、磁気ワイルフェルミオンの世界初の例であることを示した[3]。また強磁性体に匹敵する巨大な異常ネルンスト効果、磁気光学カー効果(MOKE、図1)も観測された[4,5]。これらは通常強磁性体でのみあらわれる現れるものであるが、Mn₃Snの磁気構造がクラスター磁気八極子秩序とみなせ、強磁性体と同じ対称性を持つために許されることが鈴木通人氏らの研究で明らかになった[6]。また異常ネルンスト効果は新しい熱電変換技術として、MOKE測定は反強磁性ドメインを非破壊で直接観測で

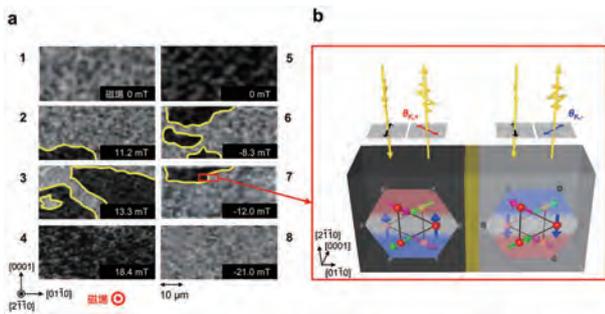


図1 (a) 室温でのMn₃SnにおけるMOKE像。コントラスト、黄線はそれぞれ磁区、磁壁を表す。(b) コントラストに対応した磁気八極子ドメインの概要図。[5]

きる手法として応用上も大変重要である。

上記ワイル反強磁性体の開発を契機にさらに物質開拓が進み、新たなワイル強磁性体の発見にも繋がった。それが立方晶フルホイスラー系Co₂MnGaである。我々はCo₂MnGaが室温で過去に知られている最大値より10倍以上大きな値を示すことを明らかにした[7]。さらに、実験、第一原理計算、モデル計算の比較から、I型とII型のちょうど間(量子リフシツク転移点)にあるワイル点の存在が明らかになった。フラットなバンドと大きなベリー曲率の両立が巨大異常ネルンスト効果の発現に重要であるという発見は今後の材料探索の指針になる。さらなる研究により革新的な熱電技術が生まれることが期待される。

2. 四極子近藤格子系PrV₂Al₂₀における特異な輸送現象と多極子秩序

PrV₂Al₂₀はスピン自由度を持たない立方晶Γ₃結晶場二重項基底状態を持ち、さらにT₀ = 0.75 K, 0.65 Kで2段階の多極子転移、T_c = 0.05 Kで重い電子超伝導といった現象を示し注目を集めている多極子近藤系の典型物質である[8, 9]。また電気抵抗の $-\ln T$ 依存性や光電子分光による近藤共鳴ピークなど明確なcf混成効果を示す。本物質において、高磁場四極子秩序相(B // [100])で30%を超える異方的磁気抵抗効果(AMR)が現れることを明らかにした[9]。これは四極子という局在多極子が遍歴したことによる新現象の一つである。

さらに、PrV₂Al₂₀のT₀以上の高い温度では四極子近藤効果による非フェルミ液体的異常が観測されているが、理解は進んでいなかった。そこで新たに縦磁気抵抗率の測定を行ったところ、8 K以上の温度で負の磁気抵抗率を示し、同じ領域で四極子近藤効果の理論予測に従うことがわかった[10]。さらに低温では正の磁気抵抗率に転じ、四極子近藤スケールリングからも逸脱する。これはコヒーレンス効果など、理論計算で考慮されていない寄与が現れるためだと考えられる。

PrV₂Al₂₀の2段階転移T₀ = 0.75 K, 0.65 Kは純度の高いものほどシャープかつ高温になる本質的なものであることが知られているが、秩序パラメータの詳細はわかっていない。そこで格子歪みと直接カップルする磁歪を測定することで秩序相の解明を目的に研究を行った。その結果、磁場に線形に比例する成分の磁歪と、それに伴うヒステリシスを低磁場(B < ~2 T)で観測した[11]。これは強的な磁気八極子秩序が起きていると考えると自然に理解できる。実際、GL理論による計算で再現された[12]。今後の研究によりさらなる理解の進展が期待される。

3. パイロクロア酸化物R₂Ir₂O₇ (R = Pr, Nd)における強相関量子現象

金属絶縁体転移は強相関電子系の典型的な現象の一つである。我々は5d電子がクラスター八極子秩序を示すNd₂Ir₂O₇の磁気抵抗効果を測定することで、10 Tの外部磁場を[001]方向に印加した際、抵抗が600倍変化する金属絶縁体転移を示すことを見出した[13]。Nd₂Ir₂O₇のエネルギーギャップは50 meV程度であるため、10 T(~1 meV)程度の磁場で金属になることは驚きである。これは4fとの近藤カップリングにより5d伝導電子の八極子構造が、磁

場で融解することで、金属性を回復したと理解できる。

$\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は2重縮退した放物面形状の価電子帯と伝導帯がフェルミ準位上の1点で接するラッティンジャー半金属であり、格子歪み等の摂動により強相関トポロジカル相の出現が期待される[14]。我々は $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ のエピタキシャル薄膜作製に世界で初めて成功し、50 K以下で自発的ホール効果を示すことを明らかにした[15]。この起源は格子歪みによる空間反転対称性の破れとIrの磁気モーメントのall-in-all-out構造による時間反転対称性の破れによりワイル半金属相になっているためと考えられる。

4. 価数ゆらぎの量子臨界現象

$\beta\text{-YbAlB}_4$ はゼロ磁場で量子臨界現象・重い電子超伝導を示すことで知られている[16]。一方姉妹物質の $\alpha\text{-YbAlB}_4$ は低温で重いフェルミ液体である。我々は $\alpha\text{-YbAlB}_4$ にFeをドーピングすることで、 $\alpha\text{-YbAl}_{1-x}\text{Fe}_x\text{B}_4$ が $x_c = 1.4\%$ で価数のシャープなクロスオーバーと反強磁性の1次転移を伴う量子相転移を示すことを明らかにした(図2)[17]。また量子臨界性は渡部・三宅らによって提唱されている価数ゆらぎの理論予測[18]と一致しており、その起源は、価数の量子臨界現象であると考えられる。

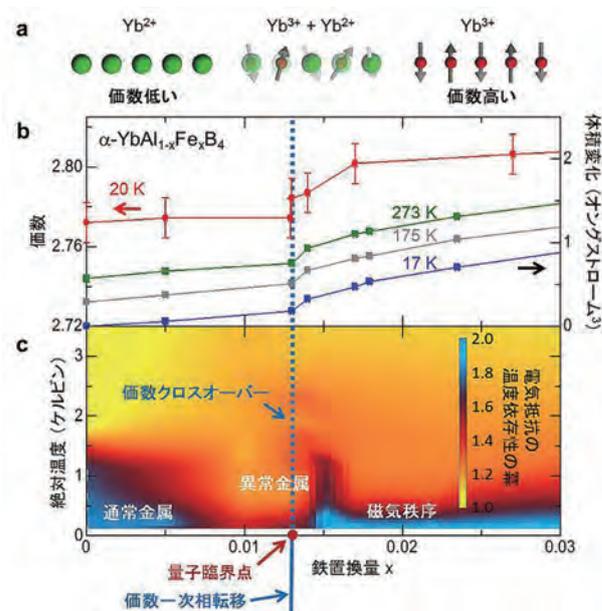


図2 $\alpha\text{-YbAl}_{1-x}\text{Fe}_x\text{B}_4$ の鉄置換量xに対するイッテルビウムイオンの状態と価数・体積・電気抵抗の変化。[17]

5. f電子スカーミオン物質EuPtSiの磁気転移

榊原グループにおいては、EuPtSiの磁気転移について、精密磁化測定から詳細に調べた。[111]方向の磁場下で0.5K以上の有限温度にのみ現れる中間相(A相)を発見し、これがその後の様々な実験からf電子化合物として初めてのスキルミオン相と特定された。また、4.0 Kにおけるヘリカル秩序が弱磁場下では1次転移になることを、詳細な磁化の磁場温度依存性から確定し、三重臨界点の存在を明らかにした(図3)[19]。この

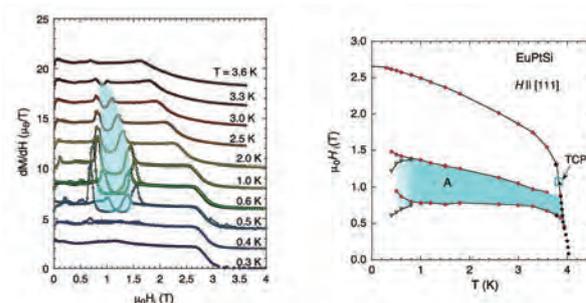


図3 カイラル磁性体EuPtSiの磁気相図を磁化測定から詳細に調べ、スキルミオン相と考えられるA相の安定性について多くの知見が得られた。[19]

1次転移は多成分を持つ秩序変数の揺らぎが大きい場合に期待されるもので、スキルミオン相のようなmulti- q の秩序を起しやすくと考えられる。さらにA相の異方性について調べ、ヘリカル相の磁化率が大きい方向ではヘリカル(またはコニカル)相が安定でA相が現れないことを示した。このことはヘリカル波数ベクトルが磁場によって容易に向きを変えないことを意味する。その理由はこれまでのスキルミオン物質と比較してEuPtSiの秩序波長が短いことにあり、格子の離散性を反映してヘリカルの波数ベクトルが格子に固定されると考えられる。

6. 価数揺動の量子臨界ダイナミクスの解明

小林グループでは、常圧力・無磁場下の異常金属状態から $T^* \sim 8\text{K}$ 以下で量子臨界性を示す $\beta\text{-YbAlB}_4$ [16]のYbイオンの電子状態を、元素選択的手法である ^{174}Yb 放射光メスバウアー分光法を用いて研究を行ってきた。放射光の特徴である、入射X線のパルス性と偏光特性を積極的に用いることで、Ybイオンの価数揺動ダイナミクスを実験的に観測することに初めて成功した。その結果、 $\beta\text{-YbAlB}_4$ の異常金属状態ではその価数揺動時間がナノ秒程度と極めて遅く、量子臨界性を示す $T < T^*$ 領域では温度の冪でさらに遅くなることが分かった。また、無反跳分率の温度依存性からその価数揺らぎと格子振動に強い結合が有ることが実験的に明らかとなった。この常圧下での結果は、基底状態がフェルミ液体である $\alpha\text{-YbAlB}_4$ とは大きく異なる [20]。一方、 $\beta\text{-YbAlB}_4$ の圧力印加により構造変化を伴わずに、基底状態がフェルミ液体的となる領域($1 < p < 2.5\text{GPa}$)では [21,22]、Ybイオンの超低速の価数揺らぎは抑えられ、本 ^{174}Yb メスバウアー分光法の測定分解能限界(0.1 ns)程度に早い価数揺らぎとなることが明らかとなった。

7. 超音波による多極子ダイナミクスの解明

中西グループでは、多重極モーメント、特に電気四重極モーメントと伝導電子との混成効果により形成される多体準粒子系の低エネルギー励起状態を超音波計測により明らかにしてきた。特筆事項として、局在性の強い4f電子系($\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$: $\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$)から遍歴性の強い3d電子系($\text{CoS}_{2-2x}\text{Se}_{2x}$)さらには4d電子系($\text{Rh}_{17}\text{S}_{12}$)、5d電子系($\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$)と系統的かつ包括的課題に取り組み、四重極モーメントが低温物性を強く支配し、重要な役割を担っている典型例として、歪み感受率(四重極感受率)を通じた弾性特性の研究を推進してきた。その結果、上記物質群における四重極モーメントと各種相転移、新規量子現象との関連を物質の弾性特性の観点から定量かつ定性的に明らかにし、その重要性を明示してきた。4f電子系($\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$)では四重極転移温度近傍で弾性率に関連した物理量に外部磁場を制御変数としたユニバーサルな振る舞いが見出され、 Γ_3 四重極モーメントの自由度に起因した新規電子状態の形成を提案した。[23-25] 3d電子系($\text{CoS}_{2-2x}\text{Se}_{2x}$)ではSをSeで置換することでフェルミ準位近傍の電子状態に大きな変化をもたらし、それに伴う強磁性転移温度の減少と e_g バンドの電子状態の変化、量子臨界性について変形ポテンシャル理論に基づいて記述した。[26] 4d電子系($\text{Rh}_{17}\text{S}_{12}$)では、Rhの4d電子がフェルミ準位近傍に急峻な状

態密度を有する状況が実現しており、フェルミ面の不安定性、遍歴4d電子の四重極モーメントの微視的な情報から、本系に出現する20%強の巨大弾性軟化の発現機構を明らかにした。さらに本系が金属であることから、4d遍歴四重極モーメント系の可能性を提案した。[27,28] 最後に、5d電子系の $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ では、その輸送現象、帯磁率にこれまで僅かな異常しか観測されなかった2つの相転移に関して、明瞭な異常を弾性率で初めて観測した。転移点近傍における特徴的な弾性特性の解析から、この2つの奇妙な構造相転移の駆動力として、増強されたスピン-軌道相互作用をもつReの5d電子から形成される四重極モーメントが極めて重要な役割を果たしていることを明らかにした。[29]

8. 磁気構造の多極子理論

鈴木グループは、中辻グループによって発見された Mn_3Sn と Mn_3Ge の反強磁性秩序下の巨大異常ホール効果の発現機構の研究に取り組み、その発現が強磁性構造と全く同じ対称性の破れを起こす反強磁性構造によって引き起こされていることを明らかにした[6]。さらに、その反強磁性構造が磁気八極子によって特徴づけられることを示し、第一原理計算による解析を併用することで、これらの反強磁性秩序による異常ホール効果が、強磁性磁化による異常ホール効果と同じように理解できることを示した[6]。この Mn_3Sn の第一原理計算による電子状態と物性の解析は、中辻グループとの共同研究によってフェルミ準位近傍におけるワイル点の存在や巨大異常ネルンスト効果、磁気光学カー効果の発見にも貢献し[3-5]、 Mn_3Sn のドメイン形成に対しては磁気八極子ドメインという新しい描像を打ち立てた[5]。

この磁気構造の多極子理論を拡張し、任意の結晶構造に対して点群に対する変換性と多極子によって分類される磁気構造を自動生成する理論手法を構築することで、磁気構造の多極子展開を定式化することに成功した[30]。また、この磁気構造の自動生成手法を、第一原理計算による安定磁気構造の予測による磁気構造データベースの構築に向けた研究や反強磁性秩序下の電子状態・物性現象の系統的研究[31]に活用している。

9. 多極子自由度を持つ物質群の中性子散乱研究

佐藤グループは、多極子自由度を持つ物質群の基底状態及び励起状態解明を目指した中性子散乱研究を行った。当初のゴールの一つに $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ ($T = \text{Ti}, \text{V}$)の基底状態多極子秩序の解明があった。 $T = \text{Ti}$ 系に関しては中性子非弾性散乱で結晶場分裂が決められていましたが、 $T = \text{V}$ 系に関してはそのような実験はなされていませんでした。そこで、佐藤グループは単結晶および多結晶試料を用いた中性子非弾性散乱を行いこの系の結晶場分裂決定を試みた。残念ながら強い混成効果のためか結晶場分裂は大きくブロードニングしており非弾性散乱スペクトルだけでは結晶場準位決定が難しいことが判明した。

他方、 $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ 系のX線精密構造解析も行った[32]。構造解析の結果から熱振動に籠状物質特有と思われる興味

深いパターンが見られた。また、得られた精密構造パラメータとすでに知られている $T = \text{Ti}$ 系の結晶場パラメータから $T = \text{V}$ 系の結晶場分裂の推測も行うことができた。これらの結果を併用することで、 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の中性子非弾性散乱解析が近日中に完成するものと期待している。

関連する研究として、磁気スキルミオン[33]、フラストレート系のエネルギーランドスケープ[34]、さらには正二十面体クラスター結晶中の磁気秩序の研究[35]等を行った。この中で正二十面体クラスター上に確認された渦巻き型磁気秩序はクラスター多極子の概念で整理できるものであり、今後の発展に興味を持たれる。

10. 準結晶超伝導の理論研究

有田グループは磁場下の準結晶における超伝導を調べるため、ペンローズ格子上的引力ハバード模型における超伝導の相図の計算を行った。その結果、電荷、磁化についてペンローズ格子特有の縞模様が現れると同時に、その構造と整合する実空間構造をもつ超伝導状態が現れることがわかった(図4)[36]。これは周期系におけるFulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov状態に類似するもので、大変興味深い。この成果はPhysics誌でもとりあげられた。

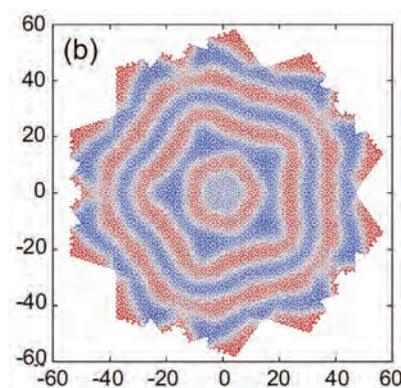


図4 ペンローズ格子上的引力ハバード模型の超伝導ギャップの空間依存性 [36]

11. まとめ

領域内及び他領域との緊密な連携によって大きな進展が得られた5年間であったと思う。原子に局在した多極子の多彩な遍歴現象だけでなく、クラスター多極子という新しい概念の創出とそれによる新しい現象の発見はスピントロニクスを始め様々な分野へ波及効果をもたらした。その意味で、次の飛躍への重要な一歩を踏み出したところというのが率直な印象である。

謝辞

A01の研究推進にあたり、代表の播磨先生、事務の網塚先生初め本領域の皆様方には、本当にお世話になりました。ここで、改めてお礼申し上げます。また、他の領域、例えば、大谷先生が代表を務める「ナノスピントロニクス」との交流から多くの実りがあったと思います。感謝申し上げます。最後に、本執筆にあたり、東北大学多元物質科学研究所の奥山大輔氏、東京大学物性研究所の酒井明人氏、肥後友也氏、富田崇氏、大槻匠氏にご協力いただきました。ありがとうございました。

- [1] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, *Nature* **527**, 212 (2015).
- [2] N. Kiyohara, T. Tomita, S. Nakatsuji, P. R. Applied **5**, 064009 (2017).
- [3] K. Kuroda, T. Tomita *et al.*, *Nat. Mater.* **16**, 1090 (2017).
- [4] M. Ikhlas, T. Tomita *et al.*, *Nat. Phys.* **13**, 1085 (2017).
- [5] T. Higo, *et al.*, *Nature Photonics* **12**, 73-78 (2018).
- [6] M.-T. Suzuki *et al.*, *Phys. Rev. B* **95**, 094406 (2017).
- [7] A. Sakai *et al.*, *Nature Physics* **14**, 1119–1124 (2018).
- [8] A. Sakai and S. Nakatsuji, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 063701 (2011).
- [9] M. Tsujimoto *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 267001 (2014).
- [9] Y. Shimura *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 256601 (2019).
- [10] M. Fu *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 013704 (2020).
- [11] A. Sakai, presentation at “Frustration, Orbital Fluctuations, and Topology in Kondo Lattices and their Relatives” in Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems.
- [12] A. S. Patri *et al.*, *Nat. Commun.* **10**, 4092 (2019).
- [13] Z. Tian *et al.*, *Nat. Phys.* **12**, 134-138 (2016).
- [14] T. Kondo *et al.*, *Nat. Commun.* **6**, 10042 (2015).
- [15] T. Ohtsuki *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **116**, 8803 (2019).
- [16] Y. Matsumoto *et al.*, *Science* **331**, 316 (2011)
- [17] K. Kuga, Y. Matsumoto *et al.*, *Sci. Adv.* **4**, eaao3547 (2018).
- [18] S. Watanabe and K. Miyake, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 186403 (2010).
- [19] T. Sakakibara *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 093701 (2019).
- [20] M. Oura *et al.*, *Physica B* **536**, 162 (2018)
- [21] Y. Sakaguchi *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 023602 (2016)
- [22] T. Tomita *et al.*, *Science* **349**, 506 (2015).
- [23] 谷口正弥 他、日本物理学会2018年秋季大会、12aB202-3 (2018).
- [24] Y. Nakanishi *et al.*, *Physica B* **536**, 125 (2015).
- [25] 川崎優介 他、日本物理学会2019年秋季大会、12aPS-6 (2019).
- [26] S. Kudo *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* (in press).
- [27] 今井丈 他、日本物理学会第74回年次大会、14pS305-6 (2019).
- [28] R. Murakami *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* (in press).
- [29] 中村一翔 他、日本物理学会第74回年次大会、15aS-PS-74 (2019).
- [30] M.-T. Suzuki *et al.*, *Phys. Rev. B* **99**, 174407 (2019).
- [31] V. T. N. Huyen, M.-T. Suzuki *et al.*, *Phys. Rev. B* **100**, 094426 (2019).
- [32] D. Okuyama *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 015001 (2019)
- [33] S. Aji *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **3**, 104408 (2019); K. Makino *et al.*, *Phys. Rev. B* **95**, 134412 (2017).
- [34] A. Samarakoon *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 12053 (2017); A. Samarakoon *et al.*, *PNAS* **113**, 11806 (2016).
- [35] T. J. Sato *et al.*, *Phys. Rev. B* **100**, 054417 (2019).
- [36] Shiro Sakai and Ryotaro Arita, *Phys. Rev. Research* **1**, 022002(R).



B01 計画研究のまとめ

青木 大

東北大・金研・教授

石田 憲二 京大・理・教授	神戸 振作 原子力機構・先端研・ 研究主席	井澤 公一 阪大・基礎工・教授	松田 達磨 首都大・准教授	柳瀬 陽一 京大・理・教授
------------------	-----------------------------	--------------------	------------------	------------------

B01計画研究(課題名:遍歴多極子による新奇量子伝導相)では、多極子が遍歴性を獲得して引き起こす多彩な伝導現象や量子相の解明を目的として研究を行ってきた。局在と遍歴の中間的な性質を持ち、強いスピン軌道結合を持つ $5f$ 電子系化合物(アクチノイド化合物)を中心とした研究であるが、それ以外の系においても他の計画研究や公募研究班と共同で幅広い研究を行ってきた。

強磁性超伝導、フェルミ面、新奇スピン三重項超伝導体 UTe_2 (青木)

強磁性超伝導体 $URhGe$ 、 $UCoGe$ の純良単結晶を育成し、磁場再突入型あるいは磁場強化型超伝導の発現機構に迫る研究を行った。 $URhGe$ 、 $UCoGe$ ともに強磁場中で、リフシツツ転移によるフェルミ面の変化をシュブニコフ・ドハース効果、熱電能、ホール効果などの測定から明らかにした。平行スピン対によるスピン三重項超伝導が実現している $URhGe$ 、 $UCoGe$ においては、ある特定の方向に磁場を加えた時に強磁性ゆらぎが発達する。これが、磁場強化型超伝導発現の最も重要な役割を果たしていると考えられる。一方、それ以外にもフェルミ面の変化も磁場強化型超伝導の実現に一役買っていることがわかってきた。 $URhGe$ については、一軸圧力による強磁性ゆらぎと磁場誘起超伝導のチューニングにも成功した。

2018年11月末に発見された新奇スピン三重項超伝導体 UTe_2 については、日仏間の国際協力のもと純良単結晶育成、極低温、強磁場、圧力実験などを精力的に進めた。2019年の一年間に出版された我々の論文はすでに11編を数えている。このうち、 $H_m=35$ Tで発現するメタ磁性と H_m 以下の高磁場で実現している磁場誘起超伝導は、顕著な成果の一つである。他にも、 UBe_{13} の高圧下の実験や UNi_2Al_3 の80 Tで発現するメタ磁性、空間反転対称性の破れた $U_3Ni_3Sn_4$ の重い準粒子を含んだフェルミ面とその分裂、 $Ir-5d$ バンドによる高い H_{c2} を持つ超伝導体 $CeIr_3$ などの研究も行ってきた。

強磁性超伝導体および関連物質の超伝導波動関数の対称性(石田)

様々なウラン化合物の超伝導体のNMR測定を行い、超伝導状態のナイトシフトの振舞いと超伝導上部臨界磁場(H_{c2})の振舞いを系統的に調べた。通常 s 波超伝導と考えられる U_6Co では、超伝導によるナイトシフトの減少は非常に小さい。これは超伝導に関係するスピン磁化率が小さいためであり、 H_{c2} にパウリ対破壊効果が見られないこととコンシステントである。これに対しスピン一重項超伝導体 UPd_2Al_3 、 URu_2Si_2 では、超伝導状態でナイトシフトの明確な減少が見られる。減少量は比熱から見積もられるスピン磁化率の大きさと同程度であり、この場合 H_{c2} にもパウリ対破壊効果も観測される。これに対し、 $UCoGe$ の圧力誘起常磁性超伝導状態や最近発見された UTe_2 では、超

伝導状態でナイトシフトの減少は見られるものの減少量は比熱から見積もられるスピン磁化率の大きさに比べ非常に小さい。また H_2 に明確なパウリ対破壊効果が観測されず、スピン三重項超伝導の振舞いと考えられる。

UCoGeではa軸方向に磁場を加えた場合、超伝導は単調に減少していきただけであるが、b軸に印加した場合は、超伝導は増大する。印加磁場に対して超伝導のレスポンスが大きく異なるのは、スピン磁化率の異方性に関係することを各軸方向のナイトシフトの精密測定から指摘した。つまりスピン磁化率の大きさはc軸 > b軸 > a軸~0であり、a軸方向に磁場を印加しても変化が小さいのは、この方向のスピン成分が小さいことに関係していることを指摘した。

UCoGeは加圧により強磁性秩序は消失し超伝導のみを示すようになる。強磁性秩序が消えた圧力領域の磁気状態と超伝導状態を核四重極共鳴より調べた。強磁性秩序が消えた $P = 0.67$ GPaでは超伝導直上での強磁性ゆらぎが強まり、超伝導転移温度も上昇している。また超伝導転移以下の超伝導相では $1/T_1$ は急激に減少しているが、強磁性と共存している超伝導状態の時に見られた非超伝導成分の $1/T_1$ は見られなかった。この結果は、(1)バルク超伝導は強磁性秩序が消えたのちも生き残ること、(2)イジング強磁性ゆらぎが超伝導の引力であるというシナリオをより確かにする実験結果であること、(3) 強磁性秩序と共存する超伝導で見られた非超伝導の $1/T_1$ の成分は強磁性相の存在と関係した成分であり、「自己誘導渦糸状態」の存在を支持する結果であること、を示唆する。

最近発見された UTe_2 の ^{125}Te -NMRを行い、非従来超伝導と分類され上述のナイトシフト測定からスピン三重項を示唆する振る舞いが見られた。

URu₂Si₂のハイブリッド多極子(神戸)

URu₂Si₂において17 Kで起きる、いわゆる“隠れた秩序”の対称性を決定するため、SiとRuサイトの詳細なNMR/NQRの研究を行い、隠れた秩序状態でU、RuとSiサイトの4回対称性が保存されていることを結論した。隠れた秩序転移は2次相転移なので、Landauの2次相転移に対する群論的考察が適用できる。ここで隠れた秩序状態に対して1)時間反転対称性は破れない。2)秩序波数は(001)。3)U、RuとSiサイトに双極子モーメントはない。と仮定すると、隠れた秩序の対称性は $P4/nnc$ と結論される。 $P4/nnc$ の秩序は、ランク5の反強電氣的奇パリティ秩序に対応する。この時、Uサイトは D_4 の対称性を持ち、その全対称表現は D_{4h} の A_{1u} 基底: $xyz(x^2-y^2)$ に対応する。この状態はU5f軌道だけでは構成できず、U6d軌道の寄与が必要である。従って、いわゆるハイブリッド多極子になっている。ハイブリッド多極子の検証は今後の課題である。ハイブリッド多極子秩序が検証されれば、今後、多極子探索の領域は大きく拡大し、多極子物理の新たな地平が開かれると期待できる。

U_{1-x}Th_xBe₁₃およびUTe₂の熱輸送現象による超伝導の対称性(井澤)

U_{1-x}Th_xBe₁₃およびUTe₂の熱輸送係数の実験を行ってきた。U_{0.96}Th_{0.04}Be₁₃において熱伝導率に2つの異常を観測

した。これは、比熱で見られる2段転移と対応しているものと考えられる。さらに $U_{0.96}Th_{0.04}Be_{13}$ の熱ホール係数が超伝導転移温度 T_c よりも十分低温で発散的に増大することを見出した。これは、時間反転対称性の破れに由来した振る舞い、あるいは非従来型超伝導体の特長の可能性がある。実際、最近の準古典理論による計算において、非従来型超伝導の場合に熱ホール係数増大が見られることが明らかになっている。同様の振る舞いは、 UPt_3 においても見られている。

UTe_2 の熱伝導率を測定した結果、超伝導転移温度以下で熱伝導率が増加することが明らかになった。これは超伝導転移に伴い熱キャリアの平均自由行程が増加したことによるものと考えられる。さらに温度を下げると熱伝導率はブロードな極大を示した後、熱キャリア数の減少に伴い熱伝導率は減少に転じる。そして $T = 0$ Kの極限で熱伝導率に常伝導状態の15%程度の残留項が存在することが分かった。この残留項の値は、比熱で見られるものよりも小さい。磁場を印加すると、熱伝導に見られた T_c 以下の増大は抑制されるとともに十分低温($T < T_c$)での熱伝導率は磁場とともに緩やかに増加する。このことから緩やかではあるが磁場による準粒子励起が存在することが分かった。これは超伝導ギャップにポイントノードが存在することを示唆している。

Sm強相関系における多極子・価数自由度、ウランを含む BiS_2 系およびYb化合物の超伝導 (松田)

Sm化合物においては、さまざまな自由度が複雑に関係し、 f 電子の持つ多極子自由度と遍歴性が関わる現象が期待できる。それらの典型的現象と考えられる $SmTa_2Al_{20}$ や $SmOs_4Sb_{12}$ の「磁場に鈍感な秩序状態及び重い電子状態」を研究した。我々はこの物性異常の特徴を輸送特性から明らかにすると同時に、Sm系全体として普遍的に捉えるために立方晶系の化合物を中心に物性の整理を行い、Smの価数(X線吸収実験より決定)と電子比熱係数の関係にみられる特徴を見出した。

BiS_2 系の単結晶を用いた精密な低温物性研究をD01計画研究と協力しながら行った。その結果、 $LaOBiS_2$ 系における、結晶構造の低対称化、及びF置換系におけるCDW的転移の存在を明らかにすることに成功した。また、磁性希土類元素を含む系では、これまでの金属系にはない、新たな強相関電子物性が低温において発現することを明らかにした。アクチノイド元素を含む BiS_2 系化合物 $La_{1-x}U_xOBiS_2$ の結晶育成にも取り組み、 $x = 0.3$ において $T_{sc} =$ 約3 Kのバルクの超伝導状態を示すことを発見した。

Yb系強相関電子系及び超伝導物質の開発をすすめ、ごく最近 $YbOs_4Sb_{12}$ 及び $YbTr_2Al_{20}$ (Tr : Mo and Ta)において超伝導状態が発現することを初めて発見し、現在報告論文をまとめている段階である。その他にも3-4-13及び5-6-18系の結晶構造の決定及び超伝導相を発見した。

トポロジカル超伝導、多極子秩序の理論 (柳瀬)

局所的な空間反転対称性が欠如した系の超伝導がトポロジカル結晶超伝導相であることを示した。また、4層

CeCoIn₅/YbCoIn₅超格子においてトポロジカル結晶超伝導が電子相関により破綻することを示した。

UPt₃の非共型超伝導を記述するモデルを構築し、B相が新奇なワイル超伝導であることを示した。また、非共型空間群に守られたラインノードのメカニズムを示した。UPt₃のA相およびUCoGeがそれぞれZ₂, Z₄メビウス型トポロジカル超伝導であることを明らかにした。UTe₂においてクーロン相互作用由来の絶縁体金属転移が起こることをGGA+U計算により示した。トポロジカル超伝導の可能性を示し、磁場中の多重相図を提案した。対称性とトポロジーにより超伝導ギャップ構造を包括的に分類し、UTe₂, UPt₃, UBe₁₃, SrPtAs, MoS₂などのギャップ構造を示した。

奇パリティ磁気多極子秩序の例として、BaMn₂As₂における磁気16極子相を同定し、特徴的な電磁応答を計算した。2層ラシュバ系で電気八極子秩序が起こるメカニズムを示し、例としてSr₃Ru₂O₇と銅酸化物高温超伝導体を提案した。

各結晶系における電気及び磁気の高極子秩序を群論的に分類した。実例として100を超える奇パリティ多極子物質を示した。それらにおける創発電磁応答を高極子表現論により予言した。予言された磁気圧電効果を、公募班の塩見雄毅氏と協力して世界で初めて実証した。また、電流によりドメイン操作が可能な反強磁性体を分類し、その物質群を示した。

結晶中における磁気四極子・単極子・トロイダル双極子モーメントを定式化することに成功した。これまでの理論はゲージに依存していたが、局所熱力学を用いることでゲージ不変な表式を得た。その結果により電気磁気効果と重力電気磁気効果を定式化した。

奇パリティ磁気多極子状態でFFLO超伝導が安定になることを示した。また、Sr₂IrO₄を超伝導化することでFFLO相が実現することを予言した。さらに、奇パリティ磁気多極子揺らぎによりトポロジカルスピン三重項超伝導が起こることを示した。

SrTiO₃における「強誘電超伝導」を示した。また、超伝導状態で磁場が強誘電的秩序を誘起する「超伝導マルチフェロイクス」を提案した。



C01 計画研究 まとめ

網塚 浩

北海道大学 大学院理学研究院 教授

<p>藤 秀樹 神戸大学 大学院 理学研究科 教授</p>	<p>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</p>	<p>高阪 勇輔 大阪府立大学 工学研究科 助教</p>	<p>楠瀬 博明 明治大学 理工学部 教授</p>	<p>御領 潤 弘前大学 大学院 理工学研究科 教授</p>
--	---	---	--	---

はじめに

研究計画C01では、複数の原子サイトにまたがって構成される「拡張された多極子(Augmented Multipole)」による秩序状態とダイナミクスを実験・理論の両面から解明し、新たな物質機能を開拓することを目標とした。この5年の間に理論の整備が大きく進展し、数々の理論予想が提唱され、それらを基に様々な実験が展開された。拡張多極子研究の展開は結果としてC01内に留まらず全ての研究項目を巻き込み、領域メンバー間に様々な連携を生み出して進行し、領域活動の終了後も更に発展する兆しを見せている。ここでは、計画研究各メンバーの研究活動のまとめを報告する。

拡張多極子系における電流磁気応答の観測(網塚)

まず、磁気トロイダル双極子が強的に秩序し、奇パリティ拡張多極子系の典型例と目されるUNi₄Bについて研究を進めた。領域発足時、既に本物質が理論の予想通り、磁気トロイダル双極子に垂直に電流を流すと一様磁化が生じる性質を持つことを確認していた。しかし、平行方向の電流に対しても磁化が誘起され、理論とは単純には一致しないこともわかってきた。活動期間の前半は、この実験結果の再現性の確認に多くの労を費やした。結果、理論モデルとは異なる事情が現実の系にはあるとの確証を得るに至り[1]、後半はその原因を探る研究を進めた。

理論と実験の相違の原因としては、(i)電気抵抗の異方性により試料内の電流パスが平行から逸れる、(ii)結晶もしくは磁気構造の対称性が想定されたものより低い、の二つの可能性が考えられた。その後の実験やシミュレーションにより(i)の可能性は否定された。一方、(ii)を確認するために着手した共鳴X線散乱実験においては、過去の中性子散乱実験では報告されていない2種類の回折強度の温度依存性を見出した。現時点では、結晶構造が直方晶Cmcmかそれ以下の対称性を持つこと(後述のNMR実験とも整合)、磁気構造が単純な渦状構造とは異なることまでは結論できるが、対称性の同定には更に注意深い研究が必要である。

次にUNi₄Bの対照実験として2つの反強磁性体CeRh₂Si₂およびCeRu₂Al₁₀に着目した。いずれの系も結晶・磁気構造はグローバルな空間反転対称性を保持している。よって実験の目的は、これらの系を用いて電流磁気応答のない例を示すことにあった。しかし、予想に反していずれの系でも電流誘起磁化異常が観測された。特にCeRh₂Si₂では2種類ある反強磁性相のうち一方においてのみ観測された。温度の違いのみで異常の有無が生じたことは、測定が正しく行われていることを保証すると同時に、電流誘起磁化が磁気構造の変化に対応して生じていることを示している。

以上の研究を通じ、反強磁性体金属において確かに電流磁気応答が生じることが実証された。しかし、いずれの

場合も既知の結晶・磁気構造では禁制となる電流－磁化配置においても磁化誘起が観測され、構造を再評価する必要が生じている。見方を変えるとこのことは、電流下磁化測定が系の隠れた空間反転対称性の破れを敏感に検知する手法になり得ることを示唆する。この方向性の追究と、引き続き奇パリティ拡張多極子のモデル物質を開拓する研究を更に進めている。

NMRを用いた拡張多極子系の磁性・超伝導の観測 (藤)

微視的プローブである核磁気共鳴 (NMR) の特徴を生かし、局所的空間反転対称性が破れた系で生じる新奇現象と電流磁気効果について研究を行った。

(1) 局所空間反転対称性の破れと磁性

UNi₄B単結晶のNMR実験から超微細結合定数の異方性を明らかにした[2]。さらに、角度分解¹¹B-NMR実験から複数の四重極分裂によるサテライト信号を検出し、この物質の結晶構造が直方晶で少なくともCmcmもしくはその部分群で説明できることを示した(図1)。また、NMRスペクトル線幅が磁気秩序状態では広がることを観測し、直方晶bc面内(六方晶面内)の渦状磁気構造と矛盾しないことを明らかにした。さらにパルス電流をa軸方向に印加すると、磁気秩序に伴いNMRサテライトピークがシフトすることを見いだした。これは理論が予想する電流印加によるトロイダル秩序の安定化を示唆する結果と考えられる[3]。

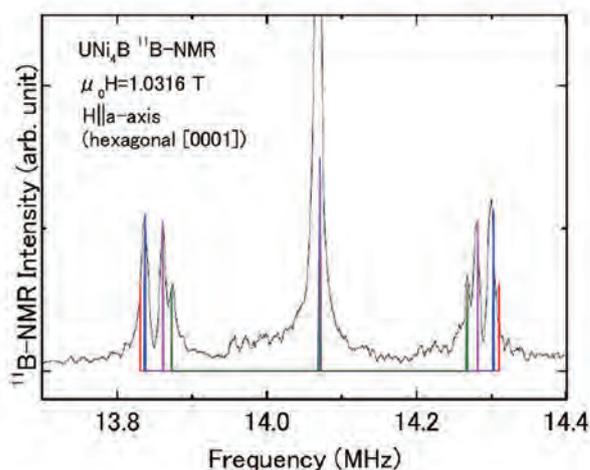


図1: UNi₄B単結晶の直方晶a軸(六方晶[0001])に磁場を印加した場合のNMRスペクトル。サテライト信号が3本であることは、結晶構造が六方晶ではなく直方晶である証拠となる[3]。

この他にも、局所空間反転対称性が破れた磁性体としてCePd₂Ga ($T_N = 3.3$ Kの反強磁性体)およびYbRhSb ($T_C = 2.7$ Kの弱強磁性体)を調べた。いずれも単結晶作製に成功し、前者ではGa-NMRから四重極相互作用定数を決定[4]、後者ではSb-NMRから四重極秩序変数を決定した[5]。

(2) 局所空間反転対称性の破れと超伝導

CaBe₂Ge₂型の準二次元結晶構造を持つ2つの物質LaPt₂Si₂(CDWと超伝導の共存系)およびLaPd₂Al₂(構造相転移と超伝導の共存系)に着目し、局所空間反転対称性の破れと超伝導の関係性を調べた。LaPt₂Si₂単結晶のPt-NMRから、CaBe₂Ge₂構造に特徴的な2種類のPtサイトに起源を持つ共鳴線の存在を明らかにし(図2)、詳細な解析からCDWと超伝導に寄与するPtサイトおよび混成バンドを明らかにした[6]。また、LaPd₂Al₂においても2種類のAlサイトの存在を明らかにする一方、Alサイトの電子状態は構造転移によりほとんど影響を受けないことを明ら

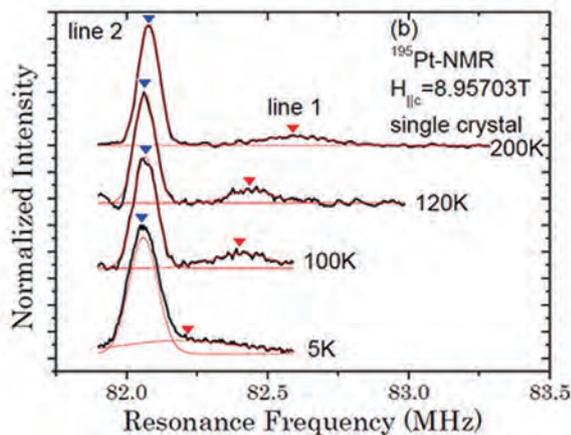


図2: LaPt₂Si₂のPt-NMR信号。結晶構造を反映し、2種類のPt信号が観測された [6]。

放射光を用いた拡張多極子の秩序状態の観測 (中尾)

放射光を駆使し、拡張多極子の秩序状態の解明を以下のように進めた。

(1) 複数磁気サイトで形成されるトポロジカルな磁気テクスチャであるスキルミオンやカイラルソリトン状態の観測を、共鳴X線散乱を用いて推進した。中でも、B01で創出された4f電子系のスキルミオン状態の候補物質であったEuPtSiに、共鳴X線散乱による研究を行った結果、磁場誘起相がスキルミオン格子相と期待できるtriple-Qの磁気秩序相であることを解明した(図3) [9]。さらに、磁気テクスチャのスローなダイナミクスの観測手法と期待されるコヒーレント回折イメージングの手法開発を進め、カイラルソリトン格子のイメージングに成功した[10]。

(2) 拡張多極子状態は、原子が複数サイト存在することで初めて出現するものであり、原子間の軌道混成が重要な役割を担っていると言える。そこで共鳴X線散乱手法を用いることで、物性を直接的に担っている金属イオンと、それに配位した原子の電子状態をそれぞれ観測し、軌道混成状態の観測を試みた。その結果、マンガン系人工超格子では、Mn 3dと配位した原子であるO 2pの電子状態を観測することで、系の伝導特性に対応した軌道混成状態の空間的な変調構造の観測に成功した[11]。またスクッテルナイト系でも、f電子と配位した原子との軌道混成状態は、p-f混成と呼ばれ、物性を支配している1つの重要なパラメータとなっている。そこで共鳴X線散乱をPrRu₄P₁₂に適用したところ、相転移に伴いp-f混成状態が

かにした[7]。

また、古くから知られるUPt₃の超伝導状態についても研究を進めた。本物質は当初報告された六方晶構造からPt位置がずれた三方晶構造にあり、Uサイトの空間反転対称性が局所的に破れている。NMRナイトシフトの詳細な解析から、重い電子状態は非クラマース基底に起源を持つ状態であり、秩序変数は弱いスピン軌道相互作用でのE_g対称性をもつスピン三重項超伝導状態であることを明らかにした [8]。

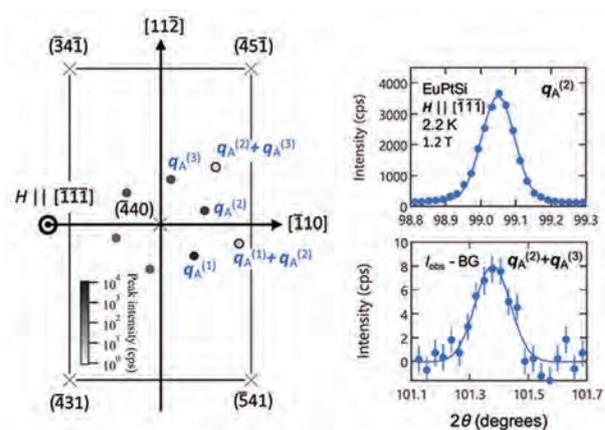


図3: EuPtSiの磁場誘起相で観測された(-4, 0)逆格子点周りの回折パターンの模式図(左)と衛星反射のピークプロファイル(右) [9]。

2つのサイトで大きく異なっていることを見出した [12]。このように本手法を用いることで、強相関電子系の軌道混成が支配する様々な物性を理解する上で重要な情報が得られることを示すことができた。

(3) A01の研究から拡張磁気八極子が起源となる巨大異常ホール効果や巨大異常ネルンスト効果などが、 Mn_3Sn において発見され注目されている。そこで、 $\mathbf{Q} = 0$ での共鳴X線散乱と言えるX線磁気円二色性(XMCD)の手法を本系に適用したところ、拡張磁気八極子を反映していると期待されるXMCD信号の観測に成功した[13]。さらに、XMCD理論を再考することにより観測された信号が拡張磁気八極子を反映していることが明らかとなった[14]。この結果は、これまで難しかった高次多極子状態の観測の可能性を広げるものであり、重要な結果と言える。

研究期間中には博士研究員として、田端 千紘氏(2016年4月~2018年10月、2018年11月より京都大学複合原子力科学研究所助教)を雇用し、共同で研究を行った。

キラリティを制御した不斉結晶育成手法の開拓(高阪)

本研究の目的は、無機キラル化合物の結晶構造のキラリティを制御出来る新規不斉育成手法を開発し、キラル磁性体の磁気秩序の核心となるDzyaloshinskii-Moriya (DM)相互作用を起源とした新規キラル物性の観測を行うことである。結晶構造のキラリティ制御が困難であることが、キラル磁性体研究における最大の障害となっている。そこで、以下3つの戦略に沿って研究を行った。

(1) 無機キラル化合物の不斉結晶育成手法の確立

通常の合成手法ではラセミ双晶を形成する水溶性キラル化合物において溶媒を攪拌しながら結晶育成を行う攪拌法を考案した。具体的には、無機キラル磁性体 CsCuCl_3 (空間群: $P6_122$ or $P6_522$)において、図4に示すようなcmオーダーの結晶キラリティを完全に単一にした不斉単結晶を得ることに成功した[15]。

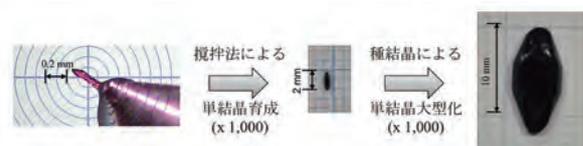


図4: キラル磁性体 CsCuCl_3 の不斉単結晶育成。

また、レーザー式浮遊帯域(FZ)法により、無機キラル磁性体 TSi (空間群: $P2_13$, T: 遷移金属元素)及び TSi_2 (空間群: $P6_222$ or $P6_422$)の大型不斉単結晶育成に成功した。

(2) キラル磁性体で発現する磁気構造の観測

CsCuCl_3 はらせん磁性体として認識されていたが、本物質の結晶キラリティがDM相互作用を通じてらせん磁気構造のヘリシティと結合するか否かは長年議論の対称とされてきた。攪拌法で得られた CsCuCl_3 の不斉単結晶試料で偏極中性子回折測定を行うことにより、本物質の結晶キラリティがらせん磁気構造のヘリシティと結合し、本物質がキラルらせん磁気秩序を形成することを実験的に明らかとした[15]。また、本物質で高圧下及び強磁場下の磁化測定を実施し、圧力誘起の1/3プラトーの観測に成功し、本物質においてup-up-downのスピンの構造を形成するこ

とを明らかとした[16]。

(3) 不斉キラル磁性結晶で発現するキラル物性の観測

キラル磁性体で観測される磁気キラル二色性 (MChD) や電気磁気キラル (eMCh) 効果といった非相反効果は、ラセミ双晶結晶の場合、左右両方の結晶ドメインが存在することによりその効果が相殺されてしまう為、不斉単結晶による測定が大前提となる。不斉単結晶の育成が可能となったことにより、CsCuCl₃において磁気キラル二色性 (MChD) [17]、CrNb₃S₆において電気磁気キラル (eMCh) 効果[18] の観測に成功した。

拡張多極子の基礎理論の整備(楠瀬)

我々は、結晶中の電子がもつ任意の自由度を表現できる拡張多極子理論の整備を行ってきた。多極子には時間反転と空間反転の偶奇性の組み合わせの異なる4種があり、良く知られた電気と磁気の高極子の他に電気・磁気トロイダル多極子が存在する(図5)。これら4種の量子力学的演算子表現を導出[19]し、32結晶点群に基づいて拡張多極子とそれに関する交差相関応答を分類[20]した(図6)。

これらの理論的枠組みを用いて、磁気トロイダル双極子秩序による電流磁気応答 (UNi₄B) [21]や非相反マグノン (α -Cu₂V₂O₇) [22]、Cd₂Ru₂O₇の電気トロイダル四極子秩序(図3) [23] 等の提唱を行った。また、多軌道ハニカムハバード模型に対して、可能な多極子秩序を分析[24]し、特異な光学選択則を導出[25]した。

一方、副格子にまたがるクラスター多極子の考え方を応用し、結晶点群の既約表現で分類された磁気構造基底を生成するアルゴリズムを考案した[26]。非共線磁気構造を含む任意の磁気構造を基底分解できることから、密度汎関数法による複雑な磁気秩序の探索安定性が大幅に向上した。

タイプ	記号	空間反転	時間反転	単極子	双極子	四極子	八極子
E	Q_{lm}	$(-1)^l$ 極性	+	(+,+)			
M	M_{lm}	$(-1)^{l+1}$ 軸性	-	(-,-)			
MT	T_{lm}	$(-1)^l$ 極性	-	(+,-)			
ET	G_{lm}	$(-1)^{l+1}$ 軸性	+	(-,+)			

図5: 4種の多極子

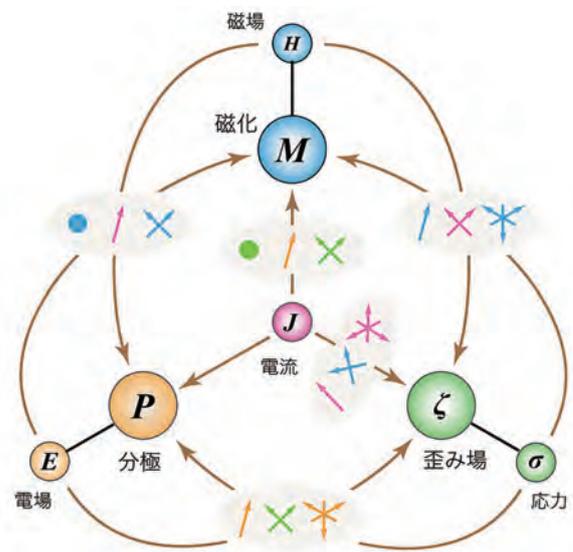


図6: 多極子と交差相関の関係

さらに、スピン軌道相互作用によらないバンドの非対称スピン分裂や多様な交差相関応答の新しい機構を提唱し、副格子ホッピング変調を表すボンド多極子とクラスター多極子による解釈を与えた：(1) 共線反強磁性秩序による対称スピン分裂の機構 [27]、(2) 三角形のユニットをもつ結晶構造における120°反強磁性秩序による反対称スピン分裂の機構[28]。この機構により、有機反強磁性体を用いたスピン流生成の実現可能性を指摘した[29]。

研究期間中には博士研究員として、柳 有起氏 (2016年4月～2018年11月。2018年12月より東北大学金属材料研究所助教) を雇用し、共同で研究を行った。

局所空間反転対称性の破れた系における超伝導 (御領)

我々は主に、D01野原らにより発見された空間反転対称性を局所的に破る蜂の巣ネットワーク超伝導体 SrPtAs に関する理論的考察を行った。 μ SR実験では転移温度以下において内部自発磁場が観測されている。この結果と群論的考察[30]、および繰り込み群的手法を用いた理論計算を照らし合わせると、 $d_{x^2-y^2} + id_{xy}$ 型のカイラルd-波対が形成されている可能性が高い。カイラルd-波状態は時間反転対称性を破るトポロジカルな超伝導状態であり、 $d_{xz} + id_{yz}$ 型と $d_{x^2-y^2} + id_{xy}$ 型 2つのタイプが存在するが、後者はこれまで発見されておらず、SrPtAs が初めての $d_{x^2-y^2} + id_{xy}$ -波超伝導体となる可能性が高い。ところが核磁気緩和率 T_1^{-1} は T_c 直下での大きなヘーベル・スリッターピークと低温での熱活性的減衰を示し、また超流動密度 n_s も低温で熱活性的な温度依存性を見せるなど、単一バンドモデルではs-波状態を仮定しない限り説明できない実験結果が得られている。そこで我々は SrPtAs の多バンド構造を考慮に入れ計算を行った[31]。その結果、 $d_{x^2-y^2} + id_{xy}$ -波状態を仮定した場合でも、実験で観測された T_1^{-1} や n_s の振る舞いを説明できることを示した。よって、 $d_{x^2-y^2} + id_{xy}$ -波状態はこれまで行われたうちでは全ての実験と矛盾しない唯一の状態ということになり、現象論的観点からすれば、最も実現している可能性が高い状態と結論される。

また我々は、局所空間反転対称性の破れによる内因性スピン軌道相互作用と、カイラルd-波ペアリングの両方を起源として、試料表面に自発スピン分極が生じることを示した[32]。カイラルd-波状態はカイラル表面状態をトポロジカルにサポートするが、スピン軌道相互作用が表面状態のスペクトルにスピン分裂を引き起こすため、スピン分極が生じる。これは表面自発スピン分極の新たな機構といえる。このことから、渦糸の芯においてもスピン分極が発生することが期待される。このような渦糸のフラックス・フローを考えると、誘起電場に対して垂直方向にスピンの輸送されるため、新たな機構によるスピンホール効果が起こることとなる。

研究期間中には博士研究員として、飛田 豊氏 (2016年4月～2018年3月。2018年4月より北海道科学大学講師) と植木 輝氏 (2018年4月～2020年3月。2020年4月よりノース・ウエスタン大学博士研究員) の2名を雇用し、共同で研究を行った。

まとめ

拡張多極子の新概念に基礎を置き新たな物質観を構築するという大きな目標を掲げてスタートした本計画研究は、当初の期待どおり領域全体の目標でもある d 電子系分野と f 電子系分野の融合研究を生み出す土壌を育むことに成功し、既存の様々な物性研究プロジェクトにも波及しつつ、今後更に発展する可能性を示している。この5年間は理論も実験も基礎固めを主眼に研究が進められたが、幅広い物質系への理論展開や新規実験手法の開拓、新たな物質設計指針などの着実な萌芽がみられる。そして何よりも固体物理学のこの新たな展開に強い興味を抱き、深く理解し挑戦しようとする多くの学生や若手研究者の姿がみられる。本領域が生み出した新たな学術潮流の将来を牽引する原動力となることが大いに期待される。

-
- [1] H. Saito *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033702 (2018); H. Saito, J-Physics NEWS LETTER #6, 69 (2018).
[2] Y. Kishimoto *et al.*, Physica B **536**, 320 (2018).
[3] R. Takeuchi *et al.*, JPS Conf. Proc. **29**, 013001 (2020)
[4] Y. Kishimoto *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **807**, 012005 (2017).
[5] Y. Kishimoto *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **807**, 012014 (2017).
[6] T. Aoyama *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 124713 (2018).
[7] T. Aoyama *et al.*, Physica B **536**, 320 (2018).
[8] T. Aoyama *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 064706 (2019); Physica B: Condens. Matter **570**, 349 (2019).
[9] C. Tabata *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 093704 (2019); C. Tabata, J-Physics NEWS LETTER #8, 48 (2019).
[10] C. Tabata *et al.*, accepted in JPS Conf. Proc.
[11] H. Nakao *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 245146 (2018); H. Nakao *et al.*, J-Physics NEWS LETTER #8, 70 (2019).
[12] H. Nakao *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **969**, 012118 (2018).
[13] M. Kimata *et al.*, to be prepared.
[14] Y. Yamasaki *et al.*, arXiv:1909.08179.
[15] Y. Kousaka *et al.*, Phys. Rev. Materials **1**, 071402 (2017).
[16] A. Sera *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 014419 (2017).
[17] N. Nakagawa *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 121102 (2017).
[18] R. Aoki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 057206 (2019).
[19] S. Hayami and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033709 (2018).
[20] S. Hayami *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 165110 (2018).
[21] S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, Phys. Rev. B **90**, 024432 (2014).
[22] S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 053705 (2016).
[23] S. Hayami *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 147602 (2019).
[24] S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, J. Phys.: Condens. Matter **28**, 395601 (2016).
[25] Y. Yanagi and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 083703 (2017).
[26] M.-T. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. B **99**, 174407 (2019).
[27] S. Hayami, Y. Yanagi, and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 123702 (2019).
[28] S. Hayami, Y. Yanagi, and H. Kusunose, arXiv:2001.05630.
[29] M. Naka *et al.*, Nat. Commun. **10**, 4305 (2019).
[30] M. H. Fischer, and J. Goryo, Phys. Soc. Jpn. **84**, 054705 (2015).
[31] J. Goryo *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 14502(R) (2017).
[32] H. Ueki, R. Tamura, and J. Goryo, Phys. Rev. B **99**, 144510 (2019).



D01 計画研究 まとめ

野原 実

岡山大学異分野基礎科学研究所 教授

水口 佳一

首都大学東京
理学研究科

鬼丸 孝博

広島大学
先端物質科学研究科

秋光 純

岡山大学
異分野基礎科学研究所

播磨 尚朝

神戸大学
理学研究科

1. はじめに

本研究計画では、「パリティ混成」と「ジグザグ構造」をキーワードとして、強相関多極子系を研究するための物質開発を行った。ジグザグ構造とは原子位置に空間反転対称性を持たず、ボンドの midpoint にこれをもつ構造で、ハニカム構造やダイヤモンド構造がこれにあたる。この構造に重原子を配置したとき、強いパリティ混成効果とスピン軌道相互作用が協奏し、スピンと軌道の自由度が一体となったパリティ混成複合自由度（強相関多極子）が生じ、特異な奇パリティ多極子やエキゾチックな超伝導などが期待される。開発された多数の物質の中からいくつかを紹介する。空間反転対称性の有無の比較ができる複数の物質系を見いだした点が自慢できる。

2. パイライトとウルマナイト

黄鉄鉱 FeS_2 に代表されるパイライト構造（空間群 $P\bar{a}3$, T_h^6 , #205）は、図1(a)に示すように、遷移金属元素Tと陰イオンXからなる等核二原子分子 X_2 が岩塩構造に配列した立方晶の構造を取る。フルシンボルの空間群は $P2_1/a\bar{3}$ である。 X_2 を異核二原子分子XYに置き換え、2回らせん軸 2_1 と立方対称性を保つようにXY分子を配置すると、図1(b)に示したウルマナイト構造（ $P2_13$, T^4 , #198）が得られる。代表例が硫安ニッケル鉱 NiSbS である。パイライト構造は空間反転対称性を有するが、ウルマナイト構造ではそれが破れている。このため、パイライトとウルマナイト化合物は、空間反転中心の有無に依存する物理研究の格好の舞台となる。その一つがスピン軌道相互作用によるバンドのスピンスplitである。播磨と大貫らはdHvA効果の実験とバンド計算から、パイライト CoSe_2 、 AuSb_2 にはフェルミ面のスピンスplitが存在しないが、ウルマナイト NiSbS 、 PdBiSe には存在すること、さらに PdBiSe のほうが NiSbS に比べてスピンスplitが大きく、これは主にBi 6pとSb 5p軌道のスピンスplitの大きさの違いに起因することを明らかにした[1–3]。フェルミ面のsplitは、 NiSbS で260 K程度、 PdBiSe で1260 K程度であった。

3. 空間反転対称性の破れた金属における軌道交差

映進面やらせん軸などの部分並進対称性を含む非共型（ノンシンモルフィック）空間群に属する対称性を持つ系では、ブリルアンゾーンの特殊点（線）においてバンドの合体（軌道交差）がおこる。このため、スピンスplitしたバンド（フェルミ面）が特殊点（線）の上で交差する。この軌道交差が Yb_4Sb_3 ($\bar{I}43d$, T_d^6 , #220)のdHvA実験において観測され、播磨らの理論計算により説明された[4]。例えばスピンスplitしたフェルミ面 γ が Γ -H線上で交差し、磁場中でサイクロトロン運動する電子の軌道が一方のフェルミ面からもう一方へと切り替わることが可能になる。軌道交差が4カ所で起こるためdHvAで5つの極値断面積が観測される。軌道が切り替わる確率は、スピンスplitしたフェルミ

面上でロックされたスピンの方向により決まる。同様の軌道交差現象が、共型のHgSe ($F\bar{4}3m$, T_d^2 , #216)においても観測されている[5].

4. j -フェルミオン物質:超伝導と熱電特性

非共型空間群を持つ系においては、前述したバンドの合体により、質量ゼロのカイラルフェルミオン ($j = 1/2$ Weyl fermionや $j = 3/2$ Rarita-Schwinger-Weyl fermion) が現れる可能性がある[6,7]. これらの j -フェルミオンがクーパ対を形成し超伝導を示さないだろうか。公募研究の岡本らはウルマナイト構造を持つPtSbS ($P2_13$, T^4 , #198) が約0.1 Kの低温で超伝導を示すことを見出した [8]. j -フェルミオンが存在すると考えられるバンドの縮退点が E_F から離れているので j -フェルミオン超伝導というわけではないが、スピン分裂したフェルミ面において現れた超伝導という点で興味深い。

同様のバンド構造がLalrSi型構造 ($P2_13$, T^4 , #198) においても現れる。この構造は、図2(a)のようにウルマナイトTXYにおける陰イオンの一つXを陽イオンAに置き換えてATYとしたもので、EuPtSiもこの構造をとる。LalrSi型構造は、陰イオンからなる異核二原子分子XYを含まないので、ウルマナイトとは「化学」的には別物だが、対称性に依存した「物理」は同じである。実際、岡本らが開発したBaPtPおよび野原らが開発した α -BaPtAs (共に $P2_13$, T^4 , #198) のバンド構造はウルマナイトPtSbSのそれと類似し、しかも j -フェルミオンが存在すると考えられるバンドの縮退点がフェルミ準位近傍に位置した。BaPtPは約0.2 Kで超伝導を示した[9]。一方で α -BaPtAsは0.1 Kまで超伝導を示さなかった[10].

ウルマナイト構造をとる化合物など、点群 T 対称性を持つ系は、線型分散するバンドが Γ 点において多重縮退することがある。野原らは多重縮退 (すなわち高エントロピー) フェルミオンが示す熱起電力の研究を進め、RhBiSeが金属的な電気伝導を示すにも関わらず高温で $-100 \mu\text{V/K}$ を超える巨大な熱起電力が現れることを見出した [11].

5. 秩序型ハニカム構造からなる超伝導体

局所的に空間反転対称性が破れた系として秩序ハニカム構造を持つ化合物の開発が進められた。野原らは、三元系BaPtAsが、先述した立方晶ウルマナイト構造に加えて、六方晶構造 β -BaPtAs ($P\bar{6}m2$, D_{3h}^1 , #187) と γ -BaPtAs ($P6_3/mmc$, D_{6h}^4 , #194) を取り、それぞれ2.8 Kおよび2.1–3.0 Kで超伝導を示すことを見出した[10]。さらにAsをSbに置換したBaPtSb ($P\bar{6}m2$, D_{3h}^1 , #187) は1.64 Kで超伝導を示した[12]。立方晶 α -BaPtAsは、図2(b)のようにPtAs₃平面三角形が頂点を共有しながら、いわゆる「延齢草」型の3次元ネットワークを形成するが、六方晶構造では図3のようにPtAs₃平面三角形が頂点を共有しながら平面ネットワークを形成する。これがPtとAs (Sb) が交互に占有した秩序ハニカム層である。類似の構造が2.4 Kで超伝導を示すSrPtAs ($P6_3/mmc$, D_{6h}^4 , #194) にも見られる。 β -BaPtAsではグローバルに空間反転対称性が破れており、(教科書通りに) スピン分裂したフェルミ面が存在する[13]。一方でハニ

カム層の積層パターンが異なる γ -BaPtAsとSrPtAsは空間反転中心を有するが、単一の秩序ハニカム層における局所的な空間反転対称性の破れと、単位胞に複数の秩序ハニカム層が存在することに起因して、(教科書とは異なった形での)バンドのスピンスplitが生じる[14]. 御領らは、これらの系においてカイラルd波超伝導などのエキゾチック超伝導が現れることを理論的に指摘した[15]. μ SRにより超伝導状態における内部磁場の発達が観測され、実験的にもカイラル超伝導が示唆された[16].

水口らはバククルした秩序ハニカム層SnAsとSnPを含む新超伝導体 $\text{Na}_{1+x}\text{Sn}_2\text{As}_2$ と $\text{Na}_{1-x}\text{Sn}_2\text{P}_2$ (共に $R\bar{3}m$, D_{3d}^5 , #166)を発見した[17-20]. 層間の化学結合はvan der Waals力によるもので、2次元的な電子構造を持つ. そこで現れる特異なフェルミ面の形状に起因して、面内と面間方向での伝導キャリアの符号が異なるという現象が報告された[21].

6. Pr系における希薄四極子近藤効果

鬼丸らは $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ ($Fd\bar{3}m$, O_h^7 , #227)が $4f^2$ 電子配置の Pr^{3+} に起因する反強四極子秩序を0.11 Kで示し、さらに低温0.05 Kで超伝導と共存することを明らかにしていた [22]. 今回その希薄系 $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ir}_2\text{Zn}_{20}$ において希薄四極子近藤効果が現れ、そこでの非フェルミ液体挙動が約30年前に理論的に予測されていた単サイトの電気四極子による2チャンネル近藤効果により説明できることを明らかにした[23]. さらに公募研究の柳澤らは、希薄系における電気四極子の存在を超音波測定によって実証した [24]. また、新物質の単結晶育成にも取り組み、 PrMgNi_4 ($F\bar{4}3m$, T_d^2 , #216)において四極子の凍結を見出した[25]. 図4に示すように立方晶ラーベス相のAサイトをPrとMgが秩序占有することで空間反転対称性の破れが生じる.

7. 重い遷移金属元素イリジウムを含む超伝導体

野原らは秩序型ラーベス相化合物 Li_2IrSi_3 ($P31c$, C_{3v}^4 , #159)および $\text{Mg}_2\text{Ir}_3\text{Si}$ ($P6_3/mmc$, D_{6h}^4 , #194)を見出した[26]. 超伝導転移温度はそれぞれ3.8 Kおよび7 Kであった. 前者は空間反転対称性が失われた極性構造を持つ. 秋光らは Li_2IrSi_2 ($R\bar{3}m$, D_{3d}^5 , #166)を発見した[27]. 超伝導転移温度は3.3 Kであった. また秋光らは立方晶ラーベス相 SrIr_2 ($Fd\bar{3}m$, O_h^7 , #227)が5.8 Kで超伝導を示すことを発見した[28]. 図4に示すように PrMgNi_4 の構造と比較すると面白い.

秋光らは5d遷移金属酸化物 Sr_2IrO_4 の超伝導化に取り組んだ. Sr_2IrO_4 は銅酸化物高温超伝導体と類似した結晶構造を持ち、Ir 5d軌道の強いスピンスplitに由来する $j = 1/2$ フェルミオンが強い電子相関により局在化した反強磁性モット絶縁体である. 電子注入による超伝導化は本計画研究のハイライトの一つであったが、8%を超えるドーピングが出来ないという問題があった. 試行錯誤の結果、メカニカルアロイ法によりドーピング限界を15%まで引き上げることができた. 光電子分光により、銅酸化物高温超伝導体と同様のギャップ内状態の成長が観測され、この系

の金属化(さらには超伝導化)が目前であることが確認できた。またドーブによって反強磁性の長距離秩序が抑制され、グリフィス相と呼ばれる反強磁性の短距離秩序が現れることが明らかになった[29]。

8. BiS₂系超伝導体の展開

2012年に水口らが発見したBiS₂系超伝導体について、ブロック層の概念に立脚した物質開発を展開し、12を超える新しい基本構造が開発された[30]。LaOBiS₂ (*P4/mmm*, D_{4h}^7 , #129)はBiS₂超伝導層とLaOブロック層が交互に積層した構造をとる。このLaO層を別のブロック層で置き換えることで、SrFBiS₂ (*P4/mmm*, D_{4h}^7 , #19) やEu₃F₄Bi₂S₄ (*I4/mmm*, D_{4h}^{17} , #139)などの新物質が次々と開発された。さらにBiS₂超伝導層を多層化したLaOBiPbS₃やLa₂O₂Bi₃AgS₆が開発された。これらの物質において、超伝導発現条件や熱電特性、電荷密度波の発現などが明らかになった。

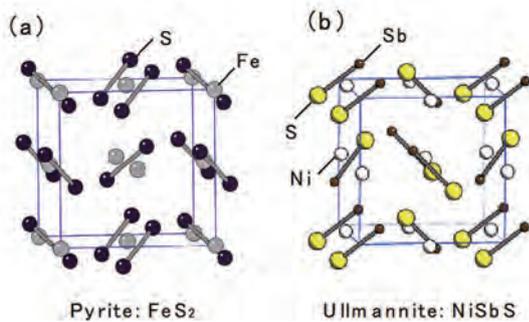


図1. (a)パイライトおよび (b)ウルマナイトの結晶構造。

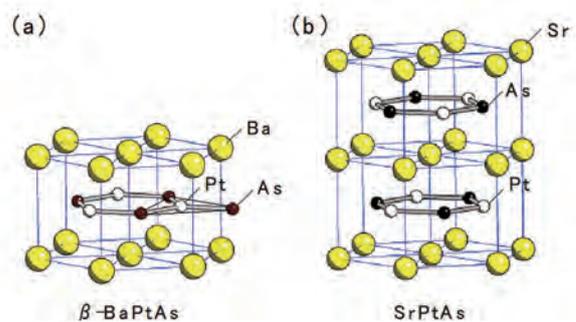


図3. (a)六方晶 β -BaPtAsの結晶構造。平面三配位のPtAs₃が頂点を共有しながら2次元のハニカムネットワークを形成する。図2(b)の3次元延齡草ネットワークと対照的である。(b)SrPtAsの結晶構造。秩序ハニカム層がABABのパターンで積層するため空間反転対称性が復活する。

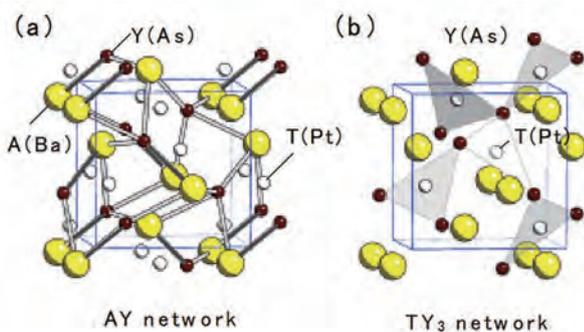


図2. (a)立方晶 α -BaPtAsの結晶構造。図1(b)のウルマナイト構造と見比べてほしい。(b)平面三配位のPtAs₃が頂点を共有しながら延齡草ネットワークを形成する。

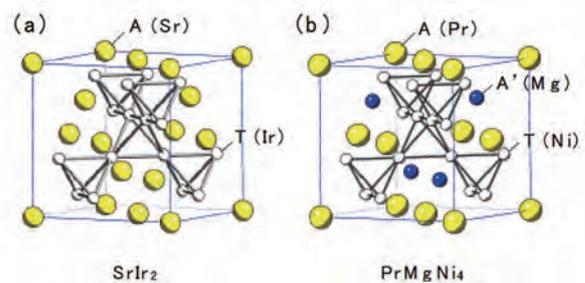


図4. (a)立方晶ラーベス相化合物SrIr₂の結晶構造。(b)PrMgNi₄の結晶構造。AサイトをPrとMgが秩序占有することで空間反転対称性が破れる。

- [1] A. Teruya *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 064716 (2016).
- [2] M. Kakihara *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 094711 (2015).
- [3] M. Kakihara *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 033701 (2015).
- [4] N. Kimura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 114708 (2018).
- [5] H. Harima, unpublished.
- [6] P. Tang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 206402 (2017).
- [7] B. Q. Lv *et al.*, Phys. Rev. B **99**, 241104(R) (2019).
- [8] R. Mizutani *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 093709 (2019).
- [9] Y. Okamoto *et al.*, JPS Conf. Proc. **29**, 011001 (2020).
- [10] K. Kudo *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 073708 (2018).
- [11] F. Abersano *et al.*, unpublished.
- [12] K. Kudo *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 063702 (2018).
- [13] H. M. Tutuncu *et al.*, Phys. Rev. B **100**, 174507 (2019).
- [14] S. J. Youn *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 220505(R) (2012).
- [15] H. Ueki *et al.*, Phys. Rev. B **99**, 144510 (2019).
- [16] T. Adachi *et al.*, KEK-MSL Report 2017, 54 (2018).
- [17] Y. Goto *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123701 (2017).
- [18] K. Ishihara *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 020503(R) (2018).
- [19] H. Yuwen *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 083001 (2019).
- [20] Y. Goto *et al.*, Sci. Rep. **8**, 12852 (2018).
- [21] B. He *et al.*, Nature Mat. **18**, 568 (2019).
- [22] T. Onimaru *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 177001 (2011).
- [23] Y. Yamane *et al.*, Phys. Rev. Lett. **121**, 077206 (2018).
- [24] T. Yanagisawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **123**, 067201 (2019).
- [25] Y. Kusanose *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 083703 (2019).
- [26] K. Kudo *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 013701 (2020).
- [27] K. Horigane *et al.*, New J. Phys. **21**, 093056 (2019).
- [28] X.-F. Yang *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **32**, 025704 (2020).
- [29] K. Horigane *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 064425 (2018).
- [30] Y. Mizuguchi, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 041001 (2019).



カイラル磁性：実験の立場から

大原 繁男

名古屋工業大学大学院 工学研究科 物理工学専攻

1. はじめに — 分野の常識を持つ

私たちは研究に際し「分野の常識」を持つ必要があります。佐藤英行先生は「得られた実験結果の検討において、関連分野の常識の備えと執拗さが、大事です」と記されました[1]。この助言を読んだ頃、私は奇妙な磁化曲線に遭遇しており、それがカイラル磁性によるものと気づいたとき、このことを痛感しました。

初学者にとって分野の常識を持つことは容易ではありません。そんなときに役立つのが、ニュースレター

や夏の学校のテキストだと思えます。ここではカイラル磁性の解説を試みますが、私も初学者にすぎません。しかし、私が分野の常識を持つとうとして、体験したこと、学びつつあること、考えていることを紹介すれば、みなさんの役に立つと考えて執筆を引き受けました。カイラル磁性については優れた解説がすでに多数あります[2]。この解説をきっかけに学んでいただけると幸いです。

そもそもカイラリティ、日本語で対掌性、とは何でしょう。何が面白いのでしょうか。結晶構造が対掌性を持ち、それが磁性と結びついたとき、さらには伝導と結びついたとき、面白い物理が予想されます。しかし焦らずに行きましょう。デカルトは「裸足になった自分の両足を見下ろして、笑い出さない者は、ユーモアのセンスに欠けているのか、対称性ということが分かっていないかのどちらかだ」と言っています[3]。私はユーモアのセンスには自信があるので、対称性が分かっていないようです。対称性から始めましょう。

2. 対象物の対掌性と対称性 — ソンケ群

対掌性をもつ結晶はソンケ群(Sohncke space group)と呼ばれる空間群に属しています。図1は結晶空間群が対掌性の観点からどのように分類されるかを示したものです[4]。対掌性とは何でしょう。手のひら(掌)のように、鏡に映した像(鏡像)が元の像(原像)と一致しないこと、という答えが多いでしょうか。このことを対称操作から整理します。

図2(a)のように座標を置き、 xy 面を鏡映面とする鏡映操作($m=\bar{2}$)を行列 M_{xy} で表すと、式(1)中の 3×3 行列になります。これにより、鏡映操作は z 座標だけを反転させることがわかります。つまり鏡像は、よくある誤解として左右が

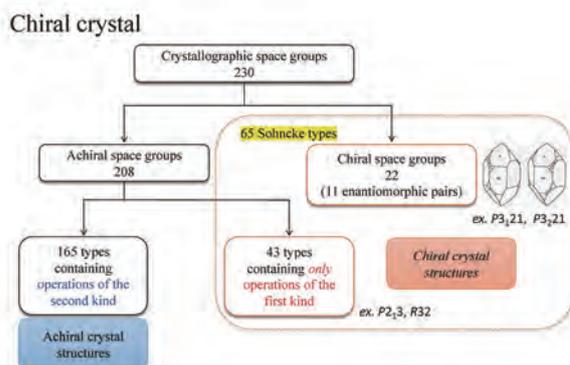


図1 ソンケ群

[1] 佐藤英行, 重い電子系の形成と秩序化ニュースレター, 5 (2), 6 (2013).

[2] 例えば, J. Kishine and A.S. Ovchinnikov, Sol. Stat. Phys. **66**, 1-130 (2015); Y. Togawa, Y. Kousaka, K. Inoue, and J. Kishine, J. Phys. Soc. Jpn., **85**, 112001 (2016); また、『固体物理』誌には本稿に関係するわかりやすい解説が多数掲載されている。

[3] H. Brunner, 柳井 浩 (訳) 『右? 左? のふしぎ』丸善出版 (2013)。

[4] http://reference.iucr.org/dictionary/Sohncke_groups. International Union of CrystallographyのOnline Dictionary of CRYSTALLOGRAPHYは結晶学の言葉の理解などに役立つ。

逆になるのではなく、前後が反転していると理解できます。

$$M_{xy} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \pi & \sin \pi & 0 \\ -\sin \pi & -\cos \pi & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ -z \end{pmatrix} \quad (1)$$

注目すべきは行列式です。鏡映も含め、回反操作の行列式は-1となり、第二種対称操作と呼ばれます。回転操作の行列式は1となり、第一種対称操作といいます。並進も加えると、第一種には並進とらせん、第二種には映進が加わります。対掌性をもつ物(Chiral, キラル, カイラルな物)に第二種操作を行なった後、第一種操作を用いても元に戻せません。つまり、第二種操作により、左右性が逆の状態に移ります。対掌性をもたない物(Achiral, アキラル, アカイラルな物)は、第二種操作を行なった後に第一種操作により元に戻せます。これにより対象物が対掌性を持つかどうか対称操作で調べられます[5]。図2のつつる人形は、(a)はカイラル状態、(b)はアカイラル状態です。

対掌性は結晶に限ったことではありません。対掌性をもつ物(例えば、空間群、結晶、分子など)には、左と右で表現される2つの状態(例えば、 $P3_121$ と $P3_221$ 、左旋性水晶と右旋性水晶、L-グルタミン酸とD-グルタミン酸など)が存在します。図1の理解に戻ります。230の結晶空間群の対掌性を吟味すると208のアカイラルと22(11対)のカイラル空間群に分類できます。さらに208のアカイラル空間群は第一種操作「のみ」をもつ

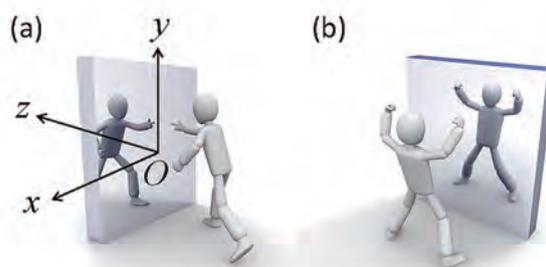


図2 鏡映操作

43の空間群と第二種も含む165の空間群に分けられます。この165の空間群に属する結晶は、対称操作に第二種を含むことから、アカイラル構造を持っています。残りの第一種対称操作のみをもつ65の空間群をまとめてソクケ群と呼び、ソクケ群に属する結晶は鏡像体が許されます。簡単には、空間群を国際記号で表したときに、数字しか含んでいなければソクケ群に属します。注意点は、カイラル空間群と言ってよいのは22(11対)の空間群だけであることです。

これで、結晶空間群が決定できれば、カイラル結晶かどうか判別ができる常識が身についたことになります。

3. 結晶の絶対構造の決定 — 裏も表も測る

新物質を発見した場合、その構造を決定することは極めて重要です。通常、X線を用いて結晶構造を測定しますが、カイラル結晶の場合は、異常散乱を用いて、その絶対構造(absolute structure)を決定する必要があります。

[5] ネスポロ・マッシモ, 日本結晶学会誌, **58**, 251 (2016).

[6] H. D. Flack and G. Bernardinelli, Acta Cryst. A55, 908 (1999).

[7] 齋藤喜彦, 日本結晶学会誌, 30, 25 (1988).

ます[6, 7]. 異常散乱と絶対構造の測定について説明します.

まず, 異常散乱について簡単に述べます. 元素のX線吸収スペクトルは波長とともに増大しますが, K端やL端といった吸収端で急激に減少します. 吸収端から離れた波長での散乱を正常散乱と呼びます. 吸収端近傍では入射X線が一部原子に吸収され, 異常散乱が生じます. 近年, 散乱X線強度を精度よく測れるようになり, 実験室系の単結晶X線回折装置において異常散乱の観測が可能になりました. 重要なのは, 正常散乱では原子散乱因子が実数であるのに対し, 異常散乱では複素数になることです.

原子により散乱されたX線の振幅と位相は式(2)の構造因子で与えられます. ある結晶面の表と裏からの反射

$$F(hkl) = \sum_{j=1}^N f_j \exp\{2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j)\}$$

$$F(\bar{h}\bar{k}\bar{l}) = \sum_{j=1}^N f_j \exp\{-2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j)\}$$
(2)

を考えたいので, 指数 hkl と $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ について示しました. ここで f_j は原子散乱因子で, x_j, y_j, z_j は決定したい原子座標です. 正常散乱では, f_j が実数のため, 式(2)は互いに複素共役になり, 同じ強度になります. つまり, ある結晶面の表と裏からの反射強度は等しいというフリーデル則が成り立ちます. 異常散乱が寄与すると, f_j が複素数になることから, フリーデル則が破れる場合がでてきます.

右と左の結晶の方位の違いも含めた原子の配置のことを絶対構造といいます. 互いに対掌な原子配置があったときに, 適切な座標軸により, それぞれの原子座標は (x_j, y_j, z_j) (右結晶) と $(-x_j, -y_j, -z_j)$ (左結晶) にとることができます. 結晶が反転心をもつ場合は, 原子座標 (x_j, y_j, z_j) に対して反転操作した $(-x_j, -y_j, -z_j)$ に同じ原子が存在しますから, 異常散乱が影響してもフリーデル則は成立します. しかし, 反転心がない場合は, 異常散乱があるとフリーデル則は破れ hkl と $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ 反射に強度差が生じます. そこで hkl と $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ とを独立の反射として測定して構造解析をおこなうことにより, 絶対構造が決定できます.

異常散乱を考慮するために導入されたのが次式のFlackパラメータ x です[8,9]. Flackパラメータは, 測定

$$I(hkl) = (1 - x)|F(hkl)|^2 + x|F(\bar{h}\bar{k}\bar{l})|^2$$
(5)

している反転心のない結晶の反転双晶を仮定し, 解析のために置いたモデル構造に対して構造が反転している体積の割合を x としています. $x=0$ であれば, モデル構造と一致しています. $x=1$ であれば, 測定している結晶はモデル

[8] H. D. Flack, Acta Cryst. **A39**, 879 (1983).
 [9] 大場茂, 日本結晶学会誌, **47**, 285 (2005).

構造を反転した構造を持っています。Flackパラメータは、原子座標など他の構造パラメータと独立性があり、標準偏差も得られます。絶対構造を決める場合、その標準偏差が十分小さくなっているかどうかの確認が必要です。結晶の表も裏も十分なデータをとること、試料形状の影響が無視できるかどうかにも注意しなくてはなりません。このような注意を守れば、カイラル結晶の絶対構造を決定できるようになります。

私が冷や汗をかいた経験を紹介します。我々が研究している三方晶 YbNi_3Al_9 は空間群 $R\bar{3}2$ (No.155, D_3)に属すカイラル物質です。ある時、X線回折実験を後ろで見ていると測定していた学生が「あー、だめだ、六方のやつだ」と言うのです。説明を聞くと、仮測定をして、質の高い結晶かどうかを判別していくが、その際に六方晶と判定される試料がある、とのことでした。違う物質が混じっているのかと問うと、そうは思わないと言います。それならば測定して解析しなさい、と助言しました。結果、主軸を同じくして右結晶と左結晶が反転双晶を形成しており、Flackパラメータは約0.5となりました。その時まで学生が報告するFlackパラメータは1か0でしたから、 YbNi_3Al_9 では反転双晶はないと判断してしまうところでした。

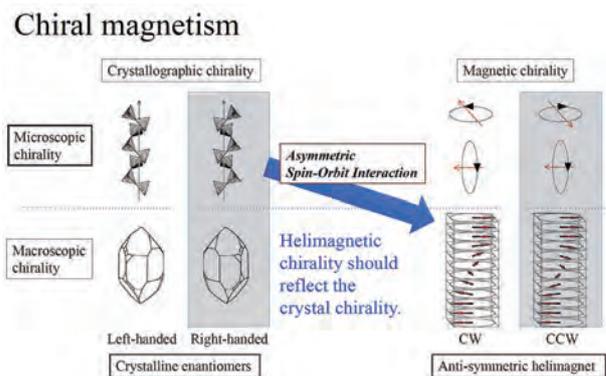


図3 結晶対掌性はどのように磁気構造に影響するのか

4. 反対称相互作用と守谷ルール

カイラルな結晶構造に磁気モーメントが配置されると磁気構造にねじれが生じることがあります。図3は微視的な結晶構造対掌性と巨視的な磁気構造対掌性が反対称スピン軌道相互作用を介して結びつく概念図です。磁気モーメントが軸性ベクトルであることも大事な基礎知識です。

いよいよDzyaloshinskii-Moriya相互作用 (DMI) [10,11]の話ですね、と言ってもらえると嬉しいのですが、正直なところ、DMIは直感的に理解しようとしても(少なくとも私には)歯が立ちません。そこで結晶磁気異方性から考えてみます。磁気秩序が生じると、磁気モーメントは磁化容易軸と呼ばれる結晶構造と関連づいた向きを持ちます。交換相互作用(ハイゼンベルグ相互作用)は等方的で対称相互作用(symmetric interaction)ですから、磁気異方性は交換相互作用からは生まれません。結晶磁気異方性は、磁気モーメントが結晶構造となんらかの結合をしていることを意味しています。一般に、格子と結合するのは電子の軌道です。結果、スピンと格子はスピン軌道相互作用

[10] I. E. Dzyaloshinskii, Sov. Phys. JETP **19**, 960 (1964); Sov. Phys. JETP **20**, 223 (1965); Sov. Phys. JETP **20**, 665 (1965).
 [11] T. Moriya, Phys. Rev. **120**, 91 (1960).

用を介して格子と結合します。

この軌道の寄与は磁気相互作用にも異方性を与え、反対称相互作用 (antisymmetric interaction) が生じます。反対称相互作用は、一般にDMIと呼ばれ、二つのスピン S_A と S_B について、

$$D \cdot (S_A \times S_B) \quad (4)$$

と表すことができます。 D はDMベクトルと呼ばれる実ベクトルで、考えている2つの磁性イオンA, B間の対称性によってその有無と方向が決定されます。その大きさはスピン軌道相互作用に比例すると言ってよいと思いますが、せいぜい、1K程度のエネルギーしかありません。

反対称相互作用が磁気構造に影響するかは、次のいわゆる守谷ルール[11]で検証しなくてはなりません。

2つの磁性イオンA, Bの中点をCとしたとき、

- i) C点に反転中心があるときは $D = 0$ 。
- ii) C点を含むABに垂直な鏡映面があるとき、 D は鏡映面に含まれる。
- iii) ABを含む鏡映面があるとき、 D は鏡映面に垂直。
- iv) C点においてABに垂直な2回軸があるとき、 D はその2回軸に垂直。
- v) ABを軸とする n 回軸 ($n \geq 2$) があるとき、 D はABに平行。

DMIにより $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ (ヘマタイト) の弱強磁性が説明されたと「一行」書いてある教科書をよく見ますが、簡単ではありません。 $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ の空間群は $R\bar{3}c$ であり、反転心があります。 $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ の弱強磁性を理解するには、単位胞内にある4つの鉄イオンのすべての対^{ついで}に対するDMベクトルの向きと大きさを仮定し、そこに磁気モーメントを配置して、考えなくてはなりません[12]。 $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ では、守谷ルールと照らして、DMベクトルは c 軸を向いています。 モーリン温度と呼ばれる260K以下では磁化容易軸が c 軸であるため、式(4)からわかるように、DMIは働きません。 モーリン温度以上では容易軸が c 面内に変わります。すると、DMIでエネルギーの得が出るような磁気モーメントの配列となり、傾角反強磁性秩序による弱強磁性が現れます。

DMIという言葉は広く使われていますが、私は安易な使用に抵抗感を持っています。例えばスピントロニクス分野では薄膜界面の反転対称性の破れによる界面DMIといった表現があります。これは、半導体表面の自由電子に対するラシュバ効果という言葉を経晶に対しても使うことと似ており、対称性は同じでも対象物の状態は異なるので気になります。希土類金属磁性体を考えてみると、強くLS結合した磁気モーメントについて磁気異方性の強い状

[12]安達健五,『化合物磁性 局在スピン系』裳華房 (1996).

態での反対称相互作用を考えることになり、磁気相互作用は伝導電子を介したRKKY相互作用です。これは $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ とは異なる状況です。希土類金属磁性体においても結晶対掌性を反映した磁気構造が現れるのでしょうか。

5. 希土類金属間化合物 YbNi_3Al_9 のカイラル磁性

2012年3月2日の夕方に私は東京で寒気を感じていました。それは折しも降っていた冷たい雨のせいではなく、第43回化合物新磁性材料研究会「キラル磁性体の構造と磁性」に参加して、カイラル磁性体で観測される磁化曲線の「常識」を知ったからでした。その常識は、カイラルらせん磁性体のらせん軸に垂直に磁場を印加すると、反対称相互作用のために磁気モーメントが左右同じように回ることができず、カイラルソリトン格子(Chiral soliton lattice (CSL))と呼ばれる磁気超格子構造が現れ、独特の下凸の磁化曲線になる

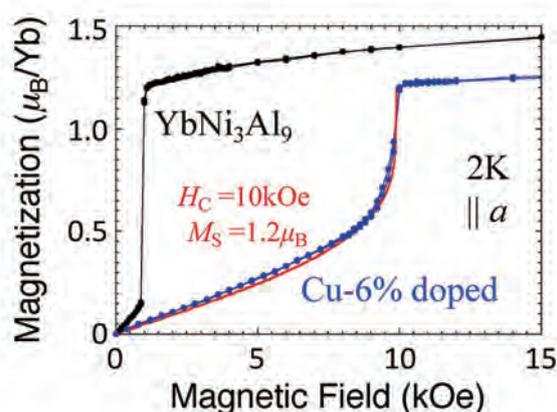


図4 YbNi_3Al_9 およびCu6%置換試料の磁化曲線

というものでした[2]。図4は YbNi_3Al_9 とNiをCuに6%置換した試料の磁気秩序状態(2K)における磁化曲線(磁場a軸)です[13]。Cu6%試料において下凸の奇妙な磁化曲線が現れていますが、CSLが形成される場合に現れる磁化曲線であり、赤線で示す岸根順一郎さん(放送大)による理論計算と一致します。同様の磁化曲線はカイラルらせん磁性体である CrNb_3S_6 においても観測されています[14]。当時博士後期課程の学生だった山下哲朗さん(現、日立化成)が磁化曲線をさして「なんですかね、これ」といったことを声まで覚えています。その疑問が解けた日でした。

YbNi_3Al_9 はカイラル磁性体に違いない、と思いました。しかし、それを証明しなくてはなりません。磁気構造が対掌性を持つかどうかを磁化曲線から判断することは、もちろんです。しかし、 YbNi_3Al_9 が3.4K以下で伝播ベクトル $q=(0\ 0\ 0.8)$ のらせん磁性体となることは決定できていましたが、結晶の左右性と磁気構造の関係を調べるには、なんらかの偏極プローブを用いた測定が必要でした。

最初に、高阪勇輔さん(広島大(当時)、現大阪府大)とJ-PARCのBL-15 TAIKANで偏極中性子実験を行いました。中性子実験に用いた大きな試料では左右の結晶が混ざっており、結晶構造と磁気構造の関係は明らかにできませんでした。しかし、らせん磁気構造が左右対称ではなくどちらか一方に偏っていることまではわかりました。その後、松村武さん(広島大)が、円偏光を用いた共鳴X線回折により、結晶の右左と磁気構造のらせんの向きが1対1の関

[13] S.Ohara, S. Fukuta, K. Ohta, H. Kono, T. Yamashita, Y. Matsumoto, and J. Yamaura, JPS Conf. Proc. **3**, 017016 (2014).

[14] T. Miyadai, K. Kikuchi, H. Kondo, S. Sakka, M. Arai, Y. Ishikawa, J. Phys. Soc. Jpn., **52**, 1394 (1983).

[15] 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).

係を持つことを立証し、 YbNi_3Al_9 がカイラルらせん磁性体であることが確定しました[15]. さらに、Cu置換した試料では、磁場中で磁気反射の高調波が観測されました。これはCSLの生成によるものと理解できます[15]. 中性子実験では大きくて、かつ、純粋に左右どちらかな結晶(enantiopure crystal)が必要なものに対して、放射光を用いた共鳴X線回折実験では結晶のある小さな部分について結晶構造と磁気構造を同時に測定できる強みが活きました。CSLを観測するには、ローレンツ電子顕微鏡法による実空間像の観察が有効[16]ですが、磁気秩序温度が低いことによる実験的な難しさから、実現できていません。

こうして YbNi_3Al_9 がキラル磁性体であることは立証できましたが、いろいろとよくわかっていません。

6. 希土類金属間化合物のカイラル磁性のこれから

希土類金属間化合物におけるカイラル磁性の特徴や今後の展開について、 $3d$ 遷移金属のカイラル磁性体の CrNb_3S_6 [14]や MnSi [17]と比較して述べたいと思います。図5は磁気モーメントの状態と磁気相互作用の視点から見た物質の状況です。 YbNi_3Al_9 やJ-Physicsの成果である立方晶 EuPtSi [18]では、磁気モーメントが局在しており、磁気相互作用が伝導電子を介した系になります。これは、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ を説明した絶縁体や活発に研究されているバンド磁性の MnSi とは異なる状況で反対称相互作用が働く物質が見つかったと言えるでしょう。DMベクトルの有無と向きについては、「対称性はウソをつかない」(岸根)の、守谷ルールは使えると考えられます。一方、DMベクトルの大きさ、すなわち、反対称相互作用の強さがどのように決定されるのかを解明する必要があります。また、スピン軌道相互作用によりスピン分裂したフェルミ面によるRKKY相互作用がどのような磁気構造を生じさせるのか、興味もたれます。

反対称相互作用の大きさとしては、らせん軸に垂直に磁場を加えた場合に、どの程度の臨界磁場で強制強磁性状態になるかが目安になります。これまでのカイラル磁性体では、その磁場は1T程度で、反対称相互作用の大きさは概ね1K程度にとどまり、物質系に依ら

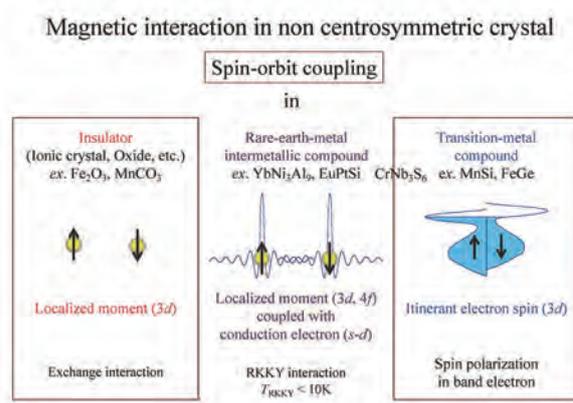


図5 希土類金属間化合物のカイラル磁性体の位置づけ

[16] Y. Togawa, T. Koyama, K. Takayanagi, S. Mori, Y. Kousaka, J. Akimitsu, S. Nishihara, K. Inoue, A. S. Ovchinnikov, and J. Kishine, Phys. Rev. Lett., **108**, 107202 (2012).

[17] Y. Ishikawa, K. Tajima, D. Bloch, M. Roth, Solid State Commun., **19**, 525 (1976).

[18] K. Kaneko, M. D. Frontzek, M. Matsuda, A. Nakao, K. Munakata, T. Ohhara, M. Kakihana, Y. Haga, M. Hedo, T. Nakama, Y. Ōnuki, J. Phys. Soc. Jpn., **88**, 013702 (2019).

なさそうです。これに対して、対称相互作用の目安として磁気秩序温度を用いると YbNi_3Al_9 と EuPtSi では数Kなのに対し、 CrNb_3S_6 は127K、 MnSi は29.5Kと一桁以上高くなります。このことが関係していると思われることに YbNi_3Al_9 と EuPtSi のカイラルらせん磁気構造の周期が CrNb_3S_6 や MnSi と比べると一桁短いことを挙げることができます。単純に考えると、カイラルらせん構造の周期は対称相互作用と反対称相互作用の比で決まります。反対称相互作用はあまり変わらないのに対して対称相互作用は一桁小さい結果、周期が短くなくてもよいのではないかと思います。

しかし、このことも単純ではありません。 YbNi_3Al_9 のCu6%置換試料では臨界磁場は10倍上昇し、CSLが明確に観測されます。つまり、反対称相互作用が強くなったと思われます。磁気秩序温度も3.4Kから6.4Kへと上昇しますが、2倍程度にとどまります。このことから、置換試料の方がらせん周期は短くなりそうですが、実際には長くなります[15]。そもそも、 YbNi_3Al_9 の磁性がなぜCu置換に敏感なのか、まだ解明できていません。Coで置換すると磁気秩序は抑制されることとNiとの電子数の違いから、 YbNi_3Al_9 の磁気相互作用はキャリア注入に敏感なのであろうと思われます。これがフェルミ面敏感に繋がるのであれば、RKKY相互作用におけるカイラル磁性の理解に役立つと考えています。

無機化合物におけるカイラルらせん磁性体はまだ数えるほどしか見つかっていません[2]。今後、物質を増やしていくことが必要です。しかし、例えば、機械学習で探査するにしても事例が少なすぎるかもしれません。私も新しいカイラル磁性体を求めて物質開発に取り組んでいきたいと考えています。しかし、それは容易ではなさそうです。例えば、 YbNi_3Al_9 とおなじ結晶構造をもつ磁性体は重希土類元素に対して作ることができ[19]、またAlをGaに変えても作れます。ところが、カイラルらせん磁性は今のところ YbNi_3Al_9 だけです。希土類金属間化合物は反強磁性になることも多く、また一軸異方性が強いとイジング磁性体や傾角反強磁性体になってしまいます[20-22]。カイラルらせん磁性の候補として、価数揺動から磁気秩序状態に圧力により調節した YbNi_3Ga_9 を挙げることができますが、立証には低温高圧下での偏極中性子散乱実験が必要です[23]。

希土類金属間化合物においてカイラルらせん磁気構造を生じるには、磁気モーメントがDMベクトルに垂直な面内にあり、かつ、自由に回転できることが必要です。 EuPtSi においてヘリカル構造やSkyrmion格子が生じる要因としてEuが $^8S_{7/2}$ と「S的」であることがあげられます。つまり、磁気モーメントが自由にまわることが重要です。軌道の寄与がなくては反対称相互作用が働かないのではないかと、という指摘はわかりますが、磁気異方性があれば反対称相互作用もあってよいくらいに私は考えています。おもしろい物質は絶妙な状態にある例の一つだと思います。

今後、どのような研究の展開が考えられるでしょうか。CSLやSkyrmion格子は磁壁の周期構造とみることができま

[19] T. Yamashita, S. Ohara, I. Sakamoto, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, SA080 (2011).

[20] H. Ninomiya, Y. Matsumoto, S. Nakamura, Y. Kono, S. Kittaka, T. Sakakibara, K. Inoue, S. Ohara, J. Phys. Soc. Jpn., **86**, 124704 (2017).

[21] H. Ninomiya, T. Sato, Y. Matsumoto, T. Moyoshi, A. Nakao, K. Ohishi, Y. Kousaka, J. Akimitsu, K. Inoue, S. Ohara, Physica B, **536**, 392 (2018).

[22] I. Ishii, K. Takezawa, T. Mizuno, S. Kumano, T. Suzuki, H. Ninomiya, K. Mitsumoto, K. Umeo, S. Nakamura, S. Ohara, Phys. Rev. B, **99**, 075156 (2019).

[23] K. Umeo, T. Otaki, Y. Arai, S. Ohara, T. Takabatake, Phys. Rev. B **98**, 024420 (2018).

すし、希土類金属間化合物では強い伝導との相関が期待されます。例えば、磁気構造を電流で駆動することも期待できます[24]。収束イオンビーム(FIB)で小さく加工した YbNi_3Al_9 を用いた磁気抵抗の精密測定において、 CrNb_3S_6 [16]と同様に、磁気ソリトン生成に対応する磁気抵抗変化が観測されました[25]。 EuPtSi においても MnSi と類似した電流磁気効果が報告されています[26]。最近、 CrNb_3S_6 では非対称な電流磁気効果も観測されました[27]。磁気超格子であるCSLにおいて結晶格子との整合不整合の効果はないのでしょうか。 YbNi_3Al_9 のCu6%置換試料では、磁気伝播ベクトル $q=0.375c^*=(3/8)c^*$ でのピン止めが観測されていて注目されます[15]。

非弾性磁気散乱によるカイラルマグノンの観測にも興味もたれます。希土類金属のカイラル磁性体ではらせん周期が短いため、波数空間で磁気反射が核(格子)の反射から離れています。そのため、他の反射との分離がよく、小角散乱を用いなくても非弾性磁気散乱の観測が可能です。これは実験上の利点です。

結晶合成の立場からは、このような展開に備えて、大型かつ左右性の純度がよい結晶の育成手法の開発が求められます。 YbNi_3Al_9 については、結晶の大型化には成功しつつありますが、対掌性の制御はむずかしいです。希土類金属間化合物のカイラル磁性の研究はまだ始まったばかりです。今後も新しい物質が新しい物理を拓くことが期待されます。

最後になりましたが、支援と助言をいただいている、播磨尚朝先生はじめ、J-Physicsの方々、また共同研究者の方々にお礼申し上げます。特に、秋光純先生(岡山大)、井上克也先生(広島大)、岸根順一郎先生(放送大)、戸川欣彦先生(大阪府大)、大石一城先生(CROSS)、高阪勇輔先生(大阪府大)には、カイラル磁性の基礎から教えていただきました。この方々と第43回化合物新磁性材料研究会で出会わなければ、ここまでの研究はできませんでした。また、こんなカイラル磁性の研究会があるよと開催情報を私に教えてくださり、日々、根気よく議論してくださる同僚の壬生攻先生(名工大)に感謝いたします。

[24] F. Jonietz, S. Mühlbauer, C. Pfleiderer, A. Neubauer, W. Münzer, A. Bauer, T. Adams, R. Georgii, P. Böni, R. A. Duine, K. Everschor, M. Garst, A. Rosch, *Science* **330**, 1648 (2010).

[25] R. Aoki, Y. Togawa, S. Ohara, *Phys. Rev. B*, **97**, 214414 (2018).

[26] M. Kakihana, D. Aoki, A. Nakamura, F. Honda, M. Nakashima, Y. Amako, S. Nakamura, T. Sakakibara, M. Hedo, T. Nakama, Y. Ōnuki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 023701 (2018), 023701.

[27] R. Aoki, Y. Kousaka, Y. Togawa, *Phys. Rev. Lett.*, **122**, 057206 (2019).



α'' -(BEDT-TTF)₂Rb_{1.2}Co(SCN)₄の dスピン- π スピン- π 電荷結合の解明

井口 敏

東北大学金属材料研究所 准教授

米山 直樹

山梨大学
工学部

佐々木 孝彦

東北大学
金属材料研究所

我々は有機 π 電子系におけるスピン-電荷の自由度が複雑に絡み合った物性を解明していくことを目標に研究してきた。有機 π 電子系は、f電子やd電子系に比べ磁性に乏しく、磁場中での物性に变化があるものが比較的少ない。例えば、マルチフェロイクスとされている κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Clは、磁場中での誘電率には何の異常も示さない[1]が、電荷やスピン状態の秩序化にともなう揺らぎを反映した相関が格子系に見られることを我々は見いだした[2]。このように有機系での電荷-スピン結合物性の解明にはスピンや電荷、アニオン層のdスピンなどとの相関効果をより詳細に観測していく必要があると思われる。

そのような物質として、我々はアニオン層にCoの局在スピン($S = 3/2$)を持つ擬2次元 π 電子系 α'' -(BEDT-TTF)₂Rb_{1.2}Co(SCN)₄に着目してきた。この物質は100 Kで金属から絶縁体に転移する。低温相は電荷秩序と予想されたが、この物質はX線に非常に弱く、赤外分光測定によってBEDT-TTF分子の価数分裂を示した。さらに低温では、Coの局在dスピンはキュリー的であるが、約40 Kで π スピンの反強磁性転移と考えられる磁化の減少を示す。さらに40 K以下では、図のよう磁気誘電効果に異常が見られる。これを磁化(ほぼCoスピン)と比較すると、磁化がほぼ一定値を取るような磁場と温度で、磁気誘電効果に異常が見られる。これは、外部磁場と、強いCoスピンからの内部磁場(~30 T)が π スピんに働き、2つの磁場の和がある一定の値に達したときに起こるpスピンフロップが原因であろう。このとき、 π 電子スピンと電荷の結合によって誘電率に異常が現れると考えられる。それを明らかにするため、SPring-8のBL43-IRの磁気光学測定系を使用して、磁場中の赤外スペクトルを

測定した。この測定系は我々が再整備を行ってきたものである[3]。

赤外光学伝導度スペクトルは、磁気誘電効果に異常が起こる磁場付近で形状がやや変わり、重心周波数 ω^* の磁場変化はこれをよく表している。この変化が起こるスペクトル部分は π 電子バンド間の遷移に起因する。そのため、磁気誘電効果も含め、 π 電子のスピン状態の変化が電荷状態に影響を及ぼしていることをより直接的に示す結果を得たと考えられる。

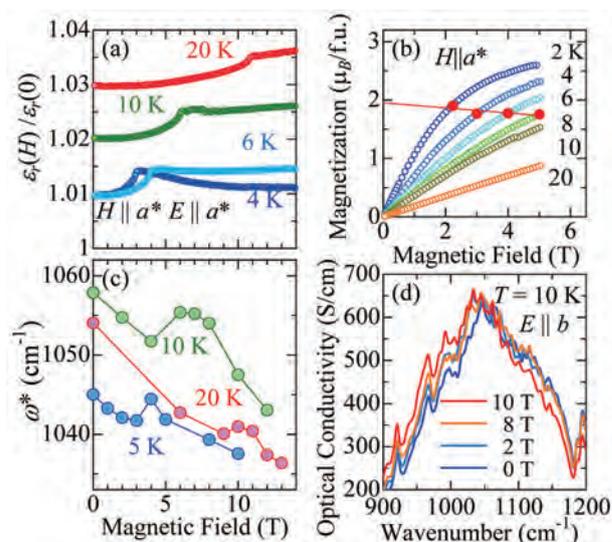


図1 (a)誘電率、(b)磁化、(c)重心周波数の磁場変化。(d)光学伝導度。(b)の赤点は(a)の異常に対応。

[1] P. Lunkenheimer *et al.*, Nature Mater. **11**, 755 (2012).

[2] M. Matsuura, T. Sasaki, S. Iguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **123**, 027601 (2019).

[3] S. Iguchi, Y. Ikemoto, T. Moriwaki, and T. Sasaki, SPing-8/SACLA Research Report 8(1), 88 (2020).



電子面とホール面を持つ相関電子系のマルチチャンネル近藤効果と非従来型超伝導

星野 晋太郎

埼玉大学 理工学研究科 助教

飯村 翔馬

埼玉大学
理工学研究科

平山 元昭

理化学研究所
創発物性科学研究センター

強相関電子系における超伝導の発現機構は、超伝導物質を設計することに繋がる魅力的かつ重要な研究テーマであると思います。特にランタノイドやアクチノイドを含む重い電子系物質群は、f 電子のもつ多極子自由度が結晶中を遍歴する伝導電子と絡み合うことで多様な超伝導現象を生み出しており、超伝導機構を研究するにあたって絶好の舞台を提供しています。その第一世代のひとつである UBe_{13} は、低温で非フェルミ液体的な振る舞いを示し、さらに低温で超伝導状態に転移する特異な物質です[1]。この超伝導相のまわりには磁気秩序や構造相転移などの秩序相が見られず、量子臨界点近傍で発達する揺らぎによる超伝導というシナリオが素朴には適用できません。また、f 電子系のような相互作用の強い系では通常、異方的なクーパー対が形成されてギャップ関数にノード構造が期待されますが、最近の実験によってフルギャップ構造であることが同定されています[2]。このように UBe_{13} は「普通の非従来型超伝導体に対する発現機構」を適用できない興味深い超伝導体であると思います。

この物質に対してはCoxがマルチチャンネル近藤系の可能性を指摘し、非フェルミ流体の起源が議論されました[3]。これに加えて、我々はBe原子数がUに比べて大きいことに注目し、 UBe_{13} を記述する近藤格子の伝導電子部分はBe単体の性質を受け継いでいるのではないかと考えました。Beは原子番号4番であり、2s軌道がすべて占有され、高エネルギー域に非占有の2p軌道を有します。これが格子を組むと、エネルギーバンドを形成して補

償金属となり、フェルミ面は電子面とホール面から構成されます[4]。そこで、このような補償金属から成る伝導電子がUサイトの局在多極子自由度と相互作用をした場合、どのような基底状態が形成されるかに興味を持ちました。この系に対して平均場理論に基づく解析を行なうと、電子とホールの自由度が近藤効果を介して量子力学的に重ね合わされた状態、すなわちBogoliubov準粒子が形成されることがわかり、超伝導状態となることが明らかとなりました[5]。同様の議論は $PrIr_2Zn_{20}$ のような超伝導体にも適用可能性があると考えます。Zn数がPr数に比べて多いことに加え、Znも原子極限で3d軌道がすべて占有されて結晶中で補償金属となるからです。

ここまでの研究では超伝導の実現を理論的に提案したに過ぎず、次に問題となるのは超伝導状態のもつ性質です。特に、ゼーマン磁場への応答[6]や軌道磁場によって誘起される量子渦状態の特徴に興味を持たれます[7]。後者については実際に空間非一様な系を理論的に調べることで、空間変化を特徴づける長さがエネルギーギャップから予想される長さよりもずっと短いという、BCS超伝導状態と異なる性質がわかってきました。このようにBCS超伝導体との違いをひとつずつ明らかにしていくことで、新しい超伝導発現機構を同定する手がかりを得ることができるようになると思います。さらに現在、第一原理計算を駆使した電子状態の計算も行っており、これを基に物質に即した議論も進めています。

[1] H.R. Ott, H. Rudigier, Z. Fisk, and J.L. Smith, Phys. Rev. Lett. **50**, 1595 (1983)

[2] Y. Shimizu, S. Kittaka, T. Sakakibara, Y. Haga, E. Yamamoto, H. Amitsuka, Y. Tsutsumi, and K. Machida, Phys. Rev. Lett. **114**, 147002 (2015).

[3] D.L. Cox, Phys. Rev. Lett. **59**, 1240 (1987).

[4] T.L. Loucks and P.H. Cutler, Phys. Rev. **133**, A819 (1964).

[5] S. Iimura, M. Hirayama, and S. Hoshino, Phys. Rev. B **100**, 094532(2019).

[6] S. Iimura, M. Hirayama, and S. Hoshino, to appear in JPS Conf. Proc.

[7] S. Iimura *et al.*, in preparation.



高圧力で拓く多極子と伝導電子の混成効果による新奇物性

松林 和幸

電気通信大学 准教授

本公募研究では、四極子自由度を有する非磁性Pr系化合物における四極子秩序と超伝導の相関に着目し、四極子自由度が関与した近藤効果や超伝導を高圧下での精密物性測定によって明らかにすることを目的とした。特に高圧下での熱力学的な特性を明らかにすべく、比熱および熱電能測定法の開発に取り組んだ。その結果、常圧で強四極子秩序と超伝導を示すPrTi₂Al₂₀に対しては、約9 GPaまでの高圧力下での比熱を半定量的に評価し、重い電子超伝導の発現による比熱異常を観測することに成功した。また、高圧下比熱測定での测温技術を応用し、高圧下・磁場中での熱電能測定法を3 GPa程度の圧力域まで確立することができた。さらに高圧下・磁場中電気抵抗測定によって、PrTi₂Al₂₀の四極子秩序が消失する10 GPaを超えた領域で、幅広い圧力・磁場領域において、四極子近藤効果を示唆する非フェルミ液体的挙動が観測されることを見出した。同圧力域での比熱および熱電能の精密測定に向けた技術的改良の目処も付けることができたので、今後はPrTi₂Al₂₀の測定に着手するところである。また、A01班の脇倉氏らとの共同研究として、PrRu₂Zn₂₀の1つのZnサイトのみをSnに置換したPrRu₂Sn₂Zn₁₈の圧力効果の研究にも取り組んだ。PrRu₂Sn₂Zn₁₈はPrTi₂Al₂₀やPrIr₂Zn₂₀と同様に非磁性Γ₃二重項を基底状態にとることが報告されていたが[1]、T₀ ~ 2 Kで四極子秩序を示すことを見出した。また、PrIr₂Zn₂₀に代表されるZn系物質には見られない特徴として、60 K程度の高温域での電気抵抗率が -ln T に比例する振る舞いが観測されていたが、加圧によりこの磁氣的近藤効果による振る舞いがエンハンスされることを見出した。同様の圧力効果はPrTi₂Al₂₀においても観測されているが、Znサイトの一部をSnで置換したPrRu₂Sn₂Zn₁₈が、Zn系よりもAl系物質の物性と類似していることは注目すべきことである。これらの実験事実は、Al系とZn系の物性の統一的な理解への重要な手がかりになると期待されるため、Pr周りの僅かな局所構造の違いが混成強度に与

える影響を実験と理論の両面から議論していきたい。また、B01班の平井氏らとの共同研究として、四極子秩序とキャント磁性を示す5d遷移金属酸化物Ba₂MgReO₆の単結晶試料[2]に対する圧力効果を調べた。その結果、理論的に予言されていた八極子および新奇な磁性相の存在を示唆する多彩な圧力-温度相図を実験的に得ることを成功した。さらにD01班の水口氏らとの共同研究として、BiS₂系超伝導体と類似の層状構造を有するLaOBiPbS₃およびLa₂O₂Bi₃AgS₆において[3]、加圧による半導体-半金属転移近傍で圧力誘起超伝導を発見した。以上のように、領域内での共同研究を積極的に進めたことで、当初の研究計画の枠を超え、高圧力を用いた広い意味での物質探索、新奇物性の開拓の一步を踏み出すことができた。今後はこれらの研究の芽を伸ばしていくとともに、当該研究領域のさらなる拡がりや深化に貢献していきたい。

本研究の成果は、電気通信大学の山本洸凧、星竜二、内藤康氏、元山史都、有馬寛人、横浜国立大学の駒形貴裕、脇倉和平、梅原出、首都大学のR. Jha、後藤陽介、水口佳一、松田達磨、青木勇二、東京大学の北川健太郎、郷地順、上床美也、平井大悟郎、広井善二、曾我部尚希、酒井明人、中辻知(敬称略)との共同研究である。この場を借りてお礼申し上げます。J-Physicsメンバーとして研究の機会を頂いたことを深く感謝いたします。

[1] K. Wakiya *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 094706 (2018).

[2] D. Hirai and Z. Hiroi, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 064712 (2019).

[3] R. Jha *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 083704 (2018).



内殻光電子線二色性のここまでの研究まとめ： 4f電子系に対する新たなプローブとしての確立

関山 明

大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授

藤原 秀紀

大阪大学 大学院基礎工学研究科
助教

海老原 孝雄

静岡大学 理学部
准教授

縁あって前半の2年間も含めて4年間、公募研究で内殻光電子線二色性(LD-HAXPES)という新しい測定手法で局在4f軌道対称性を直接決定する研究を進めることができました。その原理(定式化)[1]については過去のニュースレターで執筆[2]させていただきました。また、大学院生にも恵まれ、当時大学院生だった中田(金井)惟奈氏(現立命館大学理工学部助教)によるSm³⁺化合物のLD-HAXPES [3]や現在関山研D2の濱本諭氏によるPr化合物のLD-HAXPES [4]について過去のニュースレターで本人が紹介する機会もありました。それらは今から見れば途中経過報告にもなっている感じですのでその先の報告を・・・Sm³⁺系については、現在も継続しており、首都大の松田達磨さん・東中隆二さん・青木勇二さんとの共同研究でSmPt₂Si₂のSm 3d内殻におけるLD-HAXPESの結果が得られつつありますが、これは将来別の機会に紹介できればと思います。

Pr化合物では、PrIr₂Zn₂₀(Γ₃結晶場基底), PrB₆(Γ₅結晶場基底)のLD-HAXPESに加えて北大の日高宏之さん・柳澤達也さん・網塚浩さんとの共同研究でPrBe₁₃のLD-HAXPESを行い、これがΓ₁基底であることを実証できました。これにより O_h ないしは T_d 対称下の立方晶Pr化合物で取りうる全ての結晶場基底状態についてLD-HAXPESを行い軌道対称性を反映した結果を得られました[5]。さらにPrBe₁₃のLD-HAXPES温度変化測定より第一励起状態が約70 K離れたΓ₄状態であることも(磁場などをかけない測定で)解明できました[6]。この他には東大物性研の鈴木博之さんとの共同研究により立方晶PrAg₂InのLD-HAXPESがΓ₃結晶場基底状態と矛盾しない結果も

得られました[7]。現在Pr化合物の本丸(?)とも言えそうなスクッテルダイトPrFe₄P₁₂, PrRu₄P₁₂のLD-HAXPESを首都大青木勇二さんとの共同研究として進めています。プレリミナリーな結果を見るとちょっと手強そうで、これも近い将来に別の機会で紹介できればと思います。

Yb化合物の進展としては理研(播磨)の久我健太郎さん(現豊田工業大学PD)・東大物性研の中辻知さんとの共同研究によるα-およびβ-YbAlB₄のLD-HAXPES [8]が挙げられます。これらの系はs偏光とp偏光での強度差で定義されるLDに方位角依存性が見られないことからYb³⁺ 4f結晶場基底状態としては4f軌道角運動量のz成分 $J_z = \pm 5/2$ の純状態になっていることがわかりました。この点でα-YbAlB₄とβ-YbAlB₄の違いはなく、結晶場基底状態が与える電荷分布がYbイオンからみて上下の層にあるBサイトに向いており混成に有利に働くことも確認できました。α-YbAlB₄とβ-YbAlB₄のLDの違いは僅かですが観測され、それが低温物性(基底状態)の違いを反映しているかもしれません。また60 Kと25 KでLDに変化はなく結晶場第一励起状態は60 Kより遥かに高いこともわかりましたが、これはこの物質が価数揺動系ともいえる局在から遠い電子状態にあることと矛盾しないと考えています。

さて、4f電子系のなかで歴史的にも研究蓄積の多いCe化合物でもLD-HAXPESは有効です。当初はCe 3d内殻光電子スペクトルでは"露わな"混成の効果によって生じるf⁰, f²終状態によってLDが得られるか不安でしたが、とにかく実験してみるべしと進めたら局在Ce³⁺成分に相当するf¹終状態成分でLDが明確に観測されました。右に圧力誘起の非従来型超伝導体(常圧での基底状態は反強

[1] A. Sekiyama, Y. Kanai, A. Tanaka and S. Imada, J. Phys. Soc. Jpn. 88, 013706 (2019).

[2] 関山明, 「J-Physics: 多極子伝導系の物理」ニュースレター第7号, p.22 (2019).

[3] 金井惟奈, 「J-Physics: 多極子伝導系の物理」ニュースレター第7号, p.90 (2019).

[4] 濱本諭, 「J-Physics: 多極子伝導系の物理」ニュースレター第5号, p.52 (2018); 第7号, p.93 (2018).

[5] S. Hamamoto *et al.*, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 238, 144685 (2020).

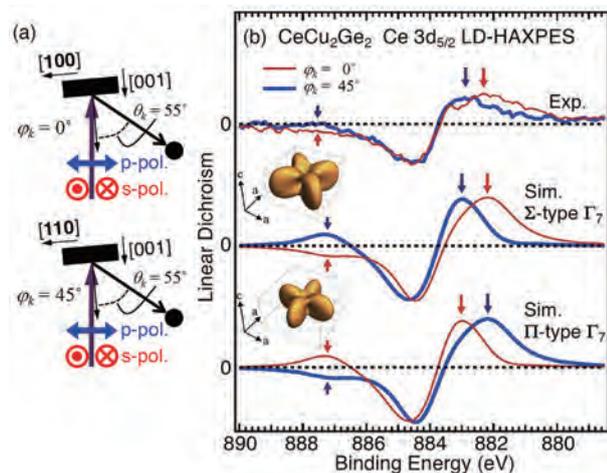
磁性)と言われる正方晶CeCu₂Ge₂についての結果[9]を示しますが、LDにYbAlB₄では見られなかった方位角φ_k依存性が見られました。つまりCe³⁺ 4f電子状態に結晶構造と対応した4回対称性があるというわけです。実験結果と、結晶場中イオン模型による結晶場基底状態

$$|\Sigma\text{-type } \Gamma_7\rangle = \sqrt{0.45}|\pm 5/2\rangle - \sqrt{0.55}|\mp 3/2\rangle \quad (1)$$

(ケット内の数字は4f電子の軌道角運動量のz成分J_z)によるLDの方位角φ_k依存性、および4f電荷分布形状はこれと同じものの電荷の伸びる向きが45°異なった結晶場基底状態

$$|\Pi\text{-type } \Gamma_7\rangle = \sqrt{0.45}|\pm 5/2\rangle + \sqrt{0.55}|\mp 3/2\rangle \quad (2)$$

によるLDの方位角依存性を比較すると、実験結果は883.5 eV以下の結合エネルギー領域における正のLD分布具合や887 eV付近のLDの大小関係という点でΣ-type Γ₇状



図(a) 正方晶CeCu₂Ge₂のLD-HAXPES測定におけるφ_k = 0°とφ_k = 45°における実験配置。入射X線と観測する光電子とのなす角度はいずれも60°。(b) CeCu₂Ge₂のCe 3d_{5/2}内殻光電子スペクトル線二色性(LD)の方位角φ_k依存性における実験結果(Exp.)と2種類の軌道対称性を仮定したときの理論計算(Sim.)との比較[9]。

態の計算でよく再現されることから、CeCu₂Ge₂のCe 4f結晶場基底状態は式(1)の波動関数になっていることがわかりました。内殻吸収分光の線二色性といった従来の手法では式(1), (2)による電荷分布の区別は原理的につけられなかったのですが、光電子線二色性では観測する光電子方向も測定パラメータの一つ(これも「角度分解」光電子分光の一つ、というよりもこちらの方が本当の意味での角度分解測定で、いわゆるARPESは実質波数分解測定と言えます)として自由度が増えることからこのような区別も可能になりました。決定できた4f電荷分布はGeサイトに向いておりGe 4spバンドとCe 4f軌道が混成しやすい形になっていると言えます。本研究進行とほぼ同時期にドイツのL.-H. TjengグループはLD-HAXPESと本質的に同じ情報が得られる非共鳴非弾性X線散乱(NIXS)を進め、この系で同様な結論を得ています[J.-P. Rueff *et al.*, Phys. Rev. B 91, 201108(R) (2015)]が彼らのCeCu₂Si₂の結果とも合わせると、今のところThCr₂Si₂型の超伝導体Ce化合物では共通してSiないしGeサイトを向いた4f軌道対称性が見られています。これがこの結晶構造あるいは量子臨界性を示す物質で普遍的に見られるか否かは、もしかしたら現実の系における量子臨界性に関わる重要問題になるかもしれないと期待しています。ただ、これには他の組成・化合物でも測定を進めていく必要があると感じており、この4年間の支援に感謝しつつ今後も引き続き研究を進めたいと思います。

[6] S. Hamamoto *et al.*, JPS Conf. Proc. **29**, 012010 (2020). (J-Physics 2019 International Conference)

[7] S. Hamamoto *et al.*, JPS Conf. Proc., in press (2020). (SCES2019)

[8] K. Kuga *et al.*, Phys. Rev. Lett. **123**, 036404 (2019).

[9] H. Aratani *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 121113(R) (2018).



多極子伝導物質の高品質単結晶化と 量子振動効果によるフェルミ面の研究

菅原 仁

神戸大学大学院理学研究科 教授

立方晶 $\text{CeCr}_2\text{Al}_{20}$ 型構造(空間群No.227, $Fd\bar{3}m, O_h^7$)の $\text{RM}_2\text{Al}_{20}$ (R: 希土類, M: Ti, V)において、 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ (四極子秩序を示す重い電子超伝導)や $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ (磁場に鈍感な重い電子系)が発見され注目されている[1-4]。最近、 $\text{NdV}_2\text{Al}_{20}$ (Nd系の重い電子系)の発見を機に[5]、同じNd系の $\text{NdTi}_2\text{Al}_{20}$ において2チャンネル近藤効果の可能性が理論的に示唆されている[6]。一方、同じ空間群に属する立方晶C15型ラーベス相構造(MgCu_2 型)の CeIr_2 は、電子比熱係数が約 $20 \text{ mJ/K}^2\text{mol}$ の重い電子超伝導体($T_c = 0.21 \text{ K}$)と報告されており[7]、また、高い量子効率を持つ陰極材料としても注目されている[8]。本研究ではこれらの物質のフェルミ面などの電子状態を調べるために、純良単結晶を育成し、最低温度約 30 mK 、最大磁場 17 T の範囲でドハース・ファンアルフェン(dHvA)効果測定を行なった。

$\text{RM}_2\text{Al}_{20}$ の単結晶育成は従来のAl自己フラックス法で行ない、室温と最低温度での残留抵抗比($\rho_{290\text{K}}/\rho_{0.5\text{K}}$)はそれぞれ 180 ($\text{LaTi}_2\text{Al}_{20}$)、 100 ($\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$)、 54 ($\text{NdTi}_2\text{Al}_{20}$)、 57 ($\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$)の純良単結晶が得られた。これらの電気抵抗の温度依存性の比較から、 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ と $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ は明らかに近藤効果的な振る舞いを示すが、 $\text{NdTi}_2\text{Al}_{20}$ はよく局在した通常の反強磁性体の振る舞いを示すことがわかった。また、 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ 、 $\text{NdTi}_2\text{Al}_{20}$ 、 $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ のdHvA振動数の角度依存性は比較物質の $\text{LaTi}_2\text{Al}_{20}$ と類似していることから、これらの物質の4f電子は基本的には局在していると考えられるが、dHvA振幅の温度依存性から見積もられた $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ と $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ のサイクロトロン有効質量は $\text{LaTi}_2\text{Al}_{20}$ と比べて約5~6倍重くなっているのに対して、 $\text{NdTi}_2\text{Al}_{20}$ では2倍程度しか重くなっていないことがわかった。 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ と $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ の近藤効果的な振る舞いの起源や、有効質量の違いと基底状態の関連について興味深い。

CeIr_2 に関しては、融点が約 3000°C の物質のため、テトラアーク炉を用いたチョクラルスキー(引き上げ)法で単結晶育成を行なった。比較物質の LaIr_2 も同様に作製し、初めて単結晶化に成功した。残留抵抗比はそれぞれ 18 (CeIr_2)と 85 (LaIr_2)であった。これらの純良単結晶を用いて初めてdHvA効果測定に成功し、フェルミ面を明らかにした。その結果、 CeIr_2 のフェルミ面は LaIr_2 と異なり、Ceの4f電子は伝導に寄与していることがわかった。また、バンド計算との比較から約 $12m_0$ (m_0 は電子の静止質量)の重い電子の存在が示唆された。実はこの物質は私が博士論文として研究していた物質であるが[7]、当時は純良な単結晶が得られずdHvA効果測定を諦めていた物質である。本研究により25年を経て目的を達成することができた。

本研究は、大政和之、吉永岳朗、兼吉潤、松岡英一、小手川恒、藤秀樹、播磨尚朝(神戸大)、仲村愛、本間佳哉、青木大(東北大金研)、佐藤大輔(産総研)、吉田光宏(KEK)、竹内徹也(阪大低温セ)各氏との共同研究である。

- [1] A. Sakai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 083702 (2012).
 [2] K. Matsubayashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 187004 (2012).
 [3] R. Higashinaka *et al.*, J. Phys. Soc., **80**, 093703 (2011).
 [4] A. Sakai and S. Nakatsuji, Phys. Rev. B **84**, 201106(R) (2011).
 [5] T. Namiki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 073706 (2016).
 [6] T. Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 083704 (2017).
 [7] H. Sugawara, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **63**, 1502 (1994).
 [8] D. Satoh, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SIIB10 (2019).



価数転移に由来する新しい量子現象

渡辺 真仁

九州工業大学 大学院工学研究院 基礎科学研究系 准教授

価数転移に由来する新しい量子現象を理論的に明らかにすることを目的として、この2年間以下のような研究に取り組んできた。

1. 奇パリティ結晶場における電荷移動効果[1,2]
2. 周期結晶と準結晶における普遍的な量子臨界現象の出現機構[3]
3. $\text{Yb}_{15}(\text{Au}_{1-x}\text{Cu}_x)_{51}(\text{Al}_{1-y}\text{Ga}_y)_{34}$ におけるYbの価数の格子定数依存性[4]
4. 磁気量子臨界点近傍の磁気体積効果の理論的枠組みの構築[5,6]
5. 価数転移の量子臨界点近傍の臨界体積効果の理論的枠組みの構築[7]
6. 量子臨界準結晶における発散しないグリユナイゼンパラメーターの出現機構 [7]
7. $\alpha\text{-YbAl}_{0.986}\text{Fe}_{0.014}\text{B}_4$ における μSR の動的緩和時間の温度依存性 [8]
8. Ce希釈系 $[\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{Cu}_{5.62}\text{Au}_{0.38} (x=0.01-0.02)]$ における価数量子臨界性の出現と異常な電気抵抗の温度依存性 [9]

1.では奇パリティの結晶場において電荷が移動することにより生じる新しい現象の開拓を行った。注目した物質は $\beta\text{-YbAlB}_4$ で、この物質が示す非従来型の量子臨界現象と磁化率の T/B スケールリング則は、Ybの臨界価数ゆらぎの理論によって統一的に説明されることが示されている[10,11]。 $\beta\text{-YbAlB}_4$ ではYb原子の周りにB原子が7角形に配置しているためYb原子位置で局所的に空間反転対称性が破れているので、奇パリティの結晶場が発生している。混成描像に基づいて結晶場の解析を行った結果、Ybの4f電子と5d電子の波動関数が純虚数の係数を通じてオンサイトで混成し、電気双極子や磁気トロイダル双極子の自由度が活性となることがわかった。さらに、Ybサイトの4f-5d電子間の斥力の効果により、4f電子と5d電子の電荷移動のゆらぎの効果が増大し、価数転移の量子臨界点において、価数ゆらぎが発散すると同時に電気双極子ゆらぎと磁気トロイダル双極子ゆらぎも発散的に増大することがわかった[1,2]。

2.では周期結晶 $\beta\text{-YbAlB}_4$ と準結晶 $\text{Yb}_{15}\text{Au}_{51}\text{Al}_{34}$ に共通する量子臨界現象がYbの臨界価数ゆらぎの効果によって

説明されることを理論的に示した[3]。

最近、準結晶 $\text{Yb}_{15}\text{Au}_{51}\text{Al}_{34}$ のAuとAlを同族元素のCuとGaで系統的に置換した試料が作成され、室温でのYbの価数 ν の格子定数 a 依存性が測定された[注1]。興味深いことに量子臨界性を示す準結晶 $\text{Yb}_{15}\text{Au}_{51}\text{Al}_{34}$ は ν - a プロットにおいて価数がシャープに減少し始める点に位置していることが観測された[12]。この結果は1/1近似結晶 $\text{Yb}_{14}\text{Au}_{51}\text{Al}_{35}$ の拡張周期アンダーソン模型に基づいた価数量臨界点近傍のYb価数の格子定数依存性の計算結果と整合することがわかった[4]。これらの事実は、準結晶の系でもYbの価数量子臨界点が発現していることを示唆している。

磁気相転移に伴い、物質の体積が変化する現象を磁気体積効果とよぶ。遍歴電子系における磁気量子臨界点近傍の磁気体積効果の理論的枠組みを、スピンゆらぎのSCR理論に基づいて構築した[5,6]。

上記の枠組みをふまえて、価数転移の量子臨界点近傍の臨界体積効果の理論的枠組みを構築した[7]。この枠組みに基づいて、量子臨界準結晶 $\text{Yb}_{15}\text{Au}_{51}\text{Al}_{34}$ で観測された、降温につれて発散しないグリユナイゼンパラメーター $|\Gamma(T)|$ の機構を明らかにした[7]。

7.では $\alpha\text{-YbAl}_{0.986}\text{Fe}_{0.014}\text{B}_4$ において0.1 K以下で μSR の動的緩和時間 $\lambda \sim 1/T_1$ が価数量子臨界性を示す機構を明らかにした[8]。

8.ではCe希釈系でも価数量子臨界性が出現し、電気抵抗率に特異な温度依存性が現れる機構を明らかにした[9]。

本稿の内容は、三宅和正氏との共同研究の成果に基づいている。

[注1] 6次元空間における格子定数 $a \equiv a_{6D}$

-
- [1] S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 033701 (2019).
[2] S. Watanabe and K. Miyake, JPS Conf. Proc. **29**, (2020) 014001.
[3] S. Watanabe and K. Miyake, to appear in JPS Conf. Proc. (2020) (arXiv:1910.11466).
[4] S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys.: Condens. Matter **30**, 184001 (2018).
[5] S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 034712 (2018).
[6] S. Watanabe and K. Miyake, Phys. Rev. B **99**, 035108 (2019).
[7] S. Watanabe and K. Miyake, Solid State Commun. **306**, 113774 (2020).
[8] K. Miyake and S. Watanabe, Phys. Rev. B **98**, 075125 (2018).
[9] K. Miyake and S. Watanabe, to appear in JPS Conf. Proc. (2020).
[10] S. Watanabe and K. Miyake, Phys. Rev. Lett. **105**, 186403 (2010).
[11] S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 103708 (2014).
[12] 佐藤憲昭, 出口和彦, 井村敬一郎, 日本物理学会誌 **74**, 774 (2019).



SmおよびEu化合物に見る 価数揺動系の物理とその発展

椎名 亮輔

琉球大学理学部

当領域において、公募研究として前後半足掛け4年間サポートいただき、まずはお礼申し上げます。その間、主にSmやEu化合物などの中間的希土類系で見られる価数揺動に関する理論的取り組みを継続的に進めてまいりました。本稿では、その成果を簡単にまとめてみたいと思います。

まずはSm系の「磁場鈍感重い電子現象」です。当初は、非調和格子振動(ラットリング)に基づく現象で、Sm系であることは本質的でないと考えられた時期がありました。しかしながら、近年の1-2-20系の研究を通じて、Sm化合物のなかに類似現象が複数見つかリ、その出現要因が4f電子状態にあることがはっきりしてきた経緯があります [1]。

Smは化合物中で、4f電子配位により2価あるいは3価のイオン状態をとります。3価の場合は f^6 配位で $J=5/2$ の磁性状態となり、伝導バンドとの混成が強ければ近藤状態の形成が予想されます。一方2価では、6個のf電子による $J=0$ の多体一重項状態が基底となることが知られています。

中間価数領域を調べるため、Sm系の特徴を反映したアンダーソン模型の数値くり込み群法による解析を行ってきました [2-4]。それにより、整数価数での安定状態が中間価数領域において競合的になり、2状態間の量子転移が生じることが確認されました。その量子転移近傍の広い領域で、電子比熱および帯磁率の計算から一種の磁場鈍感重い電子状態が実現し、それが現実のSm化合物の実験結果と良く整合することが明らかになりました。

Euも化合物中では2価あるいは3価となりますが、4f状態の観点では、 Eu^{3+} が Sm^{2+} と等価で f^6 配位の非磁性状態である一方、 Eu^{2+} は f^7 配位で $S=7/2$ の純粋スピン状態となり、Smとは明確に異なっています。このため、Eu系では局在近傍での近藤効果は予想できず、実際2価Eu系はほ

ぼ全てスピン秩序を示します。近年、こうした整数価数状態を、圧力や元素置換により中間価数へとシフトさせることで量子臨界現象や重い電子状態が出現することが実験的に示され、その機構に興味もたれています。

我々はごく最近、 Eu^{3+} の非磁性状態から出発し、遍歴・局在の2種類のf電子からなる比較的シンプルな有効模型を用いて、価数ゆらぎによる磁気秩序の発生機構を調べました [5]。それによれば、磁性・非磁性の相境界はf電子間のフント結合に依存して大きく変化し、フントが大きい領域では価数ゆらぎが磁性と協力的に、小さい領域では競合的になることが分かりました。こうした結果は、圧力効果や置換実験において、物質により磁気転移温度が多様な変化を示すことと対応すると考えられます。また、中間価数領域での秩序状態の安定化において、 f^6 配位での励起3重項($J=1$)の存在が極めて重要であることも明らかになりました。

以上まとめると、中間的希土類系に特有の電子物性に焦点を当てた理論解析を行ってきました。その際の着眼点は、Sm2価およびEu3価に共通して現れる f^6 配位が、単純な非磁性状態ではなく、多電子による一重項基底であることです。この f^6 一重項が、価数揺らぎを通じて示す新規物性の一端を明らかにすることが出来たと考えています。それらに関連して、中間価数領域におけるSm系での秩序化現象やEu系での重い電子現象などの解明は、今後に残された重要な課題でもあります。

[1] R. Higashinaka et al., AIP Advances 8, 125017 (2018).

[2] R. Shiina, J. Phys. Soc. Jpn. 87, 014702 (2018).

[3] R. Shiina, AIP Advances 8, 101301 (2018).

[4] 椎名亮輔, J-Physics ニュースレター Vo. 7, 18 (2019).

[5] R. Shiina, J. Phys. Soc. Jpn. 88, 113705 (2019).



フラストレーション系の 量子スピネマティック相と 新奇伝導の理論的・計算科学的研究

坂井 徹

兵庫県立大学物質理学研究科 教授 / 量子科学技術研究開発機構SPRING-8 グループリーダー

1. はじめに

近年、従来の強磁性あるいは反強磁性長距離秩序(図1)のように、スピンの向きまでは決まらないが、方向だけが秩序化した液晶のような「スピネマティック相」(図2)が提唱され、秩序相と量子スピン液体相の中間の現象としてホットな話題となっている。

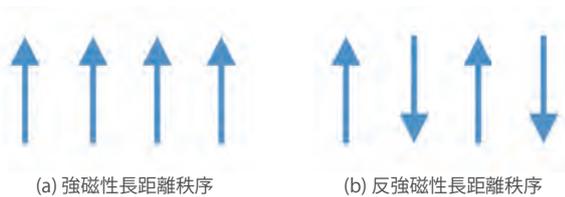


図1. 従来の(a)強磁性、(b)反強磁性長距離秩序

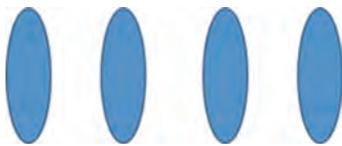


図2. スピネマティック秩序

従来の長距離秩序相では、2体のスピン相関関数が

$$\langle S_0^z S_r^z \rangle \sim m^2 \neq 0 \quad (r \rightarrow \infty)$$

のように、無限遠方で秩序を持つのにに対し、スピネマティック相では、2体のスピン相関関数はゼロになるが、以下のような4体のスピン相関関数が

$$\langle S_0^z S_1^z S_r^z S_{r+1}^z \rangle \sim m^4 \neq 0 \quad (r \rightarrow \infty)$$

のように秩序を持つことにより特徴づけられる。これはスピン系の四極子秩序に対応しており、多極子系の物理を対象とする本新学術領域において、重要な研究対象となることから、本研究ではこのスピネマティック相を実現する物質を理論的に探索することを目的とした。

2. スピネマティック相の候補物質

数値的厳密対角化と有限サイズスケールリングの手法により、本研究期間において、未発表のものも含めて以下のような系でスピネマティック相が実現する可能性が示された。

- (1) 容易軸異方性のある $S=1$ スピンラダー系[1]
- (2) 強磁性・反強磁性相互作用を持つ $S=1/2$ スピンラダー系[2]
- (3) 容易軸異方性のある $S=1/2$ スピンラダー系
- (4) 容易軸異方性のある $S=1/2$ ボンド交代鎖系
- (5) リング交換相互作用のある $S=1/2$ 三本鎖スピンチューブ系[3]

(6) リング交換相互作用のある $S=1/2$ スピンラダー系
(7) フラストレーションのある $S=1/2$ スピンラダー系
このうち(5)(6)(7)については、メカニズムがまだ未解明である。(1)の候補物質としては有機磁性体BIP-TE-NO、(3)はスピンラダー系IPA-CuCl₃、(5)は3本鎖スピンチューブ系[(CuCl₂tachH)₃Cl]Cl₂などが知られており、今後の実験的検証に期待がかかる。

3. おわりに

最後に、本研究をサポートしていただいた本新学術領域の関係者のみなさんに感謝したい。

[1] R. Yamanokuchi, K. Okamoto and T. Sakai, Proceedings of 16th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics 2018.

[2] T. Tonegawa, T. Hihikara, K. Okamoto, S. C. Furuya, and T. Sakai, J. Phys. So. Jpn. **87**, 104002 (2018).

[3] T. Sakai, to appear in JPS Conference Proceedings



多極子を含む局所電荷分布の揺らぎ

水戸 毅

兵庫県立大学 物質理学研究科 教授

中井 祐介

兵庫県立大学
物質理学研究科

私たちの研究グループでは、 f 電子系を中心に、多極子を含む電荷分布の静的、動的状態を如何にして観測するかを研究してきました。その対象物質の一つがYbPdで、 $T_a = 125$ Kと $T_b = 105$ Kにて価数と構造の変化を伴う逐次転移を示します。私達は ^{105}Pd -核磁気共鳴(NMR)測定を行い、 T_a 以下で結晶対称性の低下を示す実験証拠(立方晶構造の T_a 以上では働かない核四重極相互作用が、 T_a 以下で有限になる)を得ました。また、フェルミエネルギー近傍の状態密度が T_a 以下で顕著に減少することも、核スピン格子緩和率 $1/T_1$ の測定から明らかにしました。特筆すべき点は、 T_a 直上で $1/T_1$ の臨界発散が観測されたことで、この異常は価数転移(つまり、価数に関係した低エネルギー揺らぎの発達)に起因していると考えられます。 T_a での構造相転移を伴う一次の価数転移の底流に、実は二次相転移的な相関の発達が存在するというのは非常に面白いと思います。先述の状態密度に関する知見と考え合わせ、 T_a での相転移はフェルミ面と価数の二つの不安定性が引き起こす転移であると結論されました[1,2]。

次に、典型的な反強四極子(AFQ)物質であるCeB₆の研究について記します。この物質のAFQ秩序が現れる相(II相)では、磁場中で O_{xy} 型の秩序変数を示すと理解されていますが、II相のゼロ磁場下での状態については実験的情報が乏しくよく分かっていません。私たちは、世界で初めてCeB₆の ^{11}B -核四重極共鳴(NQR)信号の観測に成功し、その温度依存性を調べたところ、 O_{xy} 型AFQ秩序構造ではB原子が非等価な3サイトに分裂するはずが、それに対応する変化が実験精度内で観測されませんでした。そこで、本研究期間中は極弱磁場下での ^{11}B -NMR

測定を集中的に行いました。AFQ秩序状態に磁場を印加するとBサイトに二次的な内部磁場(八極子成分)が誘起されるので、その磁場依存性 $dH(H)$ を調べたのです。まず、粉末試料を用いて最低測定周波数0.68 MHz(磁場約0.05 Tに対応)までの ^{11}B -NMR測定を可能にし、続いてTakigawaらによる単結晶試料の ^{11}B -NMR測定結果[3]を参考にして粉末スペクトルの解析を行ったところ、印加磁場 ~ 0.05 Tで $dH(H) \sim 0$ となることが分かりました。以上の ^{11}B -NMRと先述の ^{11}B -NQR測定の結果を総合すると、II相のゼロ磁場近傍は0.1 T以上とは異なる状態にあると考えられます。その可能な解釈の一つは、AFQがNMR/NQRの測定周波数よりも早い時間スケールで動的に揺らいでいると考えることです。例えば、立方晶構造のCeB₆では O_{xy} 、 O_{yz} 、 O_{zx} の間で揺らぎ残存し、静的な秩序に至っていない可能性があります。これは通常のドメイン構造とは区別されるべきものです。その他、四極子よりも高次の多極子秩序が関係している可能性も否定できず、新しい研究の場を提供するものと期待します[4]。

[1] R. Nakanishi *et al.*, arXiv:1902.06367 (2019).

[2] Y. Nakai, *et al.*, JPS Conf. Proc. (to be published).

[3] M. Takigawa, Doctoral thesis (1982).

[4] T. Tanaka, *et al.*, JPS Conf. Proc. (to be published).



新たな非クラマース二重項系の 多極子物性とその圧力効果

脇舎 和平

横浜国立大学 大学院工学研究院 助教

梅原 出

横浜国立大学
大学院工学研究院 教授

松林 和幸

電気通信大学 大学院
情報理工学研究科 准教授

郷地 順

東京大学
物性研究所 助教

上床 美也

東京大学
物性研究所 教授

2018年度から2年間、標記の課題について公募研究として採択していただきました。本稿では、研究背景と得られた成果について述べていきたいと思います。

立方晶 $\text{PrT}_2\text{X}_{20}$ (T : 遷移金属, $X = \text{Zn}, \text{Al}$)では、結晶場基底状態が電気四極子と磁気八極子の自由度のみをもつ非クラマース Γ_3 二重項となっています。これまでに、四極子近藤効果による非フェルミ液体状態や圧力誘起重い電子超伝導など、様々な興味深い現象が報告されてきました [1]。これらの現象は、 $4f$ 電子の電気四極子と伝導電子の強い混成効果から生じていることが指摘されています [1]。一方、非クラマース二重項基底状態と強い混成効果を合わせもつ化合物は $\text{PrT}_2\text{X}_{20}$ 以外になく、新たな非クラマース系化合物の開発が依然重要な課題として残されていました。

この課題を解決するため、我々の研究グループでは構造相転移を示す同型化合物 $\text{PrRu}_2\text{Zn}_{20}$ に着目しました [1]。これまでに、 $\text{PrRu}_2\text{Zn}_{20}$ の16cサイトのZn原子[Zn(16c)]を選択的にSnに置換することで新物質 $\text{PrRu}_2\text{Sn}_2\text{Zn}_{18}$ の合成に成功しました。さらにSn置換により構造相転移が抑制され、2 Kまで非クラマース二重項が保たれていることを明らかにしました [2]。

本研究課題では、以上の結果を踏まえ以下の2点に重点を置いて研究を行ってきました。

- (1) $\text{PrRu}_2\text{Sn}_2\text{Zn}_{18}$ の低温・圧力下物性測定
- (2) $\text{PrRu}_2\text{Sn}_2\text{Zn}_{18}$ 以外の同型化合物の探索

まず(1)について、 $\text{PrRu}_2\text{Sn}_2\text{Zn}_{18}$ が多極子秩序を示すか調べるため、2 K以下で比熱・電気抵抗を測定しました。 $T_0 = 1.9$ Kで相転移による比熱の跳びと電気抵抗の折れ曲がり観測され、さらに T_0 の磁場依存性から、この相転移

が強四極子秩序である可能性が高いことが判りました。また、電気抵抗の圧力依存性は、 $\text{PrT}_2\text{Zn}_{20}$ よりも混成効果が強いと考えられている $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ と比較的よく似ていることも明らかになりました [3]。 $\text{PrRu}_2\text{Sn}_2\text{Zn}_{18}$ に圧力12 GPaを加えた場合と $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ に2~4 GPa程度の圧力を加えた場合の電気抵抗の温度依存性がよく一致しているため、 $\text{PrRu}_2\text{Sn}_2\text{Zn}_{18}$ は $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ と比べると、 $4f$ 電子と伝導電子の混成が弱い化合物として理解できると考えています。

次に(2)について、 $\text{PrRu}_2\text{Zn}_{20}$ のZn(16c)をInに置換した $\text{PrRu}_2\text{In}_2\text{Zn}_{18}$ の合成を試みました。単結晶構造解析から、Inを選択的に16cサイトに置換可能であることを確認しました [4]。さらに、磁化・比熱測定から、非クラマース二重項が結晶場基底状態であることを明らかにしました。また、同型構造をもつCe化合物を合成し物性を調べると、In置換系でもSn置換系と同程度の混成強度が期待されることも判りました。これらの結果から、 $\text{PrRu}_2\text{In}_2\text{Zn}_{18}$ においても、2 K以下で多極子と伝導電子の混成が絡んだ物性が発現すると期待されます。

以上のように、 $\text{PrRu}_2\text{X}_2\text{Zn}_{18}$ ($X = \text{In}, \text{Sn}$)は、 $\text{PrT}_2\text{X}_{20}$ の $X = \text{Zn}$ 系とAl系の中間程度の混成効果をもつ非クラマース二重項系であることが判りました。今後、 $\text{PrRu}_2\text{X}_2\text{Zn}_{18}$ と $\text{PrT}_2\text{X}_{20}$ の類似点・相違点を詳細に調べることで、非クラマース二重項系における多彩な多極子物性を統一的に理解するための重要な手がかりが得られると考えています。

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

[2] K. Wakiya *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **86**, 034707 (2017)

[3] K. Matsubayashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 187004 (2012)

[4] T. Komagata *et al.*, JPS conf. proc. In press



U(Rh_xRu_{1-x})₂Si₂の強磁場相における 整合—非整合転移と隠れた秩序

野尻 浩之

東北大学金属材料研究所 教授

木原 工

東北大学金属材料研究所
助教

青木 大

東北大学金属材料研究所
教授

桑原 慶太郎

茨城大学理工学研究科
教授

本研究では、長年にわたり解明が待たれてきたU(Rh_xRu_{1-x})₂Si₂の強磁場相について、パルス磁場中性子回折を中心とした実験により、Rh濃度依存性を含めて明らかにした。その結果、強磁場相は2種類あり、Rh濃度が3%程度を境に、低濃度側の非整合相から高濃度側の整合相に転移することを確定した。この結果は、これまで、Rh低濃度領域で共通してII相と呼ばれて来た相が、濃度によって異なる2つの相からなっていることを意味する。また、強磁場領域の整合—非整合相転移は、零磁場における隠れた秩序の消滅と対応している。

U(Rh_xRu_{1-x})₂Si₂, x=0の非整合相: 磁化過程には、磁場上昇時だけ現れる飽和磁化に対する磁化の比M/M_s ~0.37の準安定相と安定相のM/M_s=0.6の2相あるが、温度2Kでは、いずれもQ_a~0.6の非整合相である[1]。サテライトが観測されないことから、変調はサイン波的なスピン密度波状態であると考えられる。格子変調については、分解能の範囲で見られない。また、逐次相転移において磁気波数はシフトせず、強度だけが変わることから、2つの相で磁気波数は共通である。一方、温度を4.2~5 K程度に上げると、磁気ピークはa*軸方向に広がり、複数の波数に分解するように見える。この温度変化は、磁化過程に現れる準安定状態と関連があると思われるが、完全な対応は付いていない。

U(Rh_xRu_{1-x})₂Si₂, x=0.02の非整合相: x=0では、磁場上昇時だけ見られたM/M_s ~0.37とM/M_s=0.6の両方が安定相として見られる。磁気波数は、Q_a~0.62とやや大きくなるが、x=0と同様、波数は2相で共通で、高調波成分は見られない[2]。また、整合相の波数Q_a~0.66や磁化の値を説明出

来る主な磁気波数には強度がないことから、x=0, 0.02は共通して非整合スピン密度波状態にあると結論付けられる。準安定相がRhドーピングにより安定相になることから、Q_a~0.6の磁気秩序は、少なくとも2つの非常に近い磁気波数の競合の下で実現しており、RhドーピングによりQ_aが大きくなるのがM/M_s ~0.37の安定化の原因である。スピン密度波であるにも関わらず磁化が2段になることは、この波数の競合によると思われるが、異方性との競合も考慮する必要がある。

U(Rh_xRu_{1-x})₂Si₂, x=0.04の整合相: さらに、Rhのドーピングを増やして、0.04%にすると、Q_a=2/3の整合相が出現する[3]。この整合相は、より高濃度のx=0.08でも確認されている。これらの研究により、Rhドーピングにより非整合—整合相転移が起こることが判った。この転移をもたらすフェルミ面の変化を明らかにすること、Feなど他のドーピングにより、統一的な理解を得ることが今後期待される。

謝辞:本研究は、W. Knafo, F. Duc, F. Bourdarot, P. Karel氏他多数の方々との共同研究である。

[1] W. Knafo *et al.* NATURE COMMUNICATIONS (2016) 13075, Physica B: Condensed Matter 536 (2018) 457-460.

[2] In preparation

[3] K. Kuwahara, K. *et al.* Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 216406.



Sr₂RuO₄の超伝導パリティ問題への取り組み ～ 研究手法の発展に伴う新展開 ～

橘高 俊一郎

東京大学 物性研究所 助教

公募班に加わってからあつという間の2年間で過ぎようとしています。同時に、長年お世話になった物性研究所の助教としての任期も残り僅かとなりました。幸いにも次のポストが見つかり、2020年4月から新天地で研究室を立ち上げる予定です。2019年11月には、第14回凝縮系科学賞(実験部門)を受賞する栄誉に恵まれました(冒頭の写真は表彰式でのものです)。本領域研究でも多くの方々にお世話になりました。この場をお借りして御礼申し上げます。この2年間は、様々な共同研究を行う機会にも恵まれました。興味深い研究成果も複数得られておりますが、本稿では個人的に思い入れのあるSr₂RuO₄の最近の研究の進展についてご紹介したいと思います。

私は学生時代に京大・前野研でSr₂RuO₄を相手に研究のイロハを学び、その奥深さに魅了されて研究者の道に進みました。いわば恩師のような存在です。2004年(私が学部4回生のとき)に発表された出口氏らによるSr₂RuO₄の磁場角度分解比熱測定の論文[1]を読んで、「いつか自分もこんな研究がしたい!」と思ったことがつい先日のようです。物性研時代は、正にやりたかった研究に没頭することができ、磁場角度分解比熱測定から様々な重い電子系超伝導体のギャップ構造の解明に挑んできました[2]。その結果、本手法を用いた超伝導ギャップ構造の研究も実験と理論の両面で成熟し、10年以上の時を経てSr₂RuO₄のギャップ構造を再検証する必要があるのではないかと考えるようになりました。2004年当時と比べれば、上部臨界磁場の制限に伴う超伝導一次相転移が発見され[3]、有力とされてきたスピン三重項超伝導シナリオに疑問を呈する実験事実も出ていました[4]。そこで、0.06 Kの極低温で精密に比熱の磁場依存性を測定した

ところ、低磁場で $H^{1/2}$ に比例する振る舞いを観測しました。本結果は、超伝導ギャップにノードが存在することを示すものです。さらに、0.06 Kまで比熱の ab 面内磁場角度依存性を調べた結果、 H_{c2} 近傍を除いて4回対称の比熱振動[1]が符号反転を起こさないことを見出しました[5]。この振る舞いは、 $d_{x^2-y^2}$ 波超伝導体であるCeCoIn₅の結果[6]とは対照的で(縦のラインノードに起因する比熱振動であれば、低温・低磁場で符号反転することが期待される)、ギャップの異方性だけでは説明することが困難です。そこで、フェルミ速度 v_F の異方性の効果まで取り入れた微視的理論計算結果と比較し、 v_F の異方性が大きいバンド(γ バンド)に水平状のラインノードが備わっていれば測定結果を良く説明できることを指摘しました[5]。この水平ラインノードの存在は D_{4h} 対称性におけるスピン三重項超伝導では通常期待できないため、スピン一重項超伝導の可能性の方が有力です。

その後、パルス出力を極力抑えたNMRナイトシフトの実験から超伝導状態でスピン磁化率が実は減少していることが判明し[7,8]、Sr₂RuO₄の超伝導パリティ問題は大きな転換期を迎えています。このパラダイムシフトのキーパーソンの一人名であるA. P. Mackenzie氏の回想録[9]には、その経緯が詳しく述べられています。『科学的な見解に相違があってもお互いを尊重して建設的な議論を積み重ね、そして協力して真実を追求する』という理想的な研究コミュニティの姿がそこにはありました。胸が熱くなる内容でした。J-Physicsも負けず劣らずの素晴らしい研究コミュニティが育っていると思います。私もその一員として今後も分野の発展に貢献できるよう努めていく所存です。皆様、これからもどうぞよろしくお願い致します。

- [1] K. Deguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 047002 (2004).
 [2] T. Sakakibara *et al.*, Rep. Prog. Phys. **79**, 094002 (2016).
 [3] S. Yonezawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 077003 (2013).
 [4] S. Kittaka *et al.*, Phys. Rev. B **90**, 220502(R) (2014).
 [5] S. Kittaka *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 093703 (2018).
 [6] K. An *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 037002 (2010).
 [7] A. Pustogow *et al.*, Nature **574**, 72 (2019).
 [8] K. Ishida *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 034712 (2020).
 [9] A. P. Mackenzie, J. Supercond. Nov. Magn. **33**, 177 (2020).



5dパイロクロア酸化物 $Cd_2Re_2O_7$ の電気トロイダル四極子秩序相におけるドメイン制御

平井 大悟郎

東京大学 物性研究所 助教

<p>田島 聖士 東京大学 物性研究所 M2</p>	<p>廣井 善二 東京大学 物性研究所 教授</p>	<p>木下 雄斗 東京大学 物性研究所 特任助教</p>
<p>徳永 将史 東京大学 物性研究所 准教授</p>	<p>秋葉 和人 岡山大学 自然科学研究科 助教</p>	<p>小林 達生 岡山大学 自然科学研究科 教授</p>

2015年にL. Fuは、スピン軌道相互作用(SOI)によって駆動される相転移の可能性を指摘しました[1]。SOIが強く働き結晶構造に空間反転対称性がある金属では、スピン縮退を解こうとするフェルミ面の不安定性が生じ、自発的に反転対称性を破る相転移が起こる可能性があります。このような新しいタイプの相転移が起こる有力な候補物質として5dパイロクロア酸化物 $Cd_2Re_2O_7$ が注目されています。 $Cd_2Re_2O_7$ は高温相(I相)では通常のパイロクロア構造である立方晶の構造($Fd\bar{3}m$)をもつパウリ常磁性金属です。温度を下げていくと、 $T_{s1} = 200$ Kにおいて正方晶($I4m2$)のII相へと空間反転対称性の破れを伴う二次の相転移を示し、さらに温度を下げると $T_{s2} = 120$ Kで一次相転移によって、異なる正方晶($I4_122$)のIII相へと転移します[2]。この T_{s1} がL. Fuの提案した相転移に対応すると考えられ、パウリ常磁性磁化率が大きく減少することから、電子構造に大きな変化が生じていることが分かっています。このような新奇な相転移によって形成される電子相もまた特異なものとなります。北海道大(現東京大)の速水さんたちは拡張多極子という視点から $Cd_2Re_2O_7$ の低温相の電子相を分類し、電気トロイダル四極子(ETQ)という多極子秩序が形成されていることを指摘しました[3]。この電子秩序においては、磁気電流効果や磁場下で非相反な輸送特性といった特異な物性が期待されます。

このように理論研究が大きく進展するなか、私たちは $Cd_2Re_2O_7$ で形成される特異な電子相の本質を明らかにするため、低温で形成されるドメイン構造の制御に取り

組みました。 $Cd_2Re_2O_7$ では相転移に伴い、立方晶の $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$, $\langle 001 \rangle$ 方向にc軸を取る3つの自由度と2種類の反転対称の破れ方の、合わせて6種類のドメインが形成されます。これらのドメインがランダムに形成されると、電子系の秩序によって生じた異方性や磁気電流効果のシグナルが平均化されたり、打ち消されたりします。

そこで、本質的な物性を明らかにするために、私たちは応力によるドメイン整列を行いました。ピエゾ素子を使うことで、印加電圧の正負によって簡単に「引っ張り」と「圧縮」の歪を誘起することができます。薄く整形した試料(約50 μm)をピエゾ素子に張り付け、偏光顕微鏡によりドメイン構造の変化を観察しました。偏光顕微鏡では反転対称性の異なるドメインは区別できないので、歪を加えていない時は、3種類の正方晶ドメインのみ区別できます。図1上図に示すように、II相でもIII相でも、水平と斜め45度のドメイン境界ができ、確かに3種類のドメインが形成されていることがわかります。ここに1軸の圧縮(中段)と引っ張り(下段)歪を加えると、ドメイン境界は大きく変化します。II相では、圧縮で水平な境界ができ、引っ張りで境界が消失します。これは、c軸長がa軸長よりも長く、引っ張り歪でc軸が歪の方向にむいたドメインだけが選択されるためです。逆に、圧縮すると歪の方向にa軸がそろった2つのドメインが選択され、水平方向の境界が現れます。一方、III相では振る舞いが逆転します。圧縮でドメイン境界がなくなり、引っ張りでは水平な境界が現れます。この振る舞いは、 T_{s2} においてa軸とc軸の大小関係が逆転するという $Cd_2Re_2O_7$ の特異な振る舞

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

[2] Z. Hiroi et al., J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 024702 (2018).

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

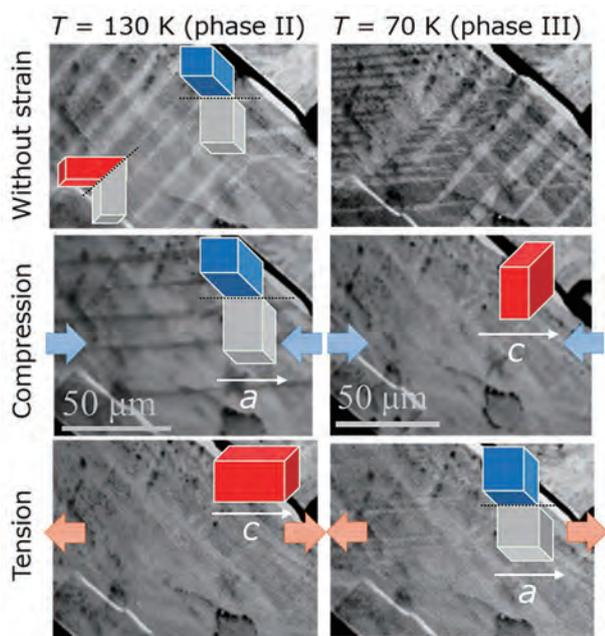


図1. Cd₂Re₂O₇のピエゾ素子を使った1軸歪によるドメインの整列。II相(130 K)とIII相(70 K)においてドメイン整列を実現した。

いに起因しています。つまり、III相ではa軸長がc軸長よりも長いため、歪への応答が逆転するのです。実は、Cd₂Re₂O₇の正方晶歪は極めて小さいため、今回のドメインの観察で初めて正方晶歪の逆転現象が明らかになりました。このドメイン整列させた結晶を使い、電気抵抗率の異方性を測定しました。図2のように、II相でもIII相でも二割を超える抵抗率の異方性が観測されました。これは構造の歪が小さいことと対照的で、Fermi面が大きく変形していることを示唆します。また、 T_{s2} において抵抗率の異方性が反転しており、ETQの成分がスイッチすることと対応しているのかもしれませんが。このように、ドメインをそろえることでCd₂Re₂O₇の本質的な物性が明らかになってきました。今後、他の測定でもドメインをそろえた試料を用いることで、これまで得られなかった情報が得られると考えています。

現在、北海道大学 網塚先生のグループとの共同研究で、電流によって誘起される磁化の観測にも取り組んでいます。このシグナルは、Fermi面のスピン分裂と直結しているため、様々な電流方位でのシグナルを測定すること

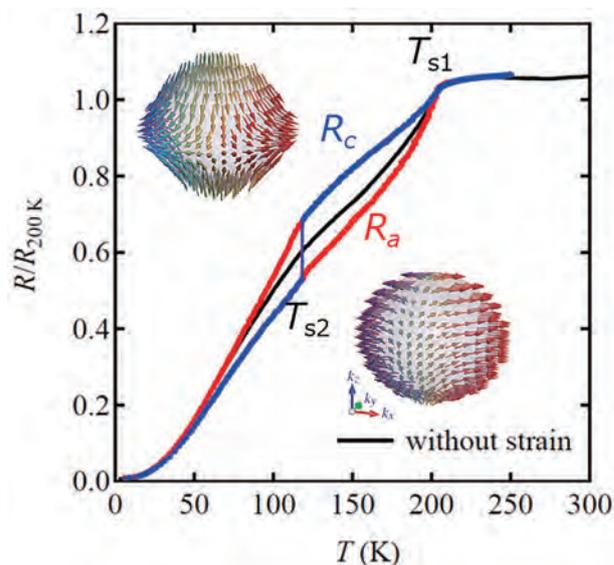


図2. ドメイン整列した結晶の抵抗率の温度依存性。インセットにETQ相で形成されるスピン分裂したFermi面[3]を示した。

で、ETQが実験的に明かにできるはずですが。また、新学術領域を通じて多くの先生方と共同研究を行っています。Cd₂Re₂O₇は非常に魅力的であり、同時にややこしい物質ですが、多角的な測定によってその裏に隠れている新しい物理が見えてくると期待しています。



ワイル超伝導とネマティック・トポロジカル超伝導の電磁応答・熱応答・幾何学的応答

藤本 聡

大阪大学基礎工学研究科 教授

水島 健

大阪大学基礎工学研究科
准教授

鶴田 篤史

大阪大学基礎工学研究科
助教

多田 靖啓

東京大学物性研究所
助教

ウラン系超伝導体には UPt_3 , $U_{1-x}Th_xBe_{13}$ 等、印加磁場、組成、温度等の変化に応じて多重超伝導相を示すものがあることが知られています。近年の研究の進展により、これらの超伝導相ではトポロジカル超伝導状態、ワイル超伝導状態、ディラック超伝導状態と呼ばれるトポロジカル相が実現している可能性が高いことが分かってきました。これらの超伝導体において、トポロジカル超伝導やワイル超伝導固有の新現象を理論・実験両面で明らかにしていくことは大変、興味深い問題です。我々は、本新学術領域での研究期間中にこの問題に取り組み、ワイル超伝導、トポロジカル超伝導に特有の物性現象を理論的に明らかにしました。

まず、ワイル超伝導の新規輸送現象について説明します。ワイル超伝導は時間反転対称性の破れたカイラル超伝導状態や非ユニタリ状態で実現し、点状ノードからの準粒子励起がワイル粒子として振舞います。この“ワイル・バンド”が波数空間の擬似的磁場であるBerry曲率を生成し、その結果、量子異常と関連した様々な興味深い輸送現象を発現します。さらにワイル超伝導では通常の電磁応答に加えて、格子変形や渦等のトポロジカル織り目がワイル準粒子に作用する擬似的な電磁場を発現します。これらの効果によって、ワイル超伝導に特徴的な輸送現象である、異常熱ホール効果、負の熱磁気抵抗[1]、カイラル磁気効果[2][3]が実現することが、我々の研究で明らかになりました。負の熱磁気抵抗とは、渦や格子変形が生み出す擬似的磁場がワイル準粒子の量子異常効果を誘発し、擬似的磁場に平行な方向の温度勾配に対して熱流が増大するという現象です。この現象は、ワイル準粒子の有するBerry曲率と密接に関わっていますが、従

来の超伝導状態の輸送現象を記述する標準的理論である準古典近似(Eilenberger方程式)では、Berry曲率の効果を捉えることができません。我々は準古典近似を越えるトポロジカルな量子補正を系統的に取り入れるように理論を改良し、上記の結果を得ることに成功しました。同様にBerry曲率に由来する異常熱ホール伝導率も、準古典近似にトポロジカル量子補正を取り入れることによって、計算することができることが分かりました。ワイル超伝導の候補物質として、上記に挙げたものの他、UCoGe等の強磁性非ユニタリ超伝導等もあり、これらの系でワイル超伝導性を実証することが今後の重要課題です。

次にトポロジカル超伝導の新規電磁応答についてですが、 $U_{1-x}Th_xBe_{13}$ ではThをドーピングしていない状態ではスピン3重項トポロジカル超伝導状態が実現していることが期待されています。しかもこのクーパ対状態は結晶対称性を自発的に破ったネマティック超伝導状態であり、これにThをドーピングすると低温領域でワイル超伝導状態に転移すると理論的に予想されます。この転移点付近では、ネマティック超伝導に由来する集団励起(ヒッグス・モード)が存在します。我々はこのヒッグス・モードが実験的に検出可能な電磁応答を示すことを明らかにしました[4]。これが実験で検出できれば、ネマティック超伝導の証拠となります。

[1] T. Kobayashi, T. Matsushita, T. Mizushima, A. Tsuruta, S. Fujimoto, *Physical Review Letters* **121**, 207002 (2018).

[2] Y. Ishihara, T. Mizushima, A. Tsuruta, S. Fujimoto, *Physical Review B* **99**, 024513 (2019).

[3] T. Matsushita, T. Liu, T. Mizushima, S. Fujimoto, *Physical Review B* **97**, 134519 (2018).

[4] H. Uematsu, T. Mizushima, A. Tsuruta, S. Fujimoto, J. A. Sauls, *Physical Review Letters* **123**, 237001 (2019).



ジグザグ構造を持つ物質、及び関連物質における特異な量子相の解明と新規探索

小手川 恒

神戸大学 理学研究科 准教授

CrAsやMnPにおける圧力誘起超伝導、RuAsにおける金属絶縁体転移、UGe₂における強磁性超伝導などの多彩で興味深い現象がジグザグ構造を舞台にしていることを踏まえ、その構造が電子状態にもたらす効果を抽出し、さらに新奇物性探索を行うことを目的に研究をスタートさせた。まず、CrAsにおいては圧力下NMR測定からこの系特有の磁気相関の存在を明らかにした。[1] そもそもCrAsなどのMnP-型構造をもつ磁性体は3次元的なジグザグ構造のため短距離の交換相互作用の競合が起こり、ヘリカル磁性が安定化されると言われている。図に圧力下のCrAs、銅酸化物、鉄系超伝導体の $1/T_1T$ 、及びKnight shiftを比較した図を示す。 $1/T_1T$ は3者とも類似しているのに対してKnight shiftはCrAsのみ低温に向かってスピン磁化率の増大し、つまり、 $q \sim 0$ の強磁性的ともいえる相関の存在が示された。今後、この相関と超伝導との関りを解明したい。

また、非共形ではないが、短距離の交換相互作用の競合という点に着目し、Mn₃Pという物質の研究を行った。30 Kで反強磁性転移を示すという事以外、深い研究がなされていなかったが、我々は単結晶の作製に成功し、共同研究者らの協力を得て、複雑なヘリカル磁性を示すこと、特異な2段転移の存在、1.6 GPaでの量子臨界点の誘起、重い電子系の振舞などの多くの結果を得ることに成功した。[2] 本系は遍歴描像にある広義のフラストレーション系が量子臨界点近傍でどのように振舞うかを知る格好の物質であると捉えられる。

RuAsの非磁性相転移は非共型対称性が保証するバンド縮退が要因となっていると考えられるため、同じ空間群に属す物質で類似の相転移の探索を行った。その結果、NbCrPにおいて約100 Kにおいて1次相転移を発見した。[3] NbCrPの場合は絶縁体にはならないが、NMRの結果からギャップ形成が示されている。今後、非共型のバンド縮退とこの相転移の関連について明らかにしたい。

強磁性体UGe₂においては圧力下のNQRの $1/T_2$ 測定を通して強磁性内の1次の量子相転移、及び有限温度の臨界点の近傍で縦方向の磁気揺らぎの観測に成功した。[4] これはUGe₂の超伝導機構の解明につながる重要な結果だと考えている。また、強磁性量子相転移に関連して空間反転対称性のないCeRh₆Ge₄の圧力効果の実験を行った。強磁性-常磁性の量子相転移はゼロ磁場下では1次相転移になると理論的に説明されているが、CeRh₆Ge₄では圧力下で1次相転移の振舞が見られず、むしろ量子臨界的に振舞う事を明らかにした。[5] 本結果は強磁性量子相転移の理解を深める上で重要であり、実際、我々の結果を受けて、反転対称性の無い系では強磁性量子臨界点が生じてても良いという理論的解釈がなされている。[6]

本新学術領域のサポートのおかげで、様々な系に対する研究を行うことが出来た。個人的には試料作製に取り組む、かなりの経験を得ることが出来たのは大きな収穫であったと思う。本新学術領域関係者の皆様、及び多数の共同研究者の方々に感謝します。

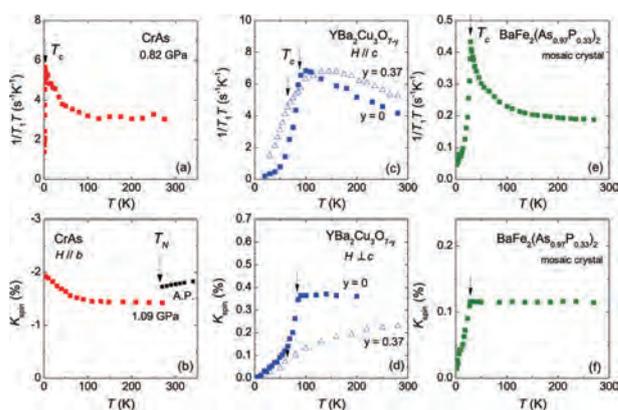


図: CrAsと他の超伝導体との $1/T_1T$, Knight shiftの比較

[1] K. Matsushima, H. Kotegawa *et al.*, Phys. Rev. B **100**, 100501(R) (2019).

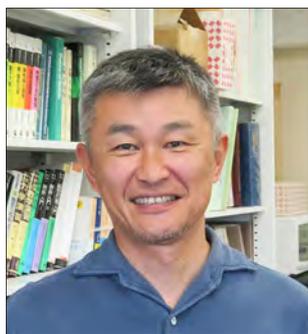
[2] H. Kotegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 087202 (2020).

[3] Y. Kuwata, H. Kotegawa *et al.*, to be submitted.

[4] Y. Noma, H. Kotegawa *et al.*, to be submitted.

[5] H. Kotegawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 093702 (2019).

[6] T. R. Kirkpatrick and D. Belitz, arXiv:1911.02649.



Cd₂Re₂O₇の高圧下における奇パリティ多極子秩序とパリティゆらぎ超伝導

小林 達生

岡山大学大学院自然科学研究科 教授

秋葉 和人

岡山大学 助教

廣井 善二

東京大学 教授

Cd₂Re₂O₇ (以下CRO) は結晶の空間反転対称性を破る構造相転移を示す超伝導体で、Fig. 1 a) のような圧力-温度相図を示す。[1] 超伝導の臨界磁場 B_{c2} は著しく増大し、4.0 GPaでは常圧の27倍に達することが特徴である。最近、これに関連して、構造転移は奇パリティ多極子秩序であり、この電子軌道のパリティを破る秩序のゆらぎにより、p波超伝導が誘起されるというシナリオが理論的に提案された。[2]

1. 高圧下比熱測定による B_{c2} の圧力効果

高圧下での B_{c2} の増大は電気抵抗測定で観測されており、バルクの性質であるかどうか明らかでない。これを明らかにするために、交流法比熱測定を6.5 GPaまで行った。超伝導転移に伴う比熱異常は6.5 GPaまでシャープであり、 B_{c2} が常圧の値の30倍に増大することを確認した。(Fig. 1 b)) また、4.0 GPa近傍の臨界点から離れると T_c や B_{c2} に変化が現れることを期待したが、大きな変化はない。

2. 高圧下ホール効果測定

構造相転移のゆらぎ効果が現れることを期待して、ホール効果測定を行った。パイロクロア構造をもつI相では正のホール係数 R_H を示すが、反転対称性を失ったII相およびIII相では R_H は負の値を示す。CROは補償金属であるから、ホールの移動度が減少するために、このような振る舞いを示すと推測される。Fig. 1 c) のように、IV相ではより大きな負の値を示し、VIII相ではさらに増大する。これは電気抵抗測定で観測されている有効質量の増大と関連していると考えられ、高圧下で電子よりホールの

有効質量がより増大していることを示唆する。有効質量の増大の機構については、電子-格子相互作用が知られているが、バンド計算から構造相転移によるホールバンドの分裂が指摘されており[3]、量子ゆらぎ効果の可能性がある。

最近、廣井研でピエゾ素子を用いたII相とIII相の単一ドメイン化に成功している。電気抵抗の異方性を測定してみると、20%程度の異方性が観測された。[4] 現在、電子状態の異方性を明らかにすべく、極低温での磁気抵抗測定の準備中である。

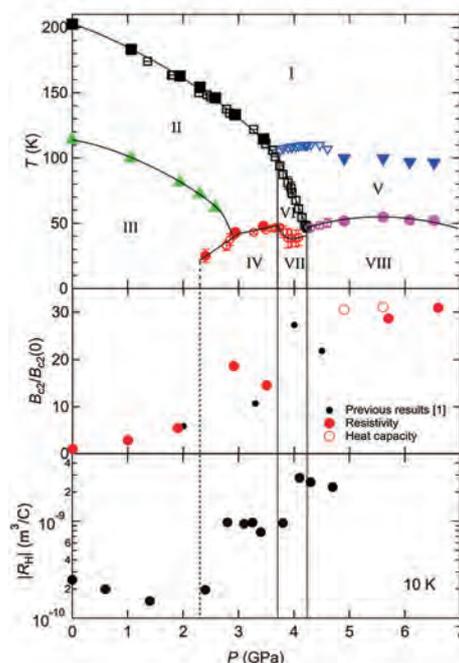


Fig. 1. a) Cd₂Re₂O₇の圧力-温度相図、b) 規格化した B_{c2} の圧力変化、c) 10 Kでの R_H の絶対値の圧力変化。

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

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

[3] Z. Hiroi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 21 (2003).

[4] 詳細は平井氏の報告



スキルミオン化合物 EuPtSi の磁気モーメントと伝導電子のスピントクスチャー

大貫 惇睦

琉球大学 理学部 客員教授

竹内 徹也

大阪大学 低温センター
助教

辺土 正人

琉球大学 理学部
教授

仲間 隆男

琉球大学 理学部
教授

私たちは磁気スキルミオンを示す典型化合物 MnSi と同じ立方晶キラル (No. 198) の EuPtSi でスキルミオンを見出した。従来 $3d$ 電子系で見出されていたが、希土類化合物の $4f$ 電子系で見出されたのは初めてのことである。図1に $H//[111]$ の磁気相図を示す [1]。多くの点で MnSi と良く似ていて、ネール点 $T_N = 4.05$ K で温度の履歴のない1次の相転移を示すこと [2]、データの“□”は3重臨界点で、閉じた A 相がスキルミオン相である。磁場ゼロでの伝播ベクトルは $q = (0.2, 0.3, 0)$ のヘリカル磁性で、A 相では $3q$ 構造をとる [3,4]。| q | が大きいことを反映して、スキルミオンサイズ $\xi = 2\pi/|q|$ は 18 \AA と小さい。MnSi は 180 \AA と大きいので一種の連続体と見なされるが、 18 \AA の曲がりくねった直線上には5から7個の Eu 原子しかない。そのため例えば $H//[110]$ ではスキルミオン相は形成されない。しかし、サイズが小さいとスキルミオンの数は単純には MnSi の100倍であり、それに伴う創発磁場は100倍大きく、従ってスキルミオン形成のホール抵抗も大きい。MnSi では、磁性と伝導を担う $3d$ 電子はスピントラジの遍歴電子系であるが、EuPtSi の $4f$ 電子系は完全に局在している。磁気秩序は伝導電子のスピンを介した RKKY 相互作用に依る。

本研究では非常に純良な単結晶が育成されたので、ドハース・ファンアルフェン(dHvA)効果実験によりフェルミ面の性質が明らかにされた[5]。図2(a)は dHvA 振動数の角度依存性である。dHvA 振動数はフェルミ面の最大もしくは最小の断面積に対応する。全ての dHvA ブランチは閉じたフェルミ面に対応し、結晶反転対称性の破れを反映して大きくスピン分裂している。図2(b)と(c)はスピン分裂した一番大きなフェルミ面のブランチ α と α' の $H//[001]$ と $[111]$ での伝導電子のスピンの向きを示し

ている。(001)面では α ブランチのスピンは中心の Γ 点を向き、 α' では外側に向かっていて。一方、(111)面では α ブランチは回転しながら反時計回り、 α' では時計回りである。

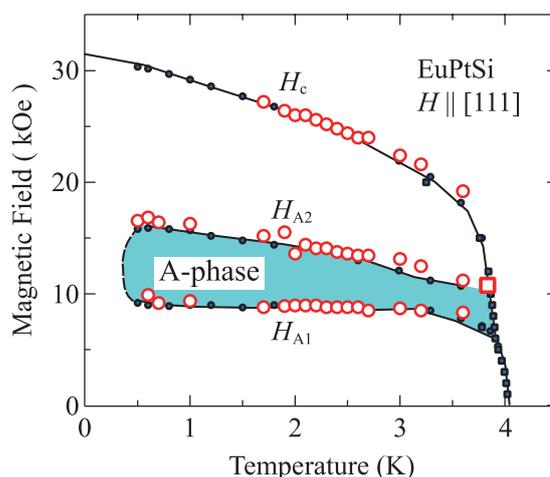


図1. EuPtSiの $H//[111]$ の磁気相図。

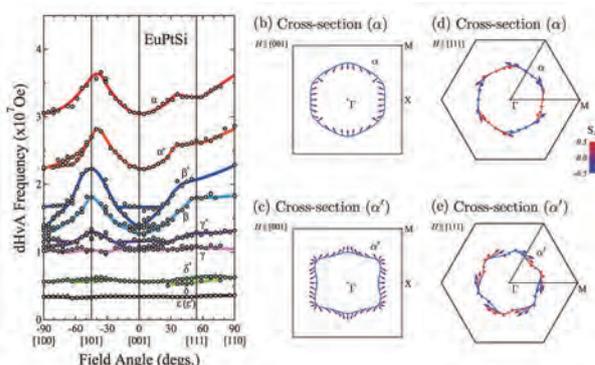


図2. (a) EuPtSi の dHvA 振動数の角度依存性。(b) と (c) はそれぞれ $H//[001]$ と $[111]$ のブランチ α と α' の断面での伝導電子のスピントクスチャー。

[1] M. Kakihana *et al.*, JPSJ **87**, 023701 (2018).

[2] T. Sakakibara *et al.*, JPSJ **88**, 093701 (2019).

[3] K. Kaneko *et al.*, JPSJ **88**, 013702 (2019).

[4] C. Tabata *et al.*, JPSJ. **88**, 093704 (2019).

[5] M. Kakihana *et al.*, JPSJ. **88**, 094705 (2019).



池田 浩章

立命館大学 理工学部 教授

遍歴多極子と多極子超伝導体の発展

前半後半、合わせて4年間、あっという間に過ぎてしまいましたが、公募研究としてお世話になりました。この間、重い電子系を念頭に、第一原理計算と群論を組み合わせて超伝導の理論の発展に従事しました。

特に前半では、野本拓也さん(東大物工)および服部一匡さん(首都大)との共同研究において、多軌道系超伝導体における多様なクーパー対を群論的に整理し、これまでの研究で見逃されてきた超伝導状態を多極子ペアとして一般化しました。[1-4]

そもそもはUPt₃を対象として第一原理計算に基づいて評価したギャップ構造が、フェルミ面毎に異なるノード構造を示し[5]、その中に従来のノード構造では認められない垂直ラインノードが現れたことが研究の発端でした。その後、群論を用いて、一般に六方晶系では角運動量 $j_z = \pm 3/2$ の電子ペアにおいて従来とは異なるノード構造が出現することを示しました。[1] 加えて、多軌道系超伝導においては軌道間ペアが可能であり、局所ペアでも異方的超伝導が、したがって電子格子相互作用から異方的ペアが出現する可能性があるということを示唆しました。さらに、UBe₁₃やPrOs₄Sb₁₂のような結晶場 f^2 状態においては、その基底多重項の対称性を引き継ぐ形で局所ペアが出現しうることを指摘しました。[2]

また、UPd₂Al₃のようなノンシンモルフィックな磁気空間群においては従来型のs波超伝導が群論的に禁止され、常にノードが存在するという珍しい例になっていることを明らかにしました。[3]

後半ではこのような多極子ペアの考え方をさらに発展させるべく、その条件が理想的に見えるBiS₂系層状超伝導体に着目して研究を行いました。この系ではBi 6pバンドで超伝導が出現しており、スピン軌道相互作用の影響が大きいと考えられます。また、実験的

にはARPESなどでかなり異方的なギャップ構造が観測されており、バルク測定で見られるフルギャップ的な振る舞いとは相反するという報告もあり、そもそもバルクとして異方的なペアであるか、表面状態がなんらかの影響を受けてノード的な振る舞いを示したのか、未だ混沌とした状態と考えられます。これらに関する研究の一部はreview paperにまとまっていますので、これから参入される方は、ぜひご参考にしていただければと思います。[6]

一方、後半の研究でより重きを置いたLDA+ DMFTという道具立ての開発においては、残念ながら期間内に形にすることはできませんでした。現在も、鈴木通人さん(東北大金研)や星野晋太郎さん(埼玉大理工)のお力添えを頂きながら、独自コードの開発に勤しんでおり、現在、Hubbard I近似の範囲内で電荷分布の変化を自己無撞着に取り込むことまではできるようになりました。今後、2粒子相関の計算と組み合わせ、局在f電子の振る舞いを第一原理計算に基づいて系統的に評価していく予定です。

今後とも、皆様と活発に議論できることを楽しみにしています。引き続き、どうぞよろしくお願いいたします。

[1] T. Nomoto, K. Hattori, H. Ikeda, Phys. Rev. B **94**, 224503 (2016).

[2] K. Hattori, T. Nomoto, T. Hotta, H. Ikeda, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 113702 (2017).

[3] T. Nomoto, H. Ikeda, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 023703 (2017).

[4] 野本拓也, 服部一匡, 池田浩章, 日本物理学会誌 **74**, 146 (2019).

[5] T. Nomoto, H. Ikeda, Phys. Rev. Lett. **117**, 217002 (2016).

[6] K. Suzuki, T. Nomoto, K. Hattori, H. Ikeda, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 041008 (2019).



局所的な軌道混成に由来する トロイダル多極子がもたらす 新奇マルチフェロイクスの開拓

速水 賢

東京大学 工学系研究科 講師

本新学術領域の公募研究では、「トロイダル」多極子という従来の電気・磁気多極子とは異なる新しい電子自由度に着目して、その表現論を構築することにより、多極子概念の拡張や、その秩序状態が示す新しい交差相関(マルチフェロイクス)現象の開拓を目指してきました。本研究で得られた3つの成果を以下に記します。

1. 固体中における多極子の定式化と分類論 [1]

32の結晶点群のもとで活性化する多極子自由度とそれらがもたらす物性を網羅的に調べ上げました。まず、実空間および波数空間における多極子のミクロな表式を導出することにより、4つの多極子(電気・磁気・電気トロイダル・磁気トロイダル)がどのような結晶点群や電子波動関数のもとで現れるかを明らかにしました[1,2]。また、電気磁気効果や磁気弾性効果といった交差相関現象における応答テンソルの性質を多極子の視点からまとめました[2, 3]。これら4つの多極子を用いると、クラスター多極子[4]、ハイブリッド多極子[5]、ボンド多極子[6]といった様々な拡張多極子を統一的に捉えることが可能となります。

本研究で得た多極子による電子自由度の一般的記述は、電子系の秩序変数や励起構造の性質を統一的に理解・予測する上で有益な情報を与えるだけでなく、様々な交差相関現象を示す新規物質探索への指針をもたらすことが期待されます。

2. 多極子自由度を用いた創発スピン軌道物性 [7,8]

反強磁性体の発現に伴う対称性の低下を利用すること

で、スピン軌道相互作用が無い状況においても、スピン分裂を示すバンド構造が現れることを明らかにしました。特に、反強磁性クラスター構造におけるクラスター多極子と、ホッピング自由度に潜むボンド多極子間の有効的な多極子結合がスピン分裂バンドの発現に本質的であることを見出しました。本結果は、スピン軌道相互作用が小さいとされている有機導体や3d遷移金属化合物といった物質群においても、巨大なスピン分裂が生じうることを示唆しています。

3. 遍歴磁性体における新規スキルミオン [9,10,11]

トポロジカルに非自明な磁気構造をもつスキルミオン結晶はこれまでにカイラル磁性体において数多く発見されてきましたが、我々は遍歴電子系特有の波数空間における長距離型の有効相互作用によってもスキルミオン結晶が安定化することを明らかにしました。こうした結果は、最近EuPtSiにおいて見出されたスキルミオン相の安定化の理解にも役立つと思われます。

最後になりましたが本プロジェクトで得られた研究成果は、参考文献にもありますように、楠瀬博明先生をはじめとして、多数の方々との共同研究に基づくものです。この場を借りて、心より御礼申し上げます。

[1] 速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明, 固体物理 **54**, 131 (2019).

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

[3] H. Watanabe and Y. Yanase, Phys. Rev. B **98**, 245129 (2018).

[4] M.-T. Suzuki, T. Nomoto, R. Arita, Y. Yanagi, S. Hayami, and H. Kusunose, Phys. Rev. B **99**, 174407 (2019).

[5] S. Hayami and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033709 (2019); M. Yatsushiro and S. Hayami, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 054708 (2019).

[6] S. Hayami, Y. Yanagi, H. Kusunose, Y. Motome, Phys. Rev. Lett. **122**, 147602 (2019).

[7] M. Naka, S. Hayami, H. Kusunose, Y. Yanagi, Y. Motome, and H. Seo, Nat. Commun. **10**, 4305 (2019).

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

[9] S. Hayami, R. Ozawa, and Y. Motome, Phys. Rev. B **95**, 224424 (2017).

[10] S. Hayami and Y. Motome, Phys. Rev. Lett. **121**, 137202 (2018).

[11] S. Hayami and Y. Motome, Phys. Rev. B **99**, 094420 (2019).



単サイト四極子近藤効果の検証： $Y_{1-x}Pr_xIr_2Zn_{20}$ の弾性応答に観る 対数的温度変化

柳澤 達也

北海道大学大学院理学研究院 准教授

<p>日高 宏之 北海道大学大学院 理学研究院</p>	<p>網塚 浩 北海道大学大学院 理学研究院</p>	<p>Sergei Zherlitsyn ドレスデン強磁場 研究所</p>	<p>Joachim Wosnitza ドレスデン強磁場研究所/ ドレスデン工科大学</p>	<p>山根 悠 広島大学大学院 先端物質科学研究科</p>	<p>鬼丸 孝博 広島大学大学院 先端物質科学研究科</p>
--	---	--	---	--	---

2年間の公募研究では主に磁場・電流下の超音波計測を行い、反転対称無き金属間化合物における奇パリティ多極子の観測を試みてきました。本稿ではD01班の鬼丸氏との連携によって生まれた、非クラマス二重項系の四極子近藤効果の研究の成果をご紹介します。

私が四極子近藤効果の問題に初めて出会ったのは学生時代に斜め読みしたCox-Zawadowskiの分厚いレビュー論文でした [1]。この論文では、2チャンネル(不純物)近藤模型から、 $(1/2)\log 2$ の残留エントロピーの存在や、磁気比熱を温度で割った C/T や四極子感受率に対数的温度変化を示すことなどが紹介され、実験で有望視されるものとして $(Th, U)Ru_2Si_2, UBe_{13}$ 等の物性が挙げられていますが、本現象の主役である電気四極子の応答を直接捉えた実験はありませんでした [2]。

一方、 f^2 配位をとる4f電子系のPr化合物の研究も進展し、 $PrInAg_2, PrPb_3, PrIr_2Zn_{20}$ の超音波測定が行われてきましたが、Pr間の相互作用に起因する四極子秩序や他の自由度との結合が生じ、超音波による単サイト四極子近藤効果の検証は未達成でした [3, 4]。近年、山根・鬼丸らによってPr希薄系 $(Y, Pr)Ir_2Zn_{20}$ における極低温比熱・電気抵抗が系統的に観測され [5]、単サイト四極子近藤効果の傍証として注目されています。我々は本系の超音波測定を試み、本問題で残された最後のパズルのピースである四極子感受率の対数的温度変化を初めて捉えることに成功しました [6]。

図に $Y_{1-x}Pr_xIr_2Zn_{20}$ の超音波測定の結果を対数温度軸で示します。 $x=0.034$ の試料において Γ_3 対称性の四極子感受率に対応する弾性定数 $(C_{11}-C_{12})/2$ は、2 K以下でソフト化を示します。これは、希釈系においてもPrの結晶場基底状態が非クラマス縮退を保持していることを示しています。他の物理量が非フェルミ液体的振る舞いを示す磁場・温度領域($T \leq 0.3$ K、 $H \leq$

2 T)において、弾性定数は $+\log T$ に比例したソフト化を示します。さらに磁場印加により混成が切れ、対数的温度変化が消失し、結晶場効果が現れることも2チャンネル近藤模型による予測と一致します。内挿図では、14 Tの磁場下のデータを磁場鈍感なフォノンによるバックグラウンドとみなし、各データから差し引いて補正しており、0.04 K付近まで続く $+\log T$ 依存性が得られます。最低温付近では僅かに $+\log T$ から外れ、鶴田・三宅らが予言する $-\sqrt{T}$ の温度依存性に従うようにも見えます [7]。しかしながら、十分低温では何らかの機構(例えば、Pr間の相互作用、他の自由度(核モーメントやオフセンター自由度)との結合など)によって、残留エントロピーが消失するのは必然ですので、弾性定数や他の物理量も同様に理論からずれると考えられ、理論との比較は慎重に行う必要があります。現在は、異なるPr濃度の試料の弾性応答が濃度によってスケールするかを検証中です。今後の展望としては、当初の候補物質であったU化合物の希釈極限系の問題にも挑戦し、母物質が示す重い電子状態や低温秩序相との関連を調べたいと考えております。

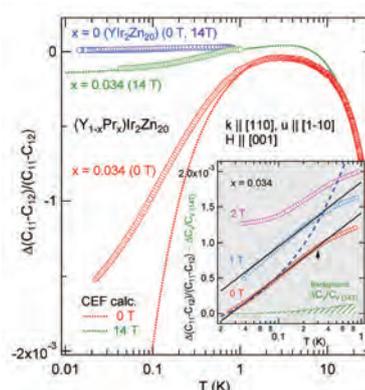


図 $Y_{1-x}Pr_xIr_2Zn_{20}$ ($x=0, 0.034$)の弾性定数 $(C_{11}-C_{12})/2$ の相対変化の温度依存性。破線は結晶場と磁場鈍感なフォノン由来の影響を考慮した解析。内挿図は14 Tのデータを差し引いた後に $+\log T$ (直線)、 $-\sqrt{T}$ (破線)と比較している。

[1] D. L. Cox and A. Zawadowski, *Adv. Phys.* **47** (1998) 599-942.

[2] H. Amitsuka and T. Sakakibara, *J. Phys. Soc. Jpn.* **63** (1994) 736-747.

[3] O. Suzuki *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 013704.

[4] I. Ishii *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) 093601.

[5] Y. Yamane *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **121** (2018) 077206.

[6] T. Yanagisawa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **123** (2019) 067201.

[7] A. Tsuruta and K. Miyake, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84** (2015) 114714.



動的平均場法に基づく 非局所相互作用の新しい公式

大槻 純也

岡山大学異分野基礎科学研究所 准教授

研究協力者 品岡 寛

埼玉大学大学院理工学研究科
助教

多極子秩序など、化合物の相転移に関する理論研究には現象論と微視的理論の2つの異なるアプローチがある。J-Physicsのプロジェクトで多くなされている対称性による考察は現象論の代表である。一方、微視的理論は電子間やその局所自由度などの間の相互作用を出発点として、そのモデルを解析することで物性を論じる。前者が「相転移が起こったらどうなるか」を問題にしているのに対して、後者は「相転移がなぜ起こるのか」という疑問に答えようとしているともいえる。

微視的アプローチの研究において、第一原理計算を利用して化合物の詳細を考慮に入れる計算法が発展してきている。特に超伝導研究の分野において応用が進んでいる。それは超伝導現象がフェルミ面の構造に敏感で、化合物のバンド構造を取り入れることが実験との比較において必須だからである。磁性研究（多極子も含む）においても、個々の化合物のバンド構造を考慮することで、秩序パラメーターの決定や定量的議論が可能となる。

ただし、超伝導の場合と異なり、磁性においては強い電子間相互作用による電子の局在性を考慮に入れることが必須である。しかし、完全な局在描像を出発点としたRKKY相互作用公式では、磁気揺らぎ・多極子揺らぎに起因する超伝導など、磁性を超えた物理への拡張性がなくなってしまう。そこで、弱相関領域から強相関領域までを扱える動的平均場理論(DMFT)を第一原理計算(DFT)と接続したDFT+DMFT法が注目されている。

本研究では、波数依存感受率 $\chi_{ab,cd}(\mathbf{q})$ に注目した。ここで、a, b, c, dはスピンと軌道を合わせた添え字である。この物理量に磁気揺らぎ・多極子揺らぎの情報が含まれており、固有値の発散から相転移温度が、対応する固有関数から秩序変数が決定される。この計算法は定式

化は確立しているものの、軌道自由度の4乗に比例する計算量のために、現実的な化合物に対する計算は困難であるという問題点がある。

文献[1]において、我々は $\chi_{ab,cd}(\mathbf{q})$ の定式化を見直し、適切な近似を適用することで、簡易的な公式を導出した。この公式の特徴として以下が挙げられる。

- 強相関極限で元の公式と厳密に一致する。
- 弱相関領域においては $\chi_{ab,cd}(\mathbf{q})$ は元の計算法とズレがあるものの、転移温度はほぼ正しい。
- 非局所相互作用 $I(\mathbf{q})$ の公式を含む。
- 強相関極限で $I(\mathbf{q})$ が運動交換相互作用やRKKY相互作用の表式と一致することが解析的に示せる。

この新しい公式を用いることで、これまで困難であったf電子やd電子を含む強相関化合物の感受率計算が可能となる。

なお、非局所相互作用 $I(\mathbf{q})$ の第一原理計算法としてはLichtensteinの公式[2]が有名であるが、それとの比較は今後の課題である。また、ヨーロッパを中心として、動的平均場理論の拡張理論が盛んに研究されており、その方程式を出発点として近似を施すことで我々と似た公式が導かれている[3]。

DFT+DMFTを用いた研究は、初期のころは一粒子励起の計算が中心であったが、最近は二体相関も可能となってきた。多極子秩序の定量計算の基礎が着実に進歩している。

[1] J. Otsuki, K. Yoshimi, H. Shinaoka, Y. Nomura, Phys. Rev. B **99**, 165134 (2019).

[2] A. I. Lichtenstein, M. I. Katsnelson, V. P. Antropov, and V. A. Gubanov, J. Magn. Magn. Mater. **67**, 65 (1987).

[3] E. A. Stepanov, S. Brener, F. Krien, M. Harland, A. I. Lichtenstein, M. I. Katsnelson, Phys. Rev. Lett. **121**, 037204 (2018).



遍歴反強磁性体 $Ba_{1-x}K_xMn_2As_2$ の 磁気輸送現象

大串 研也

東北大学大学院理学研究科 教授

工藤 真裕

東北大学大学院理学研究科
M2

青山 拓也

東北大学大学院理学研究科
助教

今井 良宗

東北大学大学院理学研究科
講師

遍歴反強磁性体 $BaMn_2As_2$ は、磁気四極子が強制的秩序を示す大変興味深い物質です。結晶構造は、鉄系超伝導体ファミリーで1-2-2系と呼ばれる $TrCr_2Si_2$ 型であり、空間群 $I4/mmm$ に属しています。磁性は Mn^{2+} イオンの $S = 5/2$ スピンが担っており、転移温度 $T_N = 625$ K で反強磁性秩序を示します。磁気構造はチェッカーボード型であり、一見すると単純なスピン秩序に過ぎないように思われますが、実は配位子場との兼ね合いにより磁気秩序状態で空間反転対称性が破れています。その磁気点群は $4'/m'mm'$ であり、これは x_2-y_2 型の磁気四極子と同一なものとなっています。つまり、反強磁性秩序の裏側に、奇パリティ磁気多極子秩序が隠されているのです。この磁気点群において、電気磁気効果が発現することが予想され、誘電分極と磁場を繋ぐ関係式 $P_i = \alpha_{ij}H_j$ において α_{xx} および α_{yy} ($= -\alpha_{xx}$) 成分が有限となることが期待されます。

電気伝導性に目をやると、 $BaMn_2As_2$ は幅広い温度で金属的挙動を示し、100 K 以下で絶縁的挙動にクロスオーバーします。したがって、伝導電子と磁気多極子の結合を調べる格好の舞台となっているのです。実際に伝導性と磁性に絡み合いがあることが、ホールドープ系 $Ba_{1-x}K_xMn_2As_2$ の研究から示唆されています。この系では、わずかなホールの注入により全温度領域で金属的な電気伝導を示し、このとき $0.19 < x < 0.40$ の範囲において弱強磁性が生じることが分かっています[1, 2]。反強磁性スピンは c 軸を向いている一方で、弱強磁性スピンは ab 面内を向いています。シンプルな考えは、反強磁性スピンのキャントして弱強磁性が発生しているというものです。電気伝導性の良い As の $4p$ ホールが弱強磁性を担っているという考えもあります。後者の考え方は、磁性半導体 $Ga_{1-x}Mn_xAs$ における強磁性発現機構に近いものです。

弱強磁性の微視的メカニズムに関する議論は収束していませんが、現象論的観点から確かに言えることは、

弱強磁性相において自発磁化に平行な誘電分極が発生していることです。これは、先述した母体の電気磁気効果のテンソル成分から導かれます。この金属における誘電分極が、新奇な磁気輸送現象を発現させるのではないかと、というのが私の興味です。

私たちは、精密に組成を制御した $Ba_{1-x}K_xMn_2As_2$ の試料を作成し、図1に示す電子相図を作成しました。このような電子相図を作成することは、蒸気圧の高い K の存在のため困難であり、先行研究ではなされていなかったのです。この電子相図から、弱強磁性相は $x = 0.40$ 付近で最も安定となるドーム型をとることが分かります。オーバードープ領域で弱強磁性相が消失することは興味深く、一つの理由として背後に横たわる反強磁性秩序も消失していることに起因している可能性があります（検証はできていません）。

次に、磁場を ab 面内で回すことで異方的磁気抵抗効果を調べました。図2に、低温で弱強磁性を示す $x = 0.25$ の結果を示します。幅広い温度領域で異方的磁気抵抗効果が観測されました。こうした現象は、対称性の観点から $\rho(\theta)/\rho(0) = A_0 + A_2 \cos 2\theta + A_4 \cos 4\theta$ と記すことができます。弱強磁性相に特徴的なことは、 A_4 項が顕著であることであり、異方的磁気抵抗効果が“異方的”であることを示しています。

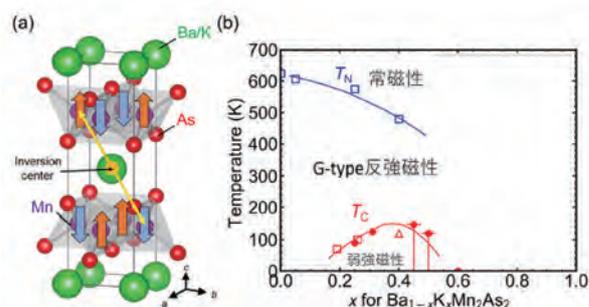


図1. 母物質の磁気構造と $Ba_{1-x}K_xMn_2As_2$ の電子相図。

異方的磁気抵抗効果は多数の強磁性体で観測されており、その微視的起源はスピン軌道相互作用にあります。Ba_{1-x}K_xMn₂As₂においてもスピン軌道相互作用が重要なのは間違いありませんが、もうワンステップを置くことで現象が理解しやすくなるのではないかと考えています。つまり、この系では自発磁化の方向を面内で回転させるに従い、誘電分極も回転していると考えられます（これは電気磁気効果テンソルからの帰結です）。これを別の言葉で言い換えれば、誘電分極により生じた僅かな直方晶歪の主軸が回転していることとなります。これに従い、有効質量や群速度も変化していきますので、固定された電流電圧端子間の電気抵抗も変わっていくと考えられます。これが、磁気抵抗効果に異方性をもたらしていると考えられるのです。つまり、この系における顕著な異方的磁気抵抗効果は、背後で奇パリティ多極子が強的に秩序を示し、そこを舞台に弱強磁性が発生した系に特有の磁気輸送現象であると結論できるのです。

上記の解釈は、こじつけに近いものを感じられるかもしれませんが、一つの新しい考えとして捉えて頂ければと思います。将来的には、こうしたシナリオの検証として、誘電分極が回転していく様を視覚的に示したいと考

えています。また、より大きな枠組みで奇パリティ多極子秩序系研究の将来展望を述べるなら、非線形伝導の観測は集中的に取り組むべき課題だと考えています。これは、ベリー位相の科学として基礎的観点から重要なだけでなく、磁気ダイオードとしての応用可能性も秘めているため工学的にも重要です。

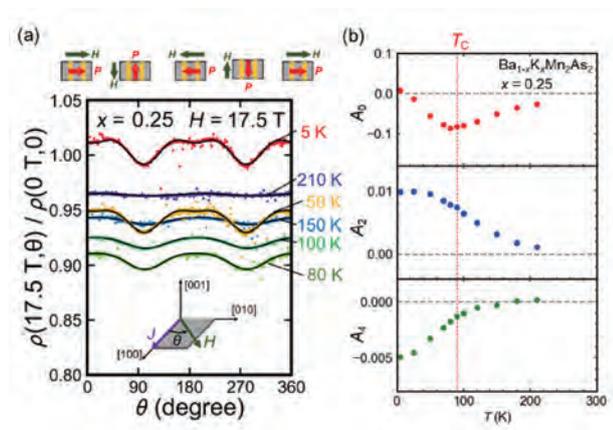


図2. Ba_{1-x}K_xMn₂As₂の(x = 0.25)の異方的磁気抵抗効果.

[1] A. Pandey, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 087005 (2012).

[2] J. Bao, *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 144523 (2012).



反強磁性体における磁気キラル二色性

阿部 伸行

東京大学大学院新領域創成科学研究科

佐藤 樹

東京大学

木村 尚次郎

東北大学

徳永 祐介

東京大学

有馬 孝尚

東京大学

キラルな構造を持つ分子や結晶で現れる旋光や円二色性、強磁性体や磁場中に置かれた物質で現れる磁気旋光や磁気円二色性など、対称性の破れと光学応答は密接に関連している。本研究では空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れた物質における特殊な光学応答である磁気キラル二色性について研究を進めた。磁気キラル二色性は入射光の偏光によらない光学応答であり、光の入射する向き、磁化や磁場の向き、そして物質のキラリティに依存して吸収係数が変化する現象である。これまでも錯体やマルチフェロイック物質などで報告されているが、今回我々が着目した物質は秩序型コランダム構造を持つ $\text{Ni}_2(\text{In}_{1-x}\text{Cr}_x)\text{SbO}_6$ [1-3]及び MnTiO_3 [4]であり、それぞれの物質において磁気キラル二色性を観測することに成功した。今回は MnTiO_3 における磁気キラル二色性について紹介する。

MnTiO_3 は空間群 $R\bar{3}$ のイルメナイト型の構造を持ち、磁性イオンの Mn^{2+} は上下に折れ曲がったハニカム構造を形成する。磁気構造は図のように Mn^{2+} のスピンがc軸方向を向いた反強磁性[5]となるが、磁気秩序の形成に伴って空間反転対称性も破れるため、電気磁気効果が発現する。同じような結晶構造と磁気構造を持つ Cr_2O_3 は線形の電気磁気効果を示す典型物質として有名であるが、 MnTiO_3 は Cr_2O_3 とは異なり電気磁気テンソルの非対角項に反対称成分が存在する。この非対角項の反対称成分の起源は Mn^{2+} サイトに生じるトロイダルモーメントであり[6]、トロイダルモーメントの強秩序状態を実現しその向きを制御できれば、磁気キラル二色性の発現が期待できる。磁性誘電体におけるトロイダルモーメントの単ドメイン化は、電場と磁場を同時に印加することで比較的容易に

実現可能である。実際に単ドメイン化した後、ファラデー配置での磁場印加が可能な光学系を用いて磁場中での光吸収スペクトルを測定することで、 MnTiO_3 の磁気秩序相における磁気キラル二色性の観測に成功した[4]。空間反転対称性を持つ結晶構造であり、かつ反強磁性体である MnTiO_3 において磁気キラル二色性が現れたことは、Mnサイトにおけるトロイダルモーメントの強秩序の重要性を示している。

本研究では秩序型コランダム構造を持つ磁性体を対象として磁気キラル二色性の研究を進めたが、よく知られた結晶構造を持つ3d電子系の物質であっても、多極子秩序あるいはキラリティを持つ物質に特有な物性の開拓が可能である。この研究領域での成果を生かし、物質開発とともに精度の高い測定手法の開発にも引き続き取り組んでいきたい。

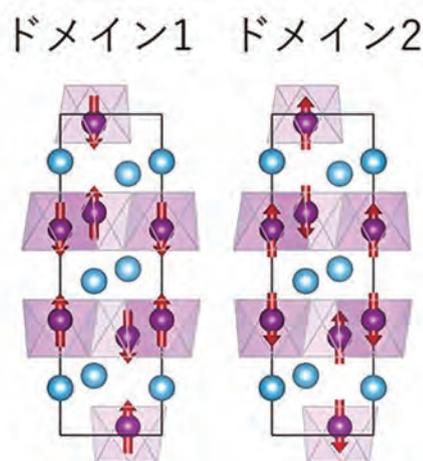


図 MnTiO_3 の反強磁性ドメイン。それぞれのドメインに対応してトロイダルモーメントの向きが反転し、磁気キラル二色性が発現する。

[1] Y. Araki *et al.*, submitted. (arXiv:1912.02363).

[2] T. Sato, Y. Araki, A. Miyake, A. Nakao, N. Abe, M. Tokunaga, S. Kimura, Y. Tokunaga, and T. Arima, *Phys. Rev. B* **101**, 054414 (2020)

[3] T. Sato *et al.*, in preparation.

[4] T. Sato, N. Abe, S. Kimura, Y. Tokunaga, and T. Arima, submitted.

[5] G. Shirane, S. J. Pickart, and Y. Ishikawa, *J. Phys. Soc. Jpn.* **14**, 1352 (1959).

[6] S. Hayami and H. Kusunose, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 033709 (2018).



スピン軌道結合金属 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ における 反転対称性を破る相転移と 電子系の秩序状態

瀧川 仁

東京大学物性研究所 教授

米良 伸義

東京大学物性研究所

武田 晃

東京大学物性研究所

平井 大悟郎

東京大学物性研究所

廣井 善二

東京大学物性研究所

長谷川 巧

広島大学大学院
総合科学研究科

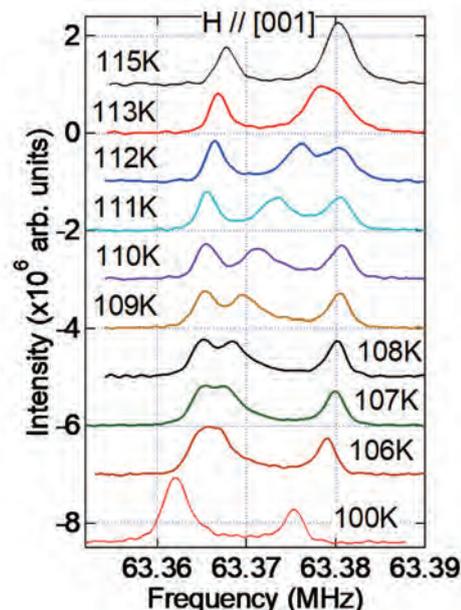
パイロクロア酸化物で唯一の超伝導体である $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ は、200K及び110Kにおいて2段の構造相転移を示すことが知られていたが、近年その機構として、スピン軌道相互作用の強い電子系が自発的に空間反転対称性を破り、フェルミ面のスピン分裂を引き起こす可能性が指摘され[1, 2]、再び注目を集めている。我々は ^{111}Cd 核のNMRによって、相転移に伴うNMR共鳴線の分裂を詳細に調べ、二つの低温相の秩序変数の対称性を検討した。

^{111}Cd 核はスピン1/2で四重極モーメントを持たないため、共鳴周波数は外部磁場 \vec{B}_{ext} と内部磁場 \vec{B}_{hf} の関係を表すナイトシフト・テンソル $K(\vec{B}_{\text{hf}}=K\cdot\vec{B}_{\text{ext}})$ のみによって決まる。相転移に伴って、NMR共鳴線が分裂し、低温相では共鳴周波数の複雑な磁場方位依存性が観測された。この方向依存性からシフトテンソルの主軸と主値を求めることが、従来の標準的な解析方法であったが、そこから電子系の秩序相の対称性を議論するのは容易でない。我々は、シフトテンソルの9個の成分を、観測している原子核の点群対称性の既約表現の基底となるように分類する、という方法を考案した。こうすれば、相転移に伴う共鳴線の分裂がどの既約表現に起因するかを調べることによって、低温相の秩序変数の対称性を同定する道が開ける。

このようにして、二つの低温相におけるナイトシフトの分裂が、200 Kより高温のCdサイトの点群 D_{3d} の2種類の E_g 成分に起因することが分かった。さらに、スペクトルの詳細な温度変化から、1次転移で移ると思われていた二つの低温正方晶、II相($I\bar{4}m2$)及びIII相($I4_122$)、の間の狭い温度領域で、直方晶の中間相が存在し、2段の連続転移が存在することが判明した。(右図参照)。この相転移は、温度の低下とともに一度対称性が下がった後、再び高対称に戻る珍しい例である。現在は、電子系の秩序状態をより直

接的に観測するために、当初計画していなかった酸素サイトのNMRを行っており、予想外の結果が得られつつある。一方で申請書に書いた高圧下の実験は、残念ながらまだ手が回っておらず引き続き今後の課題である。

この他にも、5d電子系ダブル・ペロブスカイト化合物 $\text{Ba}_2\text{MgReO}_6$ の酸素サイトのNMRを、本新学術に採択後に開始している。この物質はスピン軌道結合の強いモット絶縁体で、 Re^{6+} の1個の5d電子が作る4重縮退した $J_{\text{eff}}=3/2$ の状態が多極子秩序を示す系である[3]。Reを取り囲む6個の酸素サイトのNMRスペクトルから、軌道とスピンの絡んだRe多極子秩序を解明すべく解析が進んでいる。



[001]方向の磁場下(7T)におけるII-III相転移近傍の Cd -NMRスペクトルの温度依存性。

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

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

[3] D. Hirai and Z. Hiroi, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 064712 (2019)



反強磁性金属EuMnBi₂における 磁気圧電効果の観測

塩見 雄毅

東京大学 大学院総合文化研究科

渡邊 光

京都大学理学研究科
物理学専攻

増田 英俊

東北大学
金属材料研究所

高橋 英史

大阪大学
基礎工学研究科

柳瀬 陽一

京都大学理学研究科
物理学専攻

石渡 晋太郎

大阪大学
基礎工学研究科

我々の研究グループは、磁性を中心とした物性物理学およびスピントロニクスの実験研究を行っています。本新学術領域の公募研究における主要な成果として、2017年に渡邊・柳瀬によって提案された反強磁性金属における奇パリティ多極子効果である磁気圧電効果 (Magneto-piezoelectric effect) [1]を実験的に実証しました[2,3,4]。

磁気圧電効果は、金属における圧電効果であり、時間反転対称性と空間反転対称性が両方破れた磁性金属で発現します[1]。通常の圧電効果が、電場によって歪みが生じる現象と理解できるのに対して、磁気圧電効果は電流によって歪みが生じる現象として表現されます。通常の圧電効果と同様、現象の発現方向は結晶の対称性によって制限され、我々が注目したEuMnBi₂という反強磁性金属では、対称性の考察により[1]、結晶の[001]方向への電流印加によって、面内の[110]方向に歪みが生じることが期待されます。

我々は低温でEuMnBi₂単結晶試料への[001]方向の電流印加によって生じる面内方向の歪み信号を、レーザードップラー振動計による非接触測定により調べました。代表的な結果を図1に示します。図1(a)では、6kHzの電流の印加により電流周波数と同じ6kHzに面内方向の動的変位信号がみられているのがわかります。一方で、この時面直c方向にはそのような動的変位信号は生じないことが図1(b)においてわかります。この結果は、EuMnBi₂の対称性により期待される磁気圧電効果の対称性と合致します。我々は更に、対照試料での測定や、動的変位信号の電流強度依存性、温度依存性などを系統的に調べることで、観測された変位信号が磁気圧電効果に由来することを示しました[2,3,4]。

最近では、別の反強磁性伝導体であるCaMn₂Bi₂でも同様の磁気圧電効果信号を観測し、信号が磁気転移温度で発散的に増大することを見出しました[3]。磁気構造が対称性を破っているため転移点で信号が消えることを期待していたため、この結果には大変驚きました。遍歴磁性体では磁気体積効果がスピン揺らぎによって磁気転移温度付近で増大することが知られており、磁気圧電効果がこのようなスピン揺らぎの効果によって増大されている可能性があります。

磁気圧電効果は見つかって間もない現象でまだ謎の多い現象であり、新規物質の開拓や測定系の改良(当初は77Kまでだったが最近4Kまで計測できるようになった[3])をすることで、より詳しく調べています。

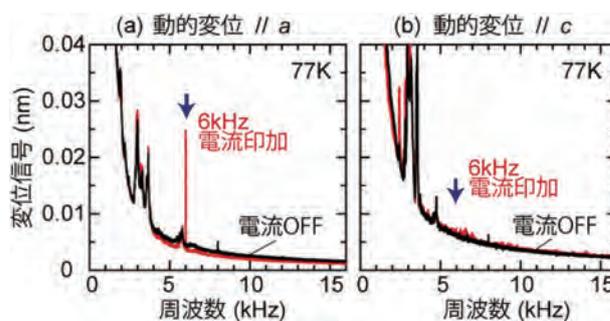


図1：(a)a方向と(b)c方向の測定結果(77K)。

[1] H. Watanabe and Y. Yanase, Phys. Rev. B **96**, 064432 (2017).

[2] Y. Shiomi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 127207 (2019).

[3] Y. Shiomi *et al.*, Phys. Rev. B **100**, 054424 (2019).

[4] Y. Shiomi *et al.*, submitted.



反転対称性の破れた物質の フラックス法による合成

大原 繁男

名古屋工業大学大学院 工学研究科

中村 翔太

名古屋工業大学

加納 敏明

名古屋工業大学

犬飼 順也

名古屋工業大学

矢田 達也

名古屋工業大学

J-Physicsの対象となる空間反転対称の破れた物質をフラックス法を用いて探査した。強いスピン軌道相互作用の物性への寄与が期待されるイリジウム (Ir) やビスマス (Bi) と空間反転対称を破る目的で sp^3 混成軌道が期待されるシリコン (Si) を構成元素に選んだ。この方針の元、イッテルビウム (Yb)-遷移金属元素-SiあるいはBi三元系化合物の合成を試みた。Ybは強相関電子状態を生じさせる目的で選んでいる。フラックス法は蒸気圧の高いYb化合物合成に適しており、スズなどの低融点金属をフラックスに用いることで、Siなどの高融点の元素を溶液にできる利点がある。

50以上の育成条件で物質合成を行い、新物質として YbIr_3Si_7 と YbNi_2Si_3 を発見した。 YbIr_3Si_7 (空間群 $R\bar{3}/c$) は、近藤温度が約20Kの物質であり、4.1K以下で反強磁性秩序する。結晶構造は反転中心を持つが、磁性を担うYbイオンはc面内に三角格子を形成しており、その原子位置では局所的に反転対称が破れている[1]。 YbNi_2Si_3 (空間群 $I4/mmm$) は ThCr_2Si_2 と BaNiSi_3 の両者に類似した結晶構造を持ち、空間反転対称の破れた構造がc軸方向に反転しながら交互に積層して、結晶全体は反転中心を持つ。超伝導の発現を期待して2mKまで測定を行ったが、反強磁性秩序温度0.35Kの重い電子系物質とわかった[2]。

これらの他に希土類元素が歪んだハニカム構造を形成し希土類イオンの位置で反転対称性が破れている $\text{Dy}_4\text{Pd}_9\text{Ga}_{24}$ と $\text{Er}_4\text{Pd}_9\text{Ga}_{24}$ (空間群 $C2/m$) についても結晶合成に至り、その磁性について報告を行った[3]。

新物質探査と並行して、カイラル結晶構造を持つ YbNi_3Al_9 (空間群 $R32$) の純粋な左右性を持つ大型結晶育成法の開発を行った。従来、カイラル結晶の左右性制御

は、種結晶を用いるなど、外部から結晶核を操作する方法が用いられる。 YbNi_3Al_9 の育成はYbの蒸気圧の高さから閉じた空間で行う必要があり、我々は真空封入アンブル内でのフラックス法を用いている。そのため、外部から結晶核を操作することができず、また、通常は溶液全体を徐冷するため多数の結晶核が生成して結晶の左右性と大きさは制御できない。そこで、温度勾配を用いて溶液の底部から冷却し、結晶核の生成数を減らすことを試みた。溶液の上下端に約4°Cの温度差をつけることで、これまでの約3倍となる数mm角、約200mgの結晶を再現性よく得られるようになった。結晶の左右性をX線回折で調べると、c面内では左か右だけの構造を持つが、c軸方向には成長途中で左右が反転する場合があることもわかった。開発した温度勾配フラックス法により2mm角程度の純粋な左右性を持つ単結晶を得られるようになり、中性子実験への試料提供を始めている。

最後に、多くの支援と励ましをいただいた新学術領域研究J-Physicsに感謝する。研究成果は学生たちの手によるものであり、熱意を持って課題に挑戦してくれたことに感謝する。アウトリーチ活動としては、高校生対象の授業「日本語からはじめる」や高校教諭への講演「鏡の国の磁石」を実施した。論理的で簡潔な文章を書く能力の育成や対称性から物理を理解する面白さを広く伝える活動について今後も続けていきたい。

[1] Shota Nakamura, Toshiaki Kano, Shigeo Ohara, J. Phys. Soc. Jpn., **88**, 093705 (2019).

[2] S.Nakamura, K.Hyodo, Y.Matsumoto, Y.Haga, H.Sato, S.Ueda, K.Mimura, K.Saiki, K.Iso, M.Yamashita, S.Kittaka, T.Sakakibara, S.Ohara, J. Phys. Soc. Jpn., **89**, 024705 (2020).

[3] Shota Nakamura, Tatsuya Yada, Shigeo Ohara, JPS Conf. Proc. **29**, 012011 (2020).



Magnetism in non-centrosymmetric f electron systems

Robert Peters

京都大学 講師

We continued our research in non-centrosymmetric f-electron materials, focusing on the interplay between the Kondo effect and magnetic properties. Particularly, we are looking at the impact of a Rashba-spin-orbit-like hybridization on the magnetic phase diagram.

The magnetic phase diagram showing the antiferromagnetic polarization depending on local hybridization and Rashba-hybridization is shown in Fig. 1. For small Rashba coupling, we find the usual behavior as known from the Doniach phase diagram; The magnetic phase existing for small local hybridization vanishes for large local hybridization because the Kondo effect becomes strong. Remarkably, we find that the Rashba hybridization can increase the magnetization of the system. Particularly for large local hybridizations, $V/t > 0.8$, where the magnetization is strongly suppressed by the Kondo effect, the Rashba hybridization strongly increases the magnetization, which can even lead to a reentry transition for $V/t > 1.2$. Only for large Rashba interaction, the

magnetization is suppressed again and finally vanishes. We here see the delicate interplay between magnetism due to the RKKY interaction, the splitting of the Fermi surface due to the Rashba interaction, and the Kondo effect.

Besides the magnetic phase diagram, we have studied the transport properties of this system, focusing primarily on the Edelstein effect. The results for the Edelstein coefficient, $\frac{\Upsilon_{yx}}{\sigma_{xx}}$, for different temperatures and ratios of V_p/V are shown in Fig. 2. While for small V_p , the groundstate is an antiferromagnetic insulator, we find that the system becomes metallic for $V_p > 1/2 V$, even in the magnetic phase. The metallic state arises due to an interplay between the local hybridization and the Rashba hybridization [1]. Remarkably, the metallic antiferromagnetically ordered state shows a strong magnetoelectric effect, which might have interesting applications in spintronics devices.

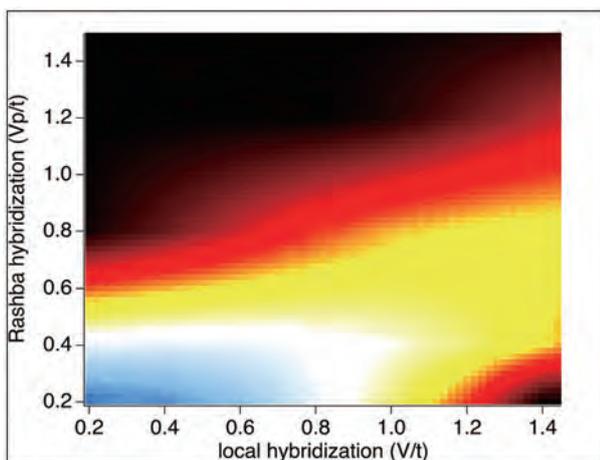


Figure 1: Magnetic Phase diagram of an f-electron system with local hybridization and Rashba hybridization.

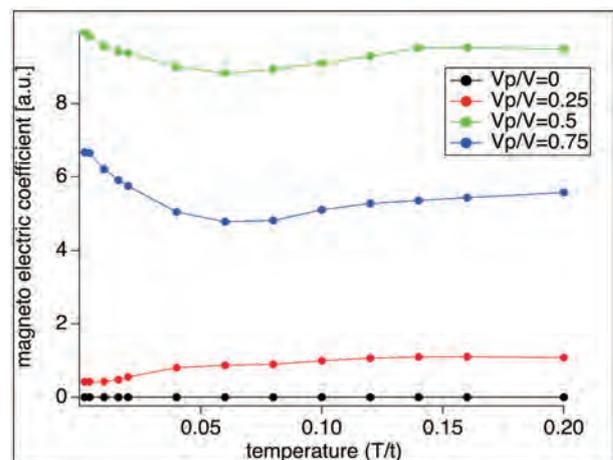


Figure 2: Edelstein coefficient for $V/t=1.4$ and different V_p .

[1] Yoshihiro Michishita and Robert Peters Phys. Rev. B **99**, 155141 (2019)



Ceジグザグ鎖構造を持つ 新しい重い電子系化合物における 電流誘起磁化現象の探索

本山 岳

島根大学自然科学研究科 准教授

藤原 賢二

島根大学自然科学研究科
教授

Ce_3TiBi_5 は空間群 $P6_3/mcm$ の結晶構造を持つ。空間群の表記からも明らかのようにa軸方向にミラーのc軸グライドが存在する。また空間群の対称性のダイアグラムを見ると明示されているが、この系は反転対称中心を持つ。幸運にもCeはこの結晶構造の特徴を生かすことのできる1つのサイトを占有し、最近接のCeを結ぶことでCeジグザグ鎖を形成する。反転対称中心はそのCe-Ce間の中点に存在し、Ceサイトにはない。この特徴的な結晶構造を持つ Ce_3TiBi_5 の発見が、電流誘起磁化測定への挑戦のきっかけである。

「Ceジグザグ鎖構造を持つ新しい重い電子系化合物における電流誘起磁化現象の探索」と言う研究課題を遂行するにあたって、我々は3つの目標を立てた。① Ce_3TiBi_5 において電流誘起磁化現象の観測。②同型の結晶構造を持つ化合物の探索。③ホール素子等を利用した電流誘起磁化現象測定方法の開発。の3つである。これら3つの課題についての成果を報告する。

我々はMPMSの測定プローブを改良し、電流印加下で磁化測定を実行した。Fig.1に示されるように Ce_3TiBi_5 の反強磁性転移温度5 Kより高温では電流印加に影響を受けることなく Ce_3TiBi_5 の磁場によって誘起される通常の磁化と一致したが、転移温度以下では磁化に変化が現れた。この変化は電流に比例して変化し、磁場には全く影響を受けないことが明らかになった。さらに、 La_3TiBi_5 において同様の実験を行い、我々が観測した電流誘起磁化が La_3TiBi_5 には見られず Ce_3TiBi_5 の特徴であることも明らかにした。これらの結果から Ce_3TiBi_5 における電流誘起磁化の観測に成功したと結論付けた[1, 2]。

Ce_3TiBi_5 と同型の結晶構造を持つ化合物の探索において、希土類化合物の置換やTiをZrに置換した化合物の発

見に成功した。これらの新規化合物の電流誘起磁化測定は進んでいないが、今後、系統的な研究に進展することを期待している。

MPMSを利用した電流誘起磁化測定には、測定温度など様々な制限があるためホール素子等を利用した測定手法の開発に取り組んだが、その進展は良好ではない。今後も引き続き開発を続け測定環境の拡張による電流誘起磁化現象の研究に貢献したい。

最後に、様々な研究活動を含めこのような研究機会を与えて下さった領域の皆様へ感謝します。研究成果のみならず教育効果など様々な面で大きな成果を感じることができました。

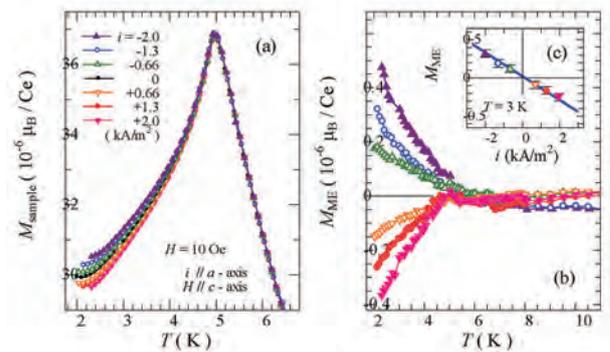
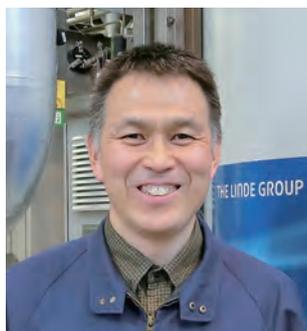


Fig. 1 (a) 磁場・電流印加下における Ce_3TiBi_5 の磁化の温度依存性 (b) 電流誘起磁化の温度依存性 (c) 3 Kにおける電流誘起磁化の電流依存性

[1] Masahiro Shinozaki, Gaku Motoyama, Masahiro Tsubouchi, Masumi Sezaki, Jun Gouchi, Shijo Nishigori, Tetsuya Mutou, Akira Yamaguchi, Kenji Fujiwara, Kiyotaka Miyoshi, and Yoshiya Uwatoko, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 033703 (2020).

[2] M. Shinozaki, G. Motoyama, T. Mutou, S. Nishigori, A. Yamaguchi, K. Fujiwara, K. Miyoshi, and A. Sumiyama, JPS Conf. Proc. in press.



12 GPaまでの比熱とホール抵抗測定から見た4f電子系キラル化合物YbNi₃Ga₉の特異な磁気相図

梅尾 和則

広島大学 自然科学研究支援開発センター 准教授

新井 雄大

広島大学 大学院 先端物質科学研究科 博士課程前期2年

太田 善彦

広島大学 大学院 先端物質科学研究科 博士課程後期1年

大原 繁男

名古屋工業大学 大学院 工学研究科 教授

中村 翔太

名古屋工業大学 大学院 工学研究科 助教

本研究で対象とした表題化合物と同型の三方晶ErNi₃Al₉型(空間群R32)構造であるYbNi₃Al₉は、3.4 K以下でキラルらせん構造を示す[1, 2]。さらに、磁場 B をらせん軸である c 軸に垂直に印加すると、らせんが周期的に解けたキラルソリトン格子(CSL)が形成される[2, 3]。一方、常圧では価数揺動状態にあるYbNi₃Ga₉は、臨界圧力9 GPa以上で磁気秩序を示す[4]。さらに、我々は11 GPa以上で $B \perp c$ で磁場誘起磁気秩序相(II相)が出現することを見出した(図1) [5]。I相とII相の磁性を調べるため、本研究では、 $B \perp c$ での磁気抵抗 $R(B)$ とホール抵抗 $\rho_H(B)$ を圧力下で測定した。

図2に2 Kでの11.8 GPaのYbNi₃Ga₉と、CSLを形成する常圧でのYb(Ni_{0.94}Cu_{0.06})₃Al₉の $\rho_H(B)$ を示す。YbNi₃Ga₉の $\rho_H(B)$ は相境界磁場 B_M 付近で傾きを変える。ここで、 $\rho_H(B)$ が B と磁化 M それぞれに比例する正常および異常ホール抵抗の和、 $\rho_H(B) = R_0B + R_S M(B)$ で表されると仮定し、 M の磁場変化が $B > B_M$ で小さいとして R_0B を見積もった。図2の青色で示すように、その R_0B を差し引いて求めた11.8 GPaでのYbNi₃Ga₉の $R_S M(B)$ は、Yb(Ni_{0.94}Cu_{0.06})₃Al₉と同様に B_M 付近で急増した。また、同じ圧力でのYbNi₃Ga₉の $R(B)$ もYb(Ni_{0.94}Cu_{0.06})₃Al₉で見られたようなピークを B_M 近傍にもつ。これらの類似性は、YbNi₃Ga₉のI相とII相でのCSL形成を示唆する。

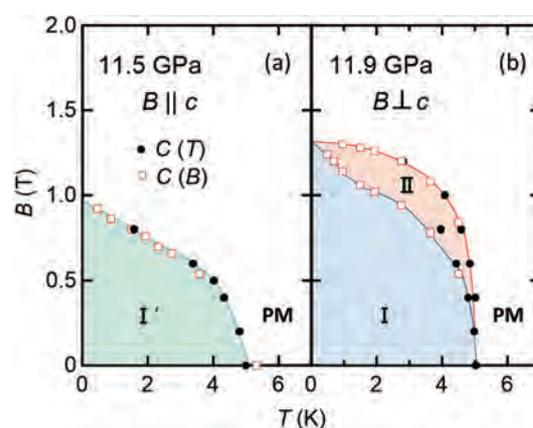


図1. YbNi₃Ga₉の11 GPa以上での $B \parallel c$ (a)と $B \perp c$ (b) [5]の磁場-温度相図 (PMは常磁性相)。

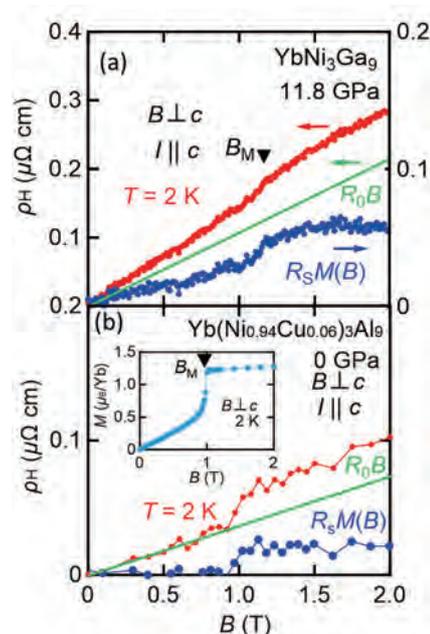


図2. (a) 11.8 GPaにおけるYbNi₃Ga₉の2 Kでのホール抵抗率 ρ_H と(b)常圧でのYb(Ni_{0.94}Cu_{0.06})₃Al₉の ρ_H 。内挿図は2 Kの磁化 M の磁場依存性($B \perp c$) [3]。

[1] T. Yamashita *et al.*, JPSJ **81**, 034750 (2012).

[2] T. Matsumura *et al.*, JPSJ **86**, 124720 (2017).

[3] S. Ohara *et al.*, JPS Conf. Proc. **3**, 017016 (2014).

[4] K. Matsubayashi *et al.*, PRL **114**, 086401 (2015).

[5] K. Umeo, *et al.*, PRB **98**, 024420 (2018).



New hybrid f-/p-electron mixed valence molecular materials

Professor **Kosmas Prassides**

Department of Materials Science, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

Naoya Yoshikane

Osaka Prefecture University

Keisuke Matsui

Osaka Prefecture University

In this project, we focused on research in emergent electronic phenomena in the family of hybrid f-/p-electron molecular materials derived from rare earth fullerides, $RE_{2.75}C_{60}$ in which the presence of the electronically-active C_{60} anions is combined with mixed configuration rare earths leading to properties intrinsically unattainable in other systems. Strong correlations dominate the electronic properties of both the rare-earth cation and the C_{60} anion sublattices. To-date the project has unambiguously authenticated by both synchrotron X-ray diffraction and spectroscopic techniques at ambient and elevated pressures the occurrence of valence transitions with novel characteristics arising from the simultaneous presence of the electronically-active C_{60} sublattice. Moreover, it has also led to a family of mixed valence materials with chemically (and potentially physically) quasi-continuously tunable valence transitions opening up the possibility of unveiling a new type of quantum criticality caused by critical valence fluctuations.

One of our early discoveries in this field was that $Sm_{2.75}C_{60}$ (**Fig. 1**) exhibits a temperature-induced valence transition on cooling to 32 K at ambient pressure from a Sm valence of +2.3 towards +2 that is accompanied by a giant negative thermal expansion (NTE) at a rate of -400 ppm/K [1]. This effect was unprecedented in molecular systems and was reminiscent of the valence transitions encountered in intermediate valence Kondo insulators like SmS, which undergoes a pressure-induced abrupt catastrophic transitions from a semiconducting black to a metallic gold phase. Indeed, $Sm_{2.75}C_{60}$ also shows a pressure-induced valence transition at 4 GPa, accompanied by a huge lattice collapse and a change

in color, implying an insulator-to-metal transition [2]. We made significant advances within J-Physics and established robust routes to isolate the ternary metal fullerides, $(Sm_{1-x}Ca_x)_{2.75}C_{60}$ ($0 \leq x \leq 1$) – here the valence change is quasi-continuously controlled chemically by the co-intercalation of the valence-precise Ca^{2+} ion. A new family of intermediate valence fullerides has emerged with tunable onset of the valence transition temperature, which goes to zero in $Ca_{2.75}C_{60}$.

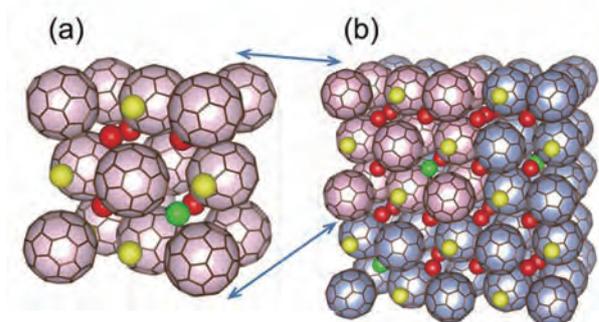


Figure 1. (a) Building block and (b) unit cell of the orthorhombic superstructure of $(Sm_{1-x}Ca_x)_{2.75}C_{60}$ ($0 \leq x \leq 1$) that can be obtained by doubling the subcell along all three lattice directions. Distorted octahedral and tetrahedral samarium/calcium cations are depicted as yellow and red spheres, respectively, while the tetrahedral defects are shown as green spheres.

At the same time, we added one missing piece of the puzzle by going beyond diffraction characterization techniques and authenticating the rare-earth valence changes directly at both ambient (**Fig. 2**) and elevated pressures (**Fig. 3**) using element-specific spectroscopic techniques. What is remarkable here is that, while the response to pressure seems conventional and in analogy with that of atom-based Kondo insulators like SmS – sharp increase in the rare earth valence with

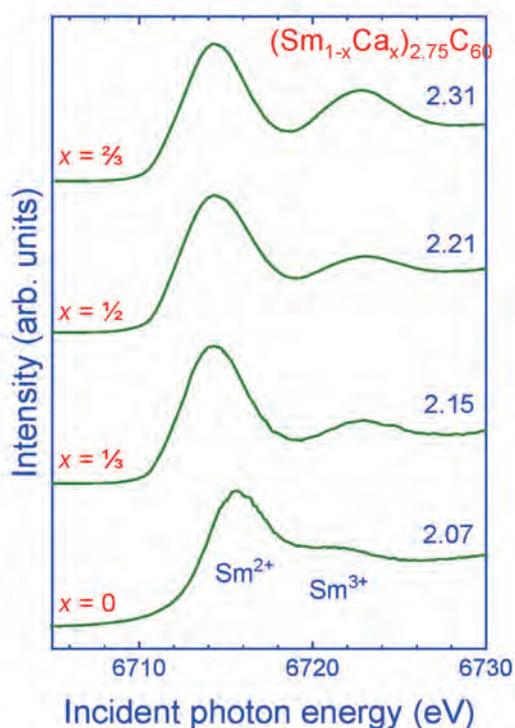


Figure 2. Total fluorescence yield X-ray absorption spectrum (TFY-XAS) of $\text{Sm}_{2.75}\text{C}_{60}$ and partial fluorescence yield X-ray absorption spectra (PFY-XAS) of $(\text{Sm}_{1-x}\text{Ca}_x)_{2.75}\text{C}_{60}$ ($x = 1/3, 1/2, 2/3$) showing the continuous change of the Sm valence from 2.07 to 2.31 with increasing Ca content, x .

pressure, the temperature response is non-monotonic: on cooling, there is first a continuous increase in valence, followed by a sharp collapse at low temperatures, indicative of the non-innocent electronic nature of the C_{60} sublattice which can accept electrons from or donate electrons to the rare-earth 4f/5d bands leading to a more complex electronic behavior. Finally, the pressure-induced valence transition of the Sm ions occurs in the whole series of compositions, while the critical pressure, the total valence change and the

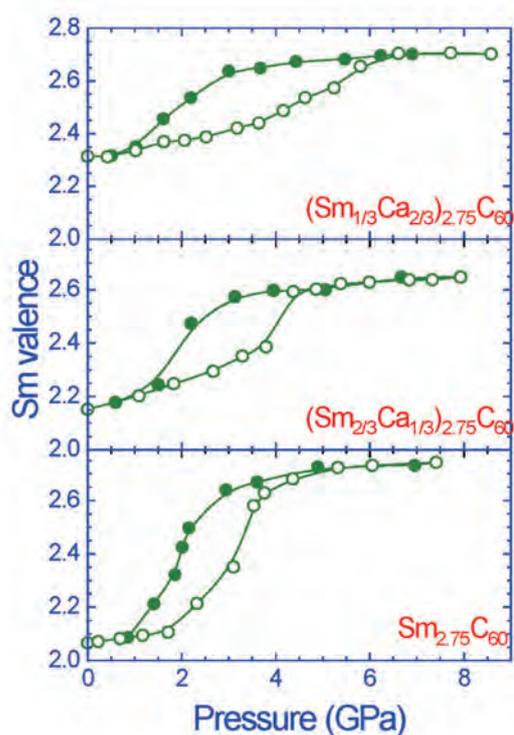


Figure 3. Evolution of the Sm valency with pressure upon pressurization (solid circles) and depressurization (open circles) for the $(\text{Sm}_{1-x}\text{Ca}_x)_{2.75}\text{C}_{60}$ ($x = 0, 1/3, 2/3$) compositions.

hysteretic loop of the valence transition strongly depend on the Ca content (**Fig. 3**).

[1] J. Arvanitidis *et al.*, Nature **425**, 599 (2003)

[2] J. Arvanitidis *et al.*, Dalton Trans. 3144 (2004)

[3] S. Margadonna *et al.*, Chem. Mater. **17**, 4474 (2005)



遍歴反強磁性物質BaMn₂Pn₂における 電気磁気効果

谷垣 勝己

東北大学材料科学高等研究機構 / 東北大学理学研究科物理

<p>Khuong Kim Huynh 東北大学材料科学高等研究機構</p>	<p>松下 ステファン 悠 東北大学理学研究科物理</p>	<p>小笠原 琢磨 東北大学理学研究科物理</p>
<p>田原 大夢 大阪大学大学院理学研究科附属 先端強磁場科学研究センター</p>	<p>木田 孝則 大阪大学大学院理学研究科附属 先端強磁場科学研究センター</p>	<p>萩原 政幸 大阪大学大学院理学研究科附属 先端強磁場科学研究センター</p>

物質の伝導と磁性を、広義の立場では多極子という概念で統一的に理解する研究の統一が、新学術研究領域J-Physicsである。磁気と電流という二つの物理量は、一般にスピン軌道相互作用(s_{SO})を介して結びつけられ、物理量として通常は電場の応答である電流と磁場の応答である磁気が交差して結びつく効果は、電気磁気(ME)効果として知られている。このような静的ME (static ME) 現象に対して、電子が局在極限から遍歴極限に移行する際に観測される動的ME効果(Kinetic MEあるいはDynamic ME)に関しては、十分に理解されていない。電気磁気効果が顕在化するためには、物質の空間反転対称性の破れなどの対称性が重要である事はしばしば議論される。本研究では、空間反転対称性 (Space Inversion Symmetry: SI) と時間反転対称性 (Time Reversal Symmetry: TR) が同時に破れている (空間パリティ-時間対称性PT= SI \times TRが保存されている) 遍歴反強磁性物質であるBaMn₂Pn₂ (Pn: As, Sb, Bi) に対して系統的な物性研究を遂行した。

本物質系の基本物質であるBaMn₂As₂ (BMAs)は、温度 $T_N=625$ Kにおいて電子相関により反強磁性転移を示すが、電気伝導に関しては反強磁性相転移 (T_N) の後も、 $T < T_N$ で遍歴的な電気伝導を示す。温度を下げていくと、電気抵抗は $T_{min}=100$ K付近で極小を示し、高抵抗の絶縁体へと変化する。しかし、この金属-絶縁体転移(MI転移)近傍では、比熱や磁気量に異常は観測されない特殊な現象

を示す物質である。本研究は、BMAsが正負両極性の新規な巨大磁気抵抗(MR)効果を示す実験事実を見出した[2]。重要な知見は、観測されるMRは、BaMn₂Pn₂ (Pn: As, Sb, Bi)物質群において、共通の物性として観測され、ニクトゲン元素 (Pn: As, Sb, Bi) の置換に対して系統的に変化する事である。本研究では、この興味あるMRIに対して種々の物性測定をもとに詳細に議論した。本研究で得られた重要な帰結は、(1) 負符号のGMR (N-GMR) は、磁場を付与する事により低温の絶縁体相から高温の金属相に戻るリエントラントな絶縁体-金属転移現象である。(2) 新しく観測されたN-GMRIは、Pn元素のスピン軌道相互作用(s_{SO})が大きくなる順にスケールされる。(3) 観測されるMRの異方性は従来のMRでは見られない特殊な対称性である、事である。観測されたMRIは、PT対称性のために顕在化する波動の干渉による電子局在が、磁場を付与する事による時間反転対称性の破れのためにその局在性が弱くなり、波動関数の遍歴性が復活したリエントラント金属状態が生じたものであると理解される。遍歴反強磁性体BaMn₂Pn₂ (Pn: As, Sb, Bi)に関する研究は、PT対称性を有する遍歴反強磁性体に関する新しい物性研究としての発展が期待される。

(J-Physicsにおける報告論文)

- [1] Yuki Matsuda, *Physical Review B* **98** (16), 165410 (2018).
- [2] Khuong Kim Huynh *et al.*, *Phys. Rev. B* **99** (19), 195111 (2019).
- [3] Yu Stephane Matsushita *et al.*, *Phys. Rev. B* **99** (19) (2019).
- [4] Kakeru Ichimura *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **115** (5) (2019).
- [5] Hiroshi Idzuchi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **115** (23) (2019).
- [6] Seung-Ho Baek *et al.*, *NPJ Quantum Materials*, doi.org/10.1038/s41535-020-0211-y (2020).



空間反転対称性が破れた立方晶の結晶構造をもつPt化合物における新超伝導体探索

岡本 佳比古

名古屋大学 大学院工学研究科 准教授

山川 洋一

名古屋大学 理学研究科
助教

山影 相

名古屋大学 理学研究科
助教

今回の公募研究では、5d電子系を中心に、空間反転対称性を特徴的な形で「破る」新物質を開拓することにより、興味深い電子物性・電子現象の発見を目指しました。本記事では、得られた成果のうち、空間反転対称性が破れた立方晶の結晶構造をもつPt化合物における新超伝導体探索について報告いたします。

白金を含む超伝導体は、強いスピン軌道結合と5d軌道の軌道自由度の効果により、様々なタイプの非従来型超伝導が実現する舞台として近年よく研究されています。特に、 $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$ や YPtBi といった超伝導体が注目されてきましたが、これらはともに空間反転対称性をもたない立方晶の結晶構造をとります。空間反転対称性が破れた系で働く強いスピン軌道結合と、高い対称性に起因する多軌道性が非従来型超伝導の実現に重要な役割を果たしていると期待されます。

本研究では、 PtSbS と BaPtP が、空間反転対称性が破れた立方晶の結晶構造をもつ新しいPt化合物超伝導体であることを見出しました[1,2]。 PtSbS は立方晶 $P2_13$ の空間群をもつウルマナイト型の結晶構造をとります。 PtSbS をはじめとする10族の遷移金属元素を含むウルマナイト型化合物は金属的な電子物性を示すと報告されましたが、これまでバルク超伝導体であることが確かめられた物質はありません。一方、 BaPtP は PtSbS と同じく立方晶の $P2_13$ の空間群をもち、逆ウルマナイト型と呼べるような結晶構造をとります。これまでに電子物性に関する先行研究はありません。我々は、固相反応法により、ほぼ単相の PtSbS と BaPtP 多結晶試料を合成しました。得られた多結晶試料を用いて行われた低温の電気抵抗率測定により、 PtSbS が $T_c = 0.15$ Kの、 BaPtP が $T_c = 0.20$ Kの超伝導体であることがわかりました。このうち PtSbS については、希釈冷凍機を用

いた磁化測定により低温で大きな反磁性が観測され、バルク超伝導であることが確かめられました。

電子状態計算により、 PtSbS がネスティングの強いホールポケットを含む特徴的な形状のフェルミ面をもつこと、 BaPtP において空間反転対称性が破れていることによるバンド分裂がかなり大きいことが明らかになりました。このような特徴が、空間反転対称性が破れた立方晶の結晶構造をとることと絡んで、超伝導を含む電子物性においてどのように表れているのかを解明することが、今後の研究において期待されます。そのためには単結晶を用いた物性測定が必要不可欠と考えられるため、現在、 PtSbS と BaPtP の単結晶試料の合成に取り組んでいます。

本研究は、水谷亮介、永曾颯、東原直也、竹中康司、高津浩、陰山洋、河野洋平、橘高俊一郎、榊原俊郎各氏との共同研究です。この場を借りて感謝いたします。

[1] R. Mizutani, Y. Okamoto, H. Nagaso, Y. Yamakawa, H. Takatsu, H. Kageyama, S. Kittaka, Y. Kono, T. Sakakibara, and K. Takenaka, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 093709 (2019).

[2] Y. Okamoto, R. Mizutani, Y. Yamakawa, H. Takatsu, H. Kageyama, and K. Takenaka, *JPS Conf. Proc.*, in press.



層状・3次元遷移金属化合物の スピン軌道相互作用由来の 異常電子相制御と新規物性探索

宮坂 茂樹

大阪大学 大学院理学研究科 物理学専攻 准教授

田島 節子

阪大院理

中島 正道

阪大院理

田中 清尚

分子研UVSOR

熊井 玲児

KEK物構研

本公募研究では「電子相関」を内包している遷移金属d電子系を対象に、新学術領域J-Physicsで注目してきた「スピン軌道相互作用」に由来する特異な電子相の制御と、それに伴い生じる新規物性の開拓を目指して研究を行ってきました。研究対象である第10族の遷移金属二硫化物MX₂は大きく3つの結晶構造を取り、同時にそれと不可分な電子状態を示します。よく知られている2次元CdI₂構造を取るMTe₂ (M=Ni, Pd, Pt)は、近年、type-II ディラックフェルミオン系として注目を集めています。私たちは、NiTe₂への過剰Niの導入、NiサイトへのPd元素置換を行うことで、NiTe₂ではフェルミレベルより約100 meV上に存在しているディラック点を、フェルミレベルよりも低いエネルギー準位へと制御可能であることを、角度分解光電子分光 (ARPES) 測定を行い、明らかにしました。この過剰なNiは陽イオンとして母体となるNiTe₂の層間に入り、NiTe₂本体に電子を供給する役割を果たします。一方、Niサイトに置換されたPdは、周期律表上でNiの下に位置しており、Niよりも電子を過剰に内包しているため、こちらも母物質のNiTe₂に電子を供給することになります。そのため、両者ともに、NiTe₂本体のフェルミレベルを上げ、相対的にディラック点のエネルギー準位がフェルミレベルよりも低くなり、ARPESによるディラック点の観測が可能になったと考えられます。

もう一つの主要な研究としては、PdSe₂の元素置換系における新規な超伝導の探索を行いました。PdSe₂は物理的な圧力効果により、層状PdSe₂構造から3次元pyrite構造への構造相転移を生じます。同時に、半導体-金属転移が生じ、その相転移近傍の金属相 (pyrite相) において、臨界温度が約13 Kの超伝導が観測されています。[1] この超伝導はSe₂のダイマーの不安定性を伴うことが予想さ

れており、Pdの価数のゆらぎと超伝導との関連性が注目されています。本研究では、Pd_{1-x}M'_xSe₂ (M'=Ni, Rh) の固溶系の作成により、物理圧力を使用せず、Ni, Rhの元素置換効果により層状PdSe₂構造から3次元pyrite構造への構造相転移を誘起することを試みました。層状構造を取るPdSe₂とpyrite構造のNiSe₂やRhSe₂の固溶系では、約5 GPaでの高圧合成法を用いることで、広い組成範囲 (x>0.3) でpyrite構造を安定化することに成功しました。このpyrite構造相 (x>0.3) においては、母物質 (PdSe₂) の半導体から、金属への電子状態変化が生じていることを輸送現象の測定から明らかにしました。このことは、PdSe₂-pyrite構造相転移と同時に半導体-金属転移が生じることを示しています。また、Rh置換系では、この相境界から離れた組成x=0.8近傍で、約4 Kの臨界温度を持つ超伝導が出現することが判明しました。この超伝導の起源に関しては不明な点も多いのですが、pyrite相におけるSe₂ダイマーの不安定性に伴うPd/Rhの価数ゆらぎにより超伝導が出現している可能性があるかと予想しています。

[1] M. A. ElGhazali et al., Phys. Rev. B **96**, 060509(R) (2017).



幾何学的フラストレート系イリジウム酸化物 $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ のフォノン分散の研究

松平 和之

九州工業大学大学院工学研究院 教授

筒井 智嗣

JASRI

中村 和磨

九州工業大学大学院
工学研究院

長谷川 巧

広島大学大学院
総合科学研究科

花手 洋樹

九州工業大学大学院
工学府博士前期課程

本稿では非弾性X線散乱による $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ のフォノン分散の研究結果について紹介する。 $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ の結晶構造は空間反転対称性のない六方晶(P-62m, No.189)であり、 c 軸方向に IrO_6 が辺共有した1次元鎖をなし、 c 面内で Ir の部分格子が三角格子を形成している[1]。電気伝導性は半導体的であり、7.8 Kで反強磁性秩序を示す[1,2]。また、105 Kで非磁性の二次相転移を示すが、粉末X線および中性子回折実験では回折パターンに変化が観測されず[1]、15年以上未解明のままである。最近、我々が行なった単結晶のラマン散乱から、105 Kの相転移に伴うスペクトルの変化が確認され、105 Kの相転移が構造相転移であることが明らかになった[3]。この相転移によるフォノン分散の変化を、現在、非弾性X線散乱(IXS)により調べている。

室温での測定結果を図1(a)に示す。スペクトルのフィッティングによりピーク位置(図1(b))が得られた。第一原理計算によるフォノン分散をスピン軌道相互作用を考慮したLDAおよびGGAで行なった。計算は、 $1 \times 1 \times 3$ のスーパーセルで行なった。その結果、10~20 meV付近の光学モードは Ir 、30~40 meV付近の光学モードは Ca が主に関係したモードであることが判った。実験で得られたフォノン分散はSO-GGAの計算結果とよく一致する。また、デバイ温度、比熱や音速も評価され、実験結果はSO-GGAとよく一致する。

LDAは実験値よりも格子が小さくなる傾向があり、GGAはLDAよりも格子が大きくなる傾向が知られている。そのため今回の結果でもGGAの方が実験値に近い値が得られている。また、スピン軌道相互作用は今回の計算では格子を僅かに大きくする効果を持つ。構造相転移の観点から $2 \times 2 \times 1$ のスーパーセルでも計算を行なったが、構造不

安定性を示唆するソフトフォノンは見られなかった。これらの計算結果は少なくともブリリュアンゾーンにおけるA、MおよびK点では構造不安定性は無いことを示している。現在、105Kの相転移でフォノン分散がどのように変化するのかについて、研究が進行中である。

本研究は上記の共同研究者および吉本芳英氏(東大院理)と松平研究室大学院生(羽根田 翔 [現 旭化成], 岸上 尚弘)によって得られた成果です。

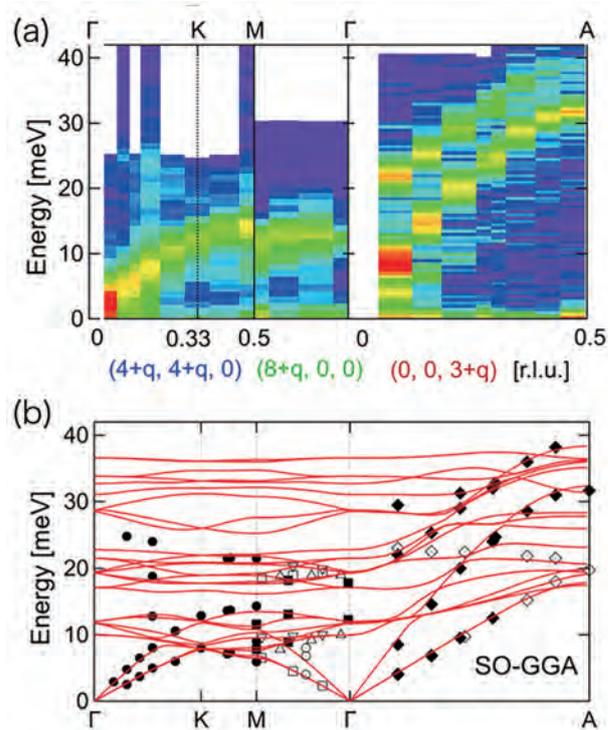


図1 (a) IXSスペクトル (b) IXSスペクトルのピーク位置とSO-GGAによる計算結果の比較 [4]

[1] M. Wakeshima, N. Taira, Y. Hinatsu, Y. Ishii, Solid State Commun. **125**, 311 (2003).

[2] I. Franke, P. J. Baker, S. J. Blundell, T. Lancaster, W. Hayes, F. L. Pratt, G. Cao, Phys. Rev. B **83**, 094416 (2011).

[3] T. Hasegawa, W. Yoshida, K. Nakamura, N. Ogita, K. Matsuhira, accepted in J. Phys. Soc. Jpn.

[4] H. Hanate, T. Hasegawa, S. Tsutsui, K. Nakamura, Y. Yoshimoto, N. Kishigami, S. Hanna, K. Matsuhira, accepted in J. Phys. Soc. Jpn.



磁気量子臨界点近傍の比熱、熱膨張係数、 グリユナイゼンパラメーター

渡辺 真仁

九州工業大学 大学院工学研究院 基礎科学研究系 准教授

遍歴電子系における磁気量子臨界現象は、スピンゆらぎのSCR理論に基づいてよく理解されてきた[1,2]。磁気相転移にともない物質の体積が変化する現象を磁気体積効果とよぶ。スピンゆらぎによる磁気体積効果の研究は、Moriya-Usamiの理論[3]が先駆的研究として知られている。しかしながら、Moriya-Usami理論の熱膨張係数 α と、SCR理論[1]の比熱を温度で積分して得られたエントロピー S から導出した熱膨張係数が一致しないことが指摘されていた[4]。

一方、繰り込み群の理論により、磁気量子臨界点近傍の熱膨張係数 α とグリユナイゼンパラメーター Γ の臨界性が報告されており、 Γ は量子臨界点で発散することが指摘されている[5]。

一般に、系の状態が単一のエネルギースケール T^* で記述される場合、グリユナイゼンパラメーターは V を体積として

$$\Gamma = -\frac{V}{T^*} \left(\frac{\partial T^*}{\partial V} \right)_S$$

と表される[注1]。 T^* が体積依存性をもつ場合、 T^* がゼロになれば Γ が発散することが示唆されるが、SCR理論[1]によれば、スピンゆらぎの特徴的溫度 T_0 は量子臨界点でも一般に有限であり、ゼロにならないことが知られている。

また、元々のSCR理論[1]では比熱を計算する際、零点スピンゆらぎの寄与が無視され、SCRの停留値条件が正しく考慮されていなかった[6,7]が、熱膨張係数およびグリユナイゼンパラメーターを正しく計算するためには、これらを正確に取り入れる必要がある。

Takahashiは、全スピン振幅の保存則を導入したスピンゆらぎの理論を展開し、零点スピンゆらぎとSCR

の停留値条件を取り入れた比熱[7]および熱膨張係数[8]の計算を行った。

本研究では、元々のSCR理論の枠組みにおいて、零点スピンゆらぎ、およびSCRの停留値条件を正しく考慮して、比熱、熱膨張係数、およびグリユナイゼンパラメーターの定式化を行い、空間次元3次元系および2次元系における、強磁性および反強磁性量子臨界点での完全な表式を導出したので、その結果を紹介する[9,10]。

比熱はスピンゆらぎのエントロピーを温度 T で微分することにより、

$$C_V = C_a - C_b \quad (1)$$

と表される[7,9,10]。 C_a と C_b はそれぞれ

$$\begin{aligned} C_a &= -Nd \int_0^{x_c} dx x^{d-1} u^2 \left\{ \frac{1}{u} + \frac{1}{2u^2} - \psi'(u) \right\} \\ C_b &= \tilde{C}_b \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)_V \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。 N は磁性を示す原子の数、 d は空間次元、 x は無次元化された波数、 x_c はそのカットオフで、 ψ' はトリガンマ関数である。ここで、 u は $u = x^{z-2}(y + x^2)/t$ と定義され、 z は動的臨界指数で、反強磁性の場合 $z = 2$ 、強磁性の場合 $z = 3$ の値をもつ。 y は無次元化された逆磁化率 $y = (2T_A \chi_Q)^{-1}$ で、量子臨界点で磁化率は発散する ($\chi_Q = \infty$) ので、 $y = 0$ となる。また t はスピンゆらぎの特徴的溫度 T_0 でスケールされた溫度

$$t = \frac{T}{T_0}$$

である。また、 \tilde{C}_b は

$$\tilde{C}_b = -Nd \int_0^{x_c} dx x^{d+z-3} u \left\{ \frac{1}{u} + \frac{1}{2u^2} - \psi'(u) \right\}$$

である。

(2)式の右辺の因子 $(\partial y/\partial t)_V$ は y についてのSCR方程式を体積一定のもとで温度微分することにより具体的に計算できる[9,10]。3次元および2次元系の強磁性および反強磁性量子臨界点において、 y についてのSCR方程式を解いて $(\partial y/\partial t)_V$ の温度依存性を求め、(1)式により比熱の温度依存性が計算された[9,10]。その結果、降温につれて C_v が支配的になり、低温における $C_V \approx C_a$ の温度依存性は過去に報告されているSCR理論[2]とスピンゆらぎの理論[7]、および繰り込み群[5,11]の結果を再現することが確認された。

熱膨張係数はエントロピーを圧力 P で微分することにより、

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b \quad (3)$$

と求められる[9,10]。 α_a と α_b はそれぞれ

$$\alpha_a = \frac{1}{V} \frac{C_a}{T_0} \left(\frac{\partial T_0}{\partial P} \right)_T \quad (4)$$

$$\alpha_b = \frac{1}{V} \frac{\tilde{C}_b}{t} \left(\frac{\partial y}{\partial P} \right)_T$$

で与えられる。これは従来議論されてきた自由エネルギーから導出された α の表式[7]よりも簡潔であり、SCR理論の枠組みにおいて互いに等価であることが証明された[10]。これにより上述したSCR理論における比熱と熱膨張係数の間の不一致の問題が解決した。

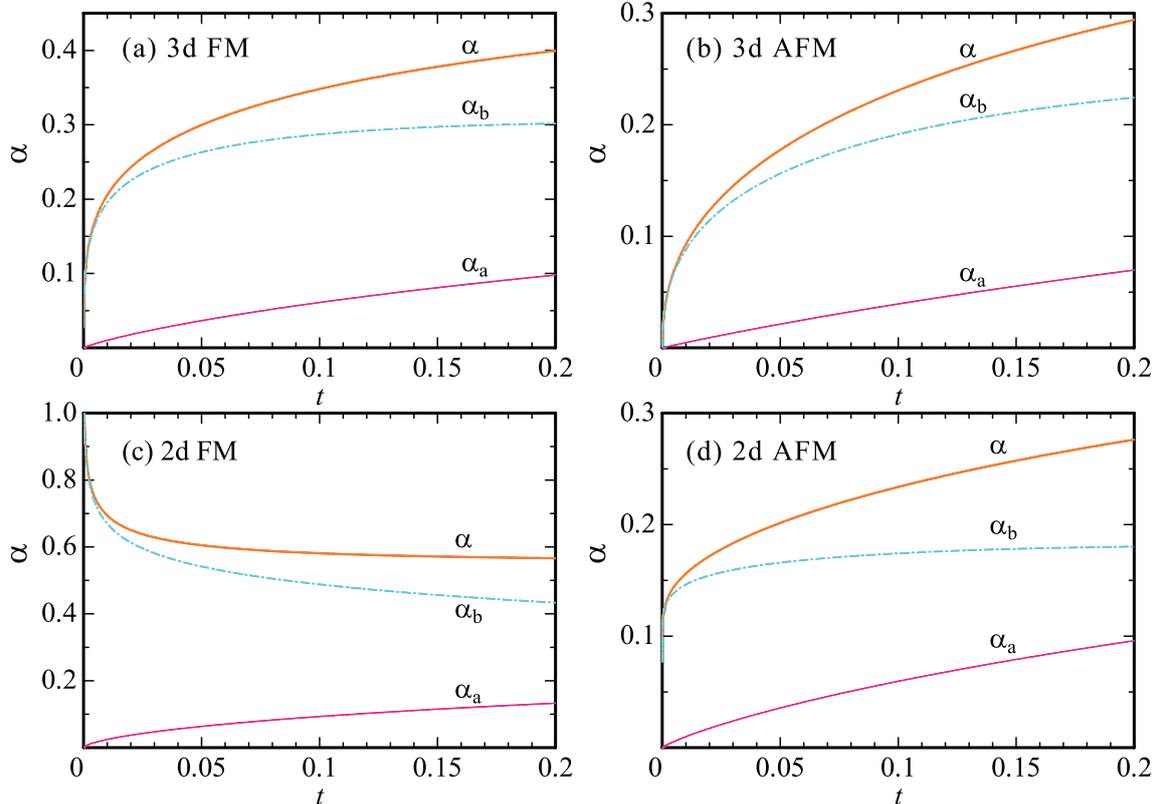


図1：3次元系の(a)強磁性、(b)反強磁性、2次元系の(c)強磁性、(d)反強磁性の各量子臨界点における熱膨張係数の温度依存性 [10]。

ここで重要な点は、温度依存性をもつ因子 $(\partial y/\partial P)_T$ が(4)式の右辺に現れるという結果であり、過去の繰り込み群の研究[5]では見落とされていた。しかしながら以下に示すようにこの因子が熱膨張係数とグリユナイゼンパラメーターに重要な寄与をすることがわかった。

(3)式に基づいて計算された、3次元および2次元系の強磁性および反強磁性量子臨界点における熱膨張係数の温度依存性を図1(a)-(d)に示す。降温につれて α_b が支配的になり、 C_a が支配的になる比熱とは対照的である。 $d+z > 4$ の場合[すなわち、図1(a), (b), (c)の各場合]には、低温の量子臨界領域 ($t < 10^{-4}$) では因子 $(\partial y/\partial P)_T$ は温度によらない定数とみなされるので、 $\alpha \approx \alpha_b \propto \tilde{C}_b/t$ と評価できる。その臨界性は表1のようになり、繰り込み群の結果[5]と一致する。しかしながら、 $d+z=4$ の場合[すなわち、図1(d)の場合]には、 $(\partial y/\partial P)_T$ の温度依存性が量子臨界性にも寄与するので、表1のように繰り込み群の結果[5]と異なる臨界性を与えることがわかった。これまで2次元系の磁気量子臨界点で熱膨張係数が発散することが繰り込み群の理論[5]により提唱されていたが、今回、2次元反強磁性の場合は発散しないことが示された[9,10]。また、図1(a)-(d)の各場合とも、中間温度領域から高温

class	α	Γ
3d FM	$T^{1/3}$	$-\frac{T^{-2/3}}{\ln T}$
3d AFM	$T^{1/2}$	$\frac{T^{-1/2}}{\text{const.} - T^{1/2}}$
2d FM	$-\ln T$	$-T^{-2/3} \ln T$
2d AFM	$-\frac{\ln(-\ln T)}{\ln(-\frac{T}{\ln T})}$	$\frac{1}{T \ln T} \frac{\ln(-\ln T)}{\ln(-\frac{T}{\ln T})}$

表1：3次元および2次元系の強磁性および反強磁性の量子臨界点における熱膨張係数 α とグリユナイゼンパラメーター Γ の量子臨界性 [9,10]。

のキュリー・ワイス領域にかけて、(4)式の因子が温度依存性に寄与することがわかった。

グリユナイゼンパラメーターは

$$\Gamma = \frac{\alpha V}{C_V \kappa_T} \quad (5)$$

と定義される。 κ_T は等温圧縮率である。これに(1)式と(3)式を代入することにより、

$$\Gamma = \Gamma_a + \Gamma_b \quad (6)$$

と表される。ここで、 Γ_i ($i = a, b$) は

$$\Gamma_i = \frac{\alpha_i V}{C_V \kappa_T}$$

である[9,10]。

また、SCR理論のエントロピー一定のもとで、断熱過程におけるグリユナイゼンパラメーターは

$$\Gamma = -\frac{V}{T_0} \left(\frac{\partial T_0}{\partial V} \right)_S - \frac{\tilde{C}_b V}{C_a t} \left(\frac{\partial y}{\partial V} \right)_S \quad (7)$$

となることが直接示される[10]。この結果は、グリユナイゼンパラメーターがスピンゆらぎの特徴的温度 T_0 の体積微分と逆磁化率 y の体積微分の和で表されることを意味している。(7)式の第一項が(6)式の Γ_a に、第二項が Γ_b にそれぞれ対応している。

典型的な重い電子系の場合について(5)式により計算された、3次元および2次元系の強磁性および反強磁性量子臨界点におけるグリユナイゼンパラメーターの温度依存性を図2(a)-(d)に示す。 Γ_a は重い電子系では典型的には $O(10)$ 程度増大した値をもち、弱い温度依存性しか示さないが、 Γ_b は降温につれて絶対値が増大し、各クラスとも絶対零度で発散する。これにより、これまで繰り込み群で提唱されていた Γ の発散の起源

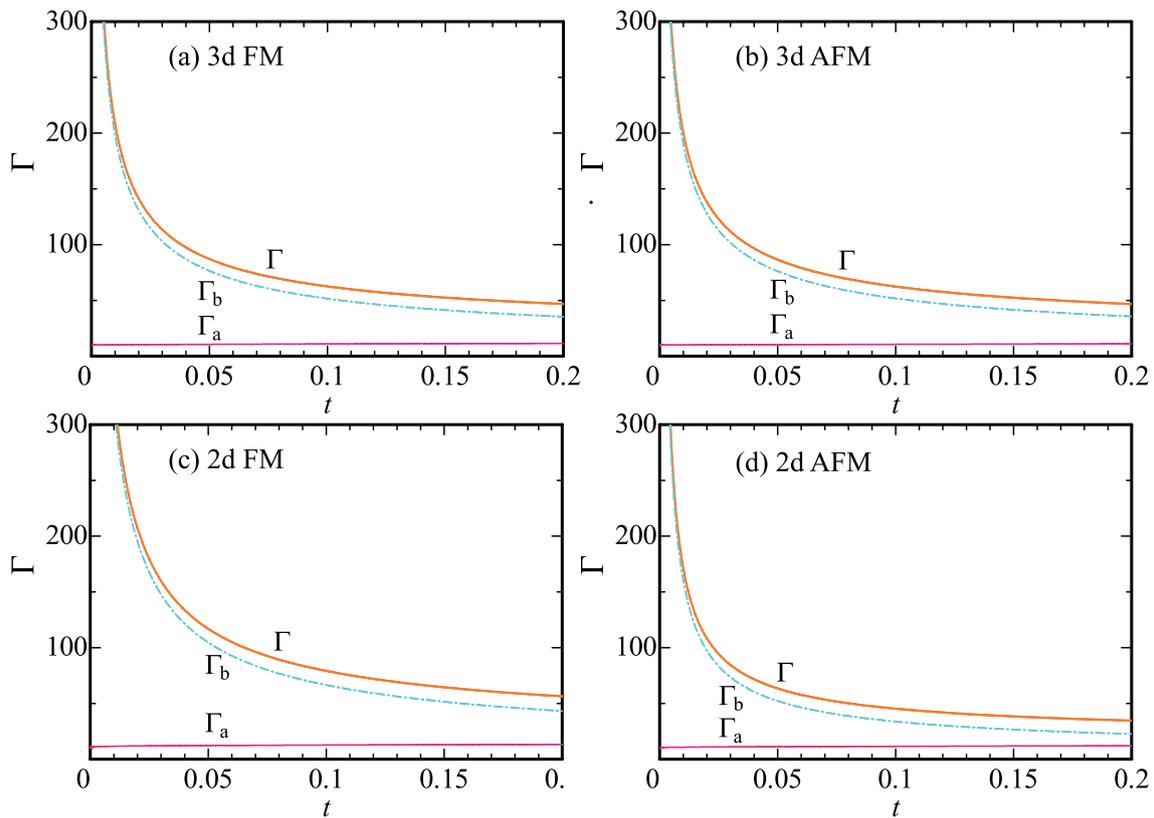


図2：3次元系の(a)強磁性、(b)反強磁性、2次元系の(c)強磁性、(d)反強磁性の各量子臨界点におけるグリュナイゼンパラメーターの温度依存性[10]。

が、(6)式の Γ_b 項に由来することが示され、スピンゆらぎの観点からその物理的描像が明らかとなった。

図2(a)-(d)の各場合とも、 Γ_b の中の a_b の温度に依存する因子 $(\partial y/\partial P)_T$ が中間温度領域から高温のキュリー・ワイス領域まで温度依存性に寄与しており、 $d+z=4$ の場合[すなわち、図2(d)の場合]には、低温の量子臨界性にまで影響することがわかった。このため、低温の量子臨界領域($t < 10^{-4}$)における Γ の温度依存性は $d+z > 4$ の場合には繰り込み群の理論の結果[5]と一致するが $d+z=4$ の場合[すなわち2次元反強磁性の場合]にはそれとは異なることがわかった[9,10]。

今回、熱膨張係数とグリュナイゼンパラメーターの

表式がSCR理論に基づいて(3)式と(6)式のように導出されたことにより、低温の量子臨界領域から高温のキュリー・ワイス領域にかけての全領域で温度依存性がはじめて明らかとなった。今後様々な物質での実験との比較を行う際に有用と考えられる。注意すべき点として、表1の量子臨界性は十分低温で現れる点である。文献[10]で示されているように、典型的には $t < 10^{-4}$ の低温で表1の温度依存性が現れる。そのため実験との比較の際には、今回明らかになった(4)式の因子 $(\partial y/\partial P)_T$ の a 、 Γ に対する温度依存性への寄与が重要となる。

また、熱膨張係数およびグリュナイゼンパラメー

ターは磁気量子臨界点およびその近傍で一般に符号変化を示すことが知られている[1,5,7]。Ce系およびYb系重い電子系の温度 - 圧力相図における符号変化を含めた α と Γ の一般的性質とこれまでの実験との対応、それに重い電子系における特徴的溫度である近藤溫度 T_K とスピンゆらぎの特徴的溫度 T_0 の微視的な関係など、詳しくは文献[10]をご覧ください。幸いである。

本稿の内容は、三宅和正氏との共同研究の成果に基づいている。

[注1] たとえば通常金属におけるフェルミ溫度 $T^* = T_F$ や、フォノンが支配的な格子系におけるデバイ溫度 $T^* = T_D$ などが典型例としてあげられる。

-
- [1] T. Moriya, Spin Fluctuations in Itinerant Electron Magnetism (Springer, Berlin, 1985).
[2] 守谷亨 『磁性物理学』 (朝倉書店, 2006年).
[3] T. Moriya and K. Usami, Solid State Commun. **34**, 95 (1980).
[4] S. Kambe, J. Flouquet, P. Lejay, P. Haen, and A. de Visser, J. Phys.: Condens. Matter **9**, 4917 (1997).
[5] L. Zhu, M. Garst, A. Rosch, and Q. Si, Phys. Rev. Lett. **91**, 066404 (2003).
[6] A. Ishigaki and T. Moriya, J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 3673 (1999).
[7] Y. Takahashi, J. Phys.: Condens. Matter **11**, 6439 (1999).
[8] Y. Takahashi and H. Nakano, J. Phys.: Condens. Matter **18**, 521 (2006).
[9] S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 034712 (2018).
[10] S. Watanabe and K. Miyake, Phys. Rev. B **99**, 035108 (2019).
[11] U. Zülicke and A. J. Millis, Phys. Rev. B **51**, 8996 (1995).
-

本記事は前号に掲載予定でした。編集過程の手違いにより本号での掲載になりましたことをお詫びします。
(編集委員会)



J-Physics ものづくり学校第4回 「対称性・群論トレーニングコース in 高野山」報告

本山 岳

島根大学大学院自然科学研究科 准教授

1. はじめに

2019年8月5日から9日までの5日間にわたり、ネスポロ・マッシモ先生(フランス・ロレーヌ大学、理工学部特別教授)による「対称性・群論トレーニングコース in 高野山」が行われました。理論・実験系によらない学生23名と教員10名の参加があり、多くの先生が対称性や群論を重要と考えて学生を送り出していることを感じました。会場は2016年にもJ-Physicsの若手夏の学校が行われた高野山大学で、宿泊も再び宿坊の天徳院にお世話になりました。

私にとって結晶の対称性はぜひ学び直したいことでしたが、群論と聞いてハードルを高く感じました。プログラムをみると、夜まで講義と質問コーナーとなっており、ますますハードルがあがります。意を決して申し込みましたが、開催案内とともに掲示された講師からのコメントには「行列の予習は必要不可欠です。特に、拡大行列(行列・ベクトルペアの掛け算)は頻繁に利用します。ごく簡単ですが、慣れていないとコースの進行の大きな壁になります(経験から言います!)。」とあり、大いに怖気付きました。



講義風景

2. 講義のようす

講義は板書とスライドを併用して日本語で進められ、事前に配布されていたレジュメがたいへんに役立ちました。冒頭にマッシモ先生が「(Hの発音が難しいので)並進(Heishin)と映心(Eishin)が出てくる後半は地獄で一す!」と参加者を和ませて講義がはじまりました。最初の1、2時間で行ってきた集合論や対称操作と群論の用語だけで私の容量は簡単にあふれてしまい、レジュメを何度も見なおしながら必死について行く有り様となりました。学生の皆さんの方がよく食らい付いていたように思います。

講義はとてうまく設計されていて、要所に設定されている演習が理解に役立ちました。席順であてられて演習問題に答えるのですが、播磨先生も含め教員も学生も平等にマッシモ先生の生徒として扱われました。教員という立場もあるので、「わかりません。」と言うわけにもいかず、緊張感がありました。マッシモ先生の講義の組み立ては、教え方としてもとても参考になりました。

同じ目的を持って積極的に集まった生徒ですから、学びの雰囲気が出来上がると、質問も活発に出始めます。博士後期課程の学生たちは一日の長ありで、マッシモ先生の間違いを指摘する場面もありました。頭の回転の遅い私にとっては疑問が湧いたころには次の話題になってしまっており、不甲斐ないことでした。

講義は、集合論に関する用語の復習から始まり、写像や群に関する事、結晶における対称操作・幾何的要素・対称要素と続きました。その後、1次元ブラベー格子から、2次元ブラベー格子と進む中で、対称操作



集合写真

と対称要素が増えていくことを学び、対称操作が比較的単純な2次元格子を使って位数と結晶族の表を完成させました。結晶対称性を学ぶ上で、2次元格子の対称操作を意識しながら、もう一軸増やして3次元にしていくとどうなるか理解していく方法は明快です。実際の3次元構造の対称性から勉強しはじめた私にとって結晶の分類は覚える物でしたが、次元を上げていって必然的に違いが現れる学び方に感動しました。3次元になり対称操作が増えて複雑になっても、その多様性を楽しめました。物質探索に挑み続けているおかげで結晶構造を頭の中に描くのは得意な方で、これまでは思い描いた結晶構造から対称性を把握していましたが、講義によってそれがInternational Tableに書かれている対象操作の記号と結びついていくことを非常に気持ちよく感じました。

夕食後も学生さんたちは浴衣姿でマッシモ先生を囲んで質問や演習をしていました。また、ほぼ毎日、私的懇親会がありました。私には最後の夜の議論がとても印象に残りました。播磨先生が URu_2Si_2 における対称性の低下をどのように表現したらよいかについて、マッシモ先生と話し始めたのです。(URu₂Si₂の対称性については議論が続いており、私の理解が追いついていない点や偏った視点からの感想であることをお許し下さい。) X線構造解析に(今のところ?)全く姿を現さない対称性の低下をどのような対称性の破れに注目すればよいのか実験家に伝えるために空間群を利用しようとする播磨先生と、空間群を利用して表すことが出来る対称性の低下は必ずX線構造解析に現れるはずで、正しく伝えるためには正しく表現しなければならないと主張するマッシモ先生の意見は平行線を辿り

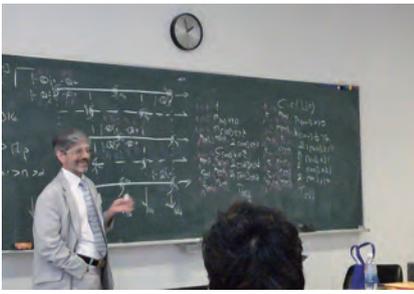
収束しません。結局、電子状態を表現する方法がないことが問題だと結論でした。磁気秩序の対称性を表現するには磁気群がありますが、多極子秩序を表現する術はなく、磁気構造を観測するには中性子散乱という手法がありますが、多極子秩序の構造を直接観測する手段がないことが大いに問題であると実感しました。この時、マッシモ先生と播磨先生はX線では見えないことから“結晶を構成する元素の色”と表現して議論していたと思いますが、J-Physicsはまさにこの“色”について分類し、観測を目指した領域研究であると私は理解しています。この色を直接観測できる日がくれば、URu₂Si₂の隠れた秩序が見えるようになるのだと期待しています。この議論の聴講者は私だけで、この感動を共感できる人がいなかったことが残念ですが、贅沢な時間を過ごすことができました。



宿舎となった天徳院

3. ネスポロ・マッシモ先生

高野山とはいえ暑い日本の夏であったにも関わらず、スーツにネクタイをきちんと着こなしたおしゃれな先生と言うのが、マッシモ先生の印象です。コー



講義中のマッシモ先生



休憩中にも質問が続き、休めないマッシモ先生



質問コーナーの様子

ヒーがないと身体が動かないとの要望でエスプレッソマシンが用意されていました。

対称性や群論の授業では言葉を正確に使わざるを得ないわけですが、マッシモ先生は正確に表現するために丁寧に言葉を選んで使われていて、私はいかげんに日本語を使っていることを恥ずかしく思いました。食事の時に「山本さんはたくさんいるけど、本山さんは珍しい」と話しかけて頂き、名前の由来の話になりました。「ネスポロ」と言うのはイタリア語で「琵琶の木」、「マッシモ」は「最高の男の子」と言う意味だそうで、名前に由来や親の気持ちが含まれるのが日本だけでないことを知り、命名の重要性・言葉に含まれる意味の大切さを改めて感じました。

マッシモ先生には多くのことを学ばせて頂きました。朝9時から18時までの長時間の講義、食事や入浴後に22時までの学生さんとの講義と質問コーナー、24時過ぎまでのプログラムにない懇親会にまで参加していただいたことには、感謝の念に堪えません。

4. さいごに

今回、J-Physics ものづくり学校第4回「対称性・群論トレーニングコース in 高野山」に参加させていただき、結晶対称性と群論について基礎から勉強させていただきました。閉校式で「この勉強会で理解したことを今後の研究に役立てて論文を書いてください。」と播磨先生が言われたように、今後の研究を進めていく上での大きな武器を手にしたと思います。参加した皆様の今後の発展が期待されます。

ハードなスケジュールにもかかわらず、一人の脱落者も出さずに本トレーニングコースが終了し、参加者

全員がマッシモ先生から直々に修了証を頂きました。マッシモ先生には学生からの寄せ書きと高野山のお土産が贈られました。びっしりと書き込まれた寄せ書きは学生たちの感謝の表れでした。

最後となりましたが、このような面白い学校を計画して下さった播磨先生、実行委員の岸根順一郎先生（放送大学）、戸川欣彦先生（大阪府立大学）、大原繁男先生（名古屋工業大学）に心より感謝いたします。岸根先生・大原先生には、写真の提供・この原稿の執筆にあたりご助言を頂きました。

J-Physics ものづくり学校第4回「対称性・群論トレーニングコース in 高野山」

8月5日 月	8月6日 火	8月7日 水	8月8日 木	8月9日 金
		勤行（任意）		
		朝食		
		準備・移動		
		講義 (高野山大学)		
		昼食		
		講義 (高野山大学)		
		移動		
		食事・入浴など		
		懇談会 (天徳院)	講義と質問コーナー (天徳院)	

シンプルなスケジュール表



頑張り通した者だけが手にできる修了証



会議報告「J-Physics 2019 International Conference & KINKEN-WAKATE 2019 Multipole Physics」

青木 大
東北大・金研

2019年9月17日から21日まで、上記の国際会議およびチュートリアルセッションが神戸大学六甲ホールで開かれました。J-Physicsの国際会議としては、八幡平(2017年)、淡路島(2018年)に引き続き、これで3回目となります。国際会議に先立ち、東北大学のICC-IMR主催のチュートリアルセッションが開かれました。5名の講師に、スピン三重項超伝導、トポロジカル絶縁体・超伝導体、拡張多極子、強磁場実験、第一原理計算などのトピックスについて講義をしてもらいました。国際会議の方は、34件の招待講演を含む47件の口頭発表が行われました。口頭発表は、それぞれのセッションとしてまとめられ、“EuPtSi, Skyrmion, Yb-system”, “1-2-20 system”, “Solid state chemistry and new materials”, “Augmented multipole”, “Magnetic multipole”, “UTe₂”, “Exotic superconductivity”, “Miscellaneous Interesting Topics”といったトピックスのもと発表が行われました。ポスター発表は、合計92件の発表があり、二日間に渡って発表が行われました。学生・若手によるポスター発表は、ポスター賞の審査対象とされ、Ryoya Murata, Fusako Kon, Megumi Yatsushiro, Rikako Yamamoto, Takuya Matsumoto, Shota Kanasugi, Yoshiki J. Sato, Yoshiki Kuwataの8名がポスター賞に選ばれました。全体で155名の参加者があり、このうち18名はフランス、ドイツ、オランダ、アメリカ、中国、韓国、クロアチアの海外からの参加者でした。会議の発表内容は、proceedingsとしてJPSJ. Conf. Ser.から出版予定です。

全体を通して、大変興味深い発表と活発な質疑応答、議論が行われたと思います。私にとって、やはり最も印象に残ったのはUTe₂のセッションでした。UTe₂は

2018年末にアメリカで発見された新奇スピン三重項超伝導体です。すでに知られている強磁性超伝導と同じように磁場再突入型超伝導がその後見つかるなど、現在注目を集めている物質です。UTe₂の超伝導の発見者であるポスドクのSheng Ran (NIST、メリーランド大)と日仏の研究者による最新の結果の発表は、大変勢いのあるものでした。Ranの発表は、最初に風刺画のようなイラストと“Seven surprises”というキーワードで始まりました。賛否はあると思いますが、印象に残る講演であったことは誰も認めるところでしょう。私は、P. Canfieldの発表スタイルと重ね合わせて聴いていました。

2019年は、ドミトリ・メンデレーエフが周期表を見出して150周年ということで、国際周期表年とされており、そのためのパネル展示も行われていました。興味深く見た方も多かったのではないかと思います。ちなみに、真偽はともかく、ロシアではメンデレーエフは周期表というよりもウォッカの生みの親として知られていると、酒に詳しいIlya Sheikinは強調していました。たしかに米原万里のエッセイにも、そんなことが書かれていましたね。

9月は、日本物理学会、J-Physics2019、SCESと三週連続に渡って会議が行われました。私の場合は、その後、大洗研究会というユーザーミーティングがあったので、ほぼ1月、会議が続きました。正直なところちょっと多すぎるし、「会議疲れ」の方も多かったのではないかと思います。そんな中、嬉しい話も聞きました。会議の後、研究室の学生のモチベーションがとても上がったというのです。試料育成のための電気炉が学生の予定で埋まってしまっていて困っている、という嬉し

い悲鳴のような話も聞きました。オーガナイザーの一人として、こんなに嬉しい話はありません。会議の目的は、情報交換や交流を通じて今の研究をより活性化させることだからです。若い人たちが、そのような本来の目的を達成できたということは、この会議が成功裏に終わったということを物語っているのではないのでしょうか。

最後になりましたが、言うまでもなく、この会議は、多くの方々の協力・支援によって開催されました。Local committee, Program committee, Publication committee、そして事務担当の方、現地で準備してくれた学生など、一人一人お名前を挙げることはできませんが、ここに深く感謝の意を表したいと思います。

会議の写真は以下からご覧になれます。

<https://photos.app.goo.gl/sZn8DWznZuWs5fcr6>





International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2019) 会議参加報告

松田 達磨

首都大学東京 准教授

強相関電子系の国際会議 SCES' 19が、今年は日本の岡山にて開催されました(9月23~28日)。光栄なことに、その会議の参加報告記事の依頼を頂きましたが、会議の数ヶ月後に依頼を頂いたことや、会議の規模からしても、私の能力では到底会議内容をつぶさにご報告することは難しく、ごくごく一部の主観的な内容になること、予めご容赦ください。

さて、会議ホームページ等にも情報がまとめられておりますように、SCESは1992年に仙台にて最初の会議が開かれて以降、3年に1度の国際磁気会議 ICMとの合同開催も含めて28年間も続く会議とのことです。日本で開催されるのは、5度目で、アメリカと並ぶ開催回数に及んでおり、いかにこの分野における日本の研究者やそのコミュニティの貢献度が高いかが伺える一つの証拠ではないでしょうか。今回の岡山での開催は、当初立候補をしていたインドが、SCES' 17(チェコ、プラハ)の直前に立候補を取り下げ、急遽日本での開催が決定し、SCES' 17のClosingにて発表されました。くしくも、この2019年は、本領域の最終年度にあたること、さらには領域代表の播磨氏がChairを務められ、Co-chairを網塚氏、Local committeeのChairを野原氏、その他多くの領域関係者が会議の運営に携われ、その活発な研究活動が会議運営にも存分に活かされた形となったのではないのでしょうか。また、多くの学生にとっては研究成果を発表する絶好の機会となりました。実際、発表された参加者数(登録者数) 844に対し、その約60%が、国内の参加者との発表がありました。相当数の学生の参加があり、本会議の規模は、私の知る範囲では、これまでのSCESの中でも最大規模のものだったのではないかと思います。

ます。会場は、岡山駅から歩道橋等を通じて直結した岡山コンベンションセンターでした。SCES' 17のClosingにて播磨氏から開催場所が発表された際、一つの宣伝材料として「新幹線の停まる岡山駅に直結した便利な会議場」という紹介がなされていたと記憶しておりますが、その会議終了直後、J. Flouquet氏(CEA-Grenoble)と播磨氏との会食時に、Flouquet氏からは「あのような宣伝ポイントは重要性がない。お寺に神社、城など観るところがいっぱいあって、温泉に、おいしい日本酒、それにエキサイトするプログラムが大事!」といったような彼特有の毒舌にジョークの混じった攻撃があり、お二人の攻防を若干緊張しながら、側で聞いていたことを覚えております。しかし、実際に会議に参加された多くの方が感じられた通り、会場へのアクセスの良さはピカイチであり、その交通の便に加え、飲食店のある中心街へのアクセスも良く、会議参加中の生活におけるストレスが非常に少なく、とても快適でした。さらに軽食や飲み物をはじめとした「おもてなし」もかなり充実していたのではないのでしょうか。加えて画期的だと思ったことは、会議プログラムのスケジュール管理や、会議運営からのアナウンスメント、概要、メモといった情報の管理ツールとしてモバイルアプリが導入された点です。個人的には、大変重宝いたしました。これについては人によって意見が分かれるところかもしれません。資源の節約と参加者の荷物の軽減といった観点からも、今後このようなアプリの導入は増えていくのだろうと思いつつ、結局私自身の反省としては、会議で取ったメモの多くを、タブレット端末の中やPCといった外部脳に蓄積したことで満足しており、本原稿を書くにあたり、見返し



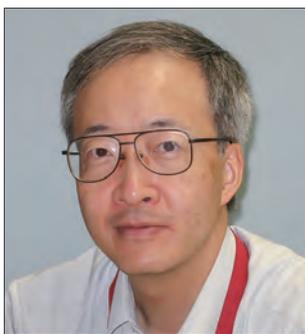
左から徳永、Sheikin、井澤、Knafo、筆者、Knebel、Brisson、青木（敬称略）

てようやく思い出すという情けないあり様で、実質的に意味のある情報管理法は、アプリの便利さとは別にあると痛感しているところです。

さて、肝心の会議内容ですが、冒頭に述べた通り、個人的な視点、かつ大雑把になりますが、やはり、 UTe_2 の超伝導状態をめぐるアメリカの研究グループと、青木大氏を中心とする日本とフランスの研究グループによる、すさまじい勢いで研究の進展とその異常な物性報告、また、 $MnSi$ や $EuPtSi$ におけるSkyrmion Latticeの研究報告は、本会議にて最も注目をあつめたトピックであったと思われます。また、従来の強相関電子系の研究テーマはもちろんのこと、多極子自由度のもたらす現象、なかでもトロイダル多極子モーメントがもたらす交差相関現象に関する理論及び実験的進展、また結晶の対称性と構成元素に注目した反対称スピン軌道相互作用がもたらす物性の研究、トポロジカル物質の輸送特性研究及び物質開発、微細加工技術やピエゾ素子等を組み合わせた様々な実験技術開発といった内容を中心に、Plenary Talkが生まれ、4回のPoster 賞の多くも上記のテーマに関連するものであったと思います。このような研究内容を見ると、いわゆる強相関電子系というキーワードでは収まらない幅広い物質研究発表の割合が拡大している印象を強く受けました。これらは、J-Physicsの研究会等において度々議論されているように、強相関電子系における多くの物理的要因の本質(キーワード)が、他の物質系の現象と深く関わっていることへの理解がより進んだことによるものだと私は思っています。

最後に、写真を1枚紹介いたします。この写真は、

SCES' 19直前に山陰のとあるホテルにおけるミーティング後の食事時の写真です。フランスのCEA-Grenoble及びCNRSのメンバーと「腹を割って」研究について議論することを目的とした(?)集まりでした。(本写真は、今回の会議のClosingでも、H. von Löhneysen氏によって紹介されたそうです。) 私が、初めて国際会議に参加したのは、1998年にパリで開催されたSCESでしたが、その時は自分の発表をするだけで精一杯で、海外の研究者とこのように友人として冗談をいいつつも、朝から晩まで議論するといった関係を築くといったことは、想像もできませんでした。考えてみるとこのSCESをはじめとする国際会議や研究会、その他様々な研究交流を通して、先人達が築いてきた関係のおかげで、私たちもこのような交流の機会を持つことができているのだと改めて気付かされます。その意味でも、国際会議を一つのきっかけとして、研究はもちろんのこと様々な交流を深めると同時に、それらをさらに次の世代の研究者に引き継いでいけるようにしなければならないと、改めて強く感じた会議でもありました。



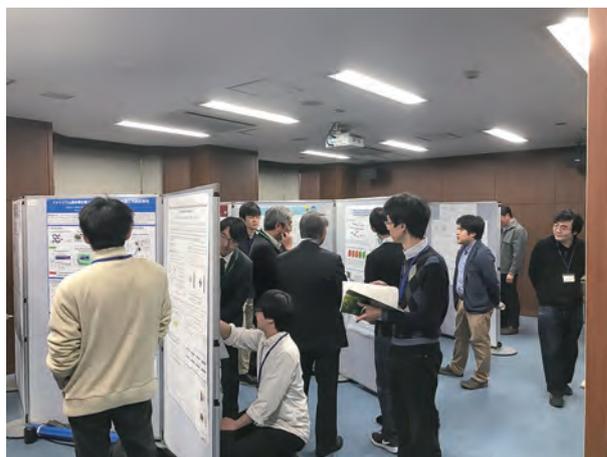
第13回物性科学領域横断研究会 「凝縮系科学の最前線」報告

榊原 俊郎

東京大学 物性研究所 教授

第13回物性科学領域横断研究会が2019年11月27日と28日の2日間、東京大学本郷キャンパスの小柴ホールにおいて開催されました。本研究会は物性関係の新学術領域の研究内容を専門外の研究者や大学院生に対して解説し、領域間のシナジー効果を高めるとともに、物性科学のホットな話題を2日間で概観することを目的として2007年に始まりました（第2回までは特定領域合同研究会）。今回は、

- ・トポロジジーが紡ぐ物質科学のフロンティア
(京都大学 川上則雄 H27-H31年度)
- ・J-Physics：多極子伝導系の物理
(神戸大学 播磨尚朝 H27-H31年度)
- ・複合アニオン化合物の創製と新機能
(京都大学 陰山 洋 H28-H32年度)
- ・次世代物質探索のための離散幾何学
(東北大学 小谷元子 H29-H33年度)
- ・ハイドロジェノミクス：高次水素機能による革新的材料・デバイス・反応プロセスの創成
(東北大学 折茂慎一 H30-H34年度)
- ・量子液晶の物性科学
(東京大学 芝内孝禎 R1-R5年度)
- ・機能コアの材料科学
(名古屋大学 松永克志 R1-R5年度)



- ・ハイパーマテリアル：補空間が創る新物質科学
(東京理科大学 田村隆治 R1-R5年度)
- の8領域に加えて、ゲスト講演として
- ・蓄電固体界面科学
(名古屋大学 入山恭寿 R1-R5年度)
- が参加しました。

本領域からは、私がEuPtSiのスキルミオン相について、また青木大さんが UTe_2 の三重項超伝導について講演を行いました。初日の午後にはポスターセッションがあり、68件のポスター講演がありました。ポスターセッションにはポスター賞が設けられ、本領域と関係の深い、電通大伏屋研究室の粟島裕大さんが優秀ポスター賞を受賞されました。おめでとうございます。また、初日の夕方に凝縮系科学賞の授賞式がありましたが、これについては次項で報告します。

2日間にわたり、異分野の最新のトピックスについて聞くことができ、密度の濃い研究会でしたが、講演会場は思ったよりも人が少なく、大部分がシニアな先生方で若い人や学生さんが少ないのは少々もったいない気がしました。

ポスター賞受賞者

○最優秀ポスター賞

田中桜平 東大新領域

キタエフスピン液体候補物質 α - RuCl_3 における
磁場角度回転比熱測定

○優秀ポスター賞

粟島裕大 電通大基盤理工

SrTiO_3 における磁気抵抗の理論

池田達彦 東大物性研

層状 MX_2 化合物における自由エネルギー
多谷構造とストライプCDW構造の起源

片岡亨太 東大物性研

Kitaevスピン液体候補物質 Os_xCl_3

友田雅大 東大院総合文化

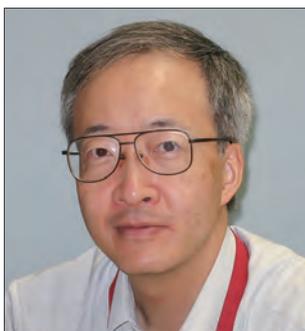
ポリ酸とポリエチレングリコールからなる結晶性
プロトン伝導体

山崎勇樹 名大理

トポロジカル結晶超伝導体における
マヨラナクラーマース対の電磁気応答の理論



受賞者と秋光組織委員長(前列左から2番目)と陰山ポスター賞担当(後列右端)



橘高俊一郎さん 凝縮系科学賞受賞

榊原 俊郎

東京大学 物性研究所 教授

本領域B01班の公募研究メンバーである東京大学物性研究所の橘高俊一郎さんが第14回凝縮系科学賞（実験部門）を受賞されました。受賞対象となった研究は「極低温精密比熱測定による超伝導ギャップ構造の決定」です。2019年11月27日、東京大学本郷キャンパス小柴ホールで表彰式が行われ、同賞運営委員長の秋光純先生から賞状その他が贈られました。橘高さん、おめでとうございます。

凝縮系科学賞は、物理・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って、秋光純先生と福山秀敏先生が私費を投じて2006年に創設した賞です。毎年、原則として実験系・理論系各1名が受賞者として選ばれます。今回は橘高さんとともに、理論部門では東京大学総合文化研究科の水野英如さん（受賞理由は「ガラスの力学特性における階層構造の理論的解明」）が受賞しました。式では永長直人選考委員長から選考経過の報告がありました。審査は研究業績の当該分野における位置付け、方法論の新しさや的確さ、研究内容の質の高さ、波及効果などの観点から行われますが、今回は応募者のレベルが高く、選考に非常に苦労したということでした。

橘高さんは、希釈冷凍機温度で磁場を回転させながら比熱を精密に測定することによって超伝導体のギャップ構造を決定する実験手法を確立し、さまざまな非従来型超伝導体のギャップ構造を明らかにしました。

受賞講演では、実験手法の説明の後、 CeCu_2Si_2 [1]と Sr_2RuO_4 [2]の実験結果が紹介されました。前者は、長年 d 波超伝導であると考えられてきた典型的な重い電子超伝導体が、実はフルギャップの s 波超伝導である可能性が高いことを初めて指摘した仕事です。また後者は p 波超伝導体と考えられてきた Sr_2RuO_4 が水平ラインノードを持ち、 p 波とは矛盾することを他の研究に先立って指摘した仕事です。いずれも当該分野に大きなインパクトをもたらしたもので、これらの業績が認められて今回の受賞となりました。

最近、橘高氏は開発した装置を磁性研究にも応用し、「磁場回転による磁気熱量効果」という新しい測定手法を見出しました。この手法は磁場中エントロピーの異方性を精度良く抽出することができ、高い応用可能性があることから今後発展が期待されるもので、本Newsletterにも紹介記事（Vol.6、橘高さん）があります。今後の橘高さんのますますのご活躍を期待します。



左から：秋光運営委員長、橘高氏、水野氏、永長選考委員長

[1] S. Kittaka *et al.*, *Physical Review Letters* **112**, 067002 (2014).

[2] S. Kittaka *et al.*, *Journal of the Physical Society of Japan* **87**, 093703 (2018).



J-Physics 令和元年度領域全体会議報告

藤 秀樹

神戸大学 大学院理学研究科 教授

はじめに

令和元年度領域全体会議は新春の1月6日～8日に神戸大学百年記念館六甲ホールにて開かれました。本新学術領域の最終年度に行われたこの会議では、5年間にわたる研究について総括を行うことはもちろんですが、新展開へのシーズを発掘することも重要な課題となります。会議は、A01計画研究からD01計画研究の成果発表とX00総括班ならびにY00国際活動支援班のまとめのセッションを皮切りに、研究テーマ毎に10のセッションとポスターセッションが行われました。

各計画研究の総括

【A01班】 東大院理の中辻氏より、これまでの研究の総括がありました。従来の f 電子多極子のみならずクラスター多極子まで幅広く研究が展開され、特に $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ 系を中心とし、多極子によるマルチチャンネル近藤効果とエキゾチック超伝導に関する成果や、 Mn_3Sn における異常ネルンスト効果及び、磁気スピンホール効果など成果が報告されました。

【B01班】 東北大金研の青木氏より $5f$ 系の多極子自由度と遍歴性に関するこれまでの総括がありました。この班では、主として URhGe などの強磁性超伝導や URu_2Si_2 などの古くより知られた異方的超伝導についての成果が報告されました。また、新しいスピン三重項超伝導体として脚光を浴びている UTe_2 の研究の進展について概略が紹介されました。

【C01班】 北大院理の網塚氏より拡張多極子の動的応答について、これまでの研究の総括がありました。 UNi_4B や CeRh_2Si_2 での磁気秩序状態における電気磁

気交差相関による電流誘起磁化の実験的証拠と今後の課題について報告がありました。また、局所空間反転性が破れた SrPtAs などのカイラル超伝導の理論についても紹介されました。

【D01班】 岡山大異分野基礎科学研究所の野原氏より報告がありました。【X00班、Y00班】神戸大院理の播磨代表より報告がありました。この2つの時間帯は、会場空調設備の不調のため本部施設部とのやりとりで、残念ながら席を外し詳細はわかりませんが、野原氏の発表では新物質探索の試みやその成果について報告がなされたとのことでした。また、播磨代表の発表では、これまでの領域の活動内容の説明と若手海外派遣の実施状況やその成果の報告がなされたとのことでした。

公募研究の総括

この新学術研究では「 d 電子系と f 電子系の交流や研究項目の垣根を越えた研究交流を積極的に行い研究の活性化を行う」と謳っておりました。実際に、多極子やスピン軌道相互作用を切り口に分野や研究項目の垣根を超えて共同研究がなされた結果、今回のセッションは研究項目に縛られず物質や物性を切り口にプログラムが生まれ、分野融合がうまくいったと感じさせるものでした。10の口頭発表セッションと1つのポスターセッションが設けられました。

【EuPtSi】 この物質の秩序状態の磁場中で見られるA相の秩序変数がtriple-qのSkyrmion相であることが中性子や共鳴X線散乱などで確認されたことが報告されました。このSkyrmion相は MnSi で議論されてきた d 電子系の概念ですが、 f 電子系の伝統芸でもある

試料の純良化と d 電子系での異常磁気相への実験的アプローチの協奏により明らかになったもので、分野を超えた物理の普遍性と多様性を印象づけるものでした。

【カイラル系】 このセッションでは、キラル磁性体の結晶育成や磁気相図、電流誘起磁化の観測が発表されました。 CsCuCl_3 では攪拌法により10cmもの大きさを持つ片手系単結晶が育成されるまでに至ったことが報告されました。一方、 $4f$ 電子系キラル化合物で完全な片手系単結晶育成はできていないものの、反強磁性転移温度以下で電流誘起磁化テンソルの対角成分の増大が見られることなどが報告されました。

【拡張多極子 1・2】 このセッションは、 d 電子系を中心に議論されました。特に Mn_3Sn での磁気秩序状態は理論やXMCD実験などから“クラスター磁気八極子”で理解できることが報告されました。 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ でも電気トロイダル四極子の可能性が指摘され、実験的観点から議論がなされた。従来の f 電子多極子の概念を拡張した“拡張多極子”の物理が d 電子系でも成り立つことを印象づけるものでした。

【物質開発および多極子秩序】 このセッションは、私は学内業務のため中座し詳細はわかりませんが、Bi系層状超伝導体や、 β パイロクロア酸化物、硫化物、有機分子性導体などが議論されたようです。

【超伝導 1・2】 最近みつかった UTe_2 の超伝導状態の異常性を中心に議論が展開されました。特に印象的であったのは、 b 軸のみ磁場中超伝導相図が UCoGe と似た特異な振る舞いを示し、また、 UPt_3 や UBe_{13} の超伝導多重相を想起させるような特異な超伝導相図が得られていることが報告されました。また、スピン磁

化率の測定についても、わずかながら減少することが報告され、スピン三重項超伝導が実現していると考えられます。さらに、このセッションでは強磁性超伝導体や古くから知られた U 化合物超伝導体や Sr_2RuO_4 についても議論されました。

【多極子相関・多極子近藤効果】 このセッションではPr1-2-20での重い電子状態や希薄系の単サイト非フェルミ流体的挙動について報告がありました。特に多極子物理の草分けでもある CeB_6 について低周波NQR実験から多極子秩序に関する明白な情報が報告されたことは印象に残りました。

【奇パリティ系理論】 このセッションは、量子スピン系に関わる議論や奇パリティ結晶場における異常物性や動的平均場のあたらしい展開などが報告されました。

【ポスターセッション】 ポスターセッションでは43件の講演があり、活発な議論がなされました。また、学生を対象としたポスター賞が設けられ、以下の方々が受賞しました。以下に、受賞者名(敬称略)・所属・と発表題目と概要を記します。

P08: 竹村優輝・神戸大院理・「微視的・巨視的測定から見る近藤格子系 CeRh_6Ge_4 における強磁性量子臨界点の存在」(概要)反強磁性量子臨界点近傍では異方的超伝導や非フェルミ流体状態など異常物性が報告されているが、純良弱強磁性体では強磁性量子臨界点は見られないと考えられている。発表者は近藤格子弱強磁性体 CeRh_6Ge_4 の圧力下電気抵抗ならびに常圧下のGe-NMRより約1 GPaの加圧下で強磁性量子臨界点が存在することを強く示唆する結果を報告した。

P11田島聖士・東大物性研・「 PbRe_2O_6 におけるスピン軌道結合金属の可能性」(概要)強いスピン軌道相互作用をもち空間反転対称性を有する系は、フェルミ流体不安定性を持ち、空間反転対称性を破る相転移が自発的に起こり、結果として誘起される反対称スピン軌道相互作用により多極子秩序などの秩序相が現れることが期待されている。この研究では、その候補物質であるパイロクロア型 PbRe_2O_6 の物性測定を行い2段の構造相転移などが存在することなどを報告した。

P18:仲嶺元輝・京大院理・「スピン三重項超伝導候補物質 UTe_2 の超伝導相における ^{125}Te -NMR」(概要)U化合物強磁性超伝導体では強磁性と超伝導が共存し、パウリ極限を超えるような高い上部臨界磁場を持ちつつこれらの系ではイジング型の強磁性スピン揺らぎが超伝導機構に関与していると考えられている。 UTe_2 は強磁性を示さないが、強磁性超伝導体と類似した超伝導特性を示す。発表者は、単結晶試料のTe-NMRによるNMR緩和率やスピン磁化率測定から UTe_2 がスピン三重項超伝導であることを強く示唆する結果を報告した。

P24:藤井拓斗・兵庫県大院理・「ディラック/ワイル半金属(黒リン, MoTe_2)の高圧下NMR測定による研究」(概要)2次元層状ディラック半導体やワイル半導体は、その特異な物性から興味を持たれている。黒リンは常圧下では半導体であるが、加圧下でディラック・コーンをことが示唆されている。発表者は、圧力下NMR緩和率の磁場変化などからこの系でディラック電子系特有の振る舞いを明らかにした。また、Type-II

ワイル半金属 MoTe_2 の圧力下超伝導についてもNMR実験から超伝導に関する低エネルギー励起を報告した。

P29:篠崎真碩・島根大院自然・「Ceジグザグ鎖構造を有する反強磁性Ce化合物における電気磁気効果の観測」(概要) Ce_3TiBi_5 はCeがc軸方向にジグザグ鎖構造をとる六方晶の化合物であり、 $T_N=5.0$ Kで反強磁性を示す。この磁気構造は、フェロ・トロイダル秩序とみなすことができ、電流誘起磁化の発現が期待される。電流を印加していない場合の磁化に比べ、a軸に電流を印加すると、電流の正負で逆向きの電流誘起磁化が観測され、 Ce_3TiBi_5 でフェロ・トロイダル秩序が生じていることを強く示唆する結果を報告した。



授賞式は、最終日のクロージングセッションで行われ、播磨代表から5人の大学院生の方々に賞状と記念品が贈呈されました。J-Physicsのロゴマークが掘られたクリスタル・ペーパーウェイトで播磨代表が自分の分も用意したかったと話されていましたが、筆者もいたただきたいと思うような立派なものでした。おめでとうございます。皆さんのさらなる活躍に期待したい

と思います。

懇談会

懇談会は2日目の夕刻に会議場近くの瀧川記念学術交流会館で開かれました。福山神戸大学理学研究科長の挨拶があり、高台から見下ろす神戸の夜景を眺めながら熱い議論が交わされ、また、秋光先生からのお話もあり、懇談会は大いに盛り上がりました。懇談会では議論が足りなかった総勢20名ほどの方々が、私の研究室にこれ23時頃まで活発な議論を繰り広げました。

評価委員講評

会議の最後に評価委員の上田寛先生と鹿野田一司先生から講評をいただきました。上田先生からは、物質開発の観点からの講評でした。当初、 f 電子系の物理は d 電子系に比べ細かく何をやっているのかわからないという印象であったが、2年間でその印象が変わり、 d 電子に比べ細かい物理が低温で起きており、わかりやすいと感じるようになったとの印象を述べられました。また、物事の本質を見極めるためには、試料の大切さや細かく一つ一つを抑えていかなければ本丸にたどり着かないという物理の本道をつらぬく姿勢が成果に結びついているのではないかの講評をいただきました。結びに、本領域研究の成果を野球に例えられ、この新学術は満塁ホームランこそなかったが、卓越した技術で安打・長打を量産し2000本安打をも達成し名球会入りできたのではとの賛辞をいただきました。先生の哲学として、一発満塁ホームランよりも、とにかくコツコツと塁にでることが重要であ

り、それを実践したことが成功に結びついたのでないかというニュアンスの言葉で結ばれ大変印象に残りました。

また、鹿野田先生は、ご自身の経験から5年間で学術の方向性を創出することの難しさについて語られ、本新学術領域研究スタート時点での審査委員からの注文である、(1) d と f との分野融合をどこまでできるか? と、(2) 多極子をキーワードにどこまで物理を広げることが出来るか? について評価のお言葉をいただきました。(1)はEuPtSiを例にとり d 電子のスカーミオンと同じ物理が f 電子系でも起こっており物理の普遍性と多様性を示すことができたこと、(2)については、拡張多極子という概念で d 電子系やスピン軌道相互作用が弱い極限である有機系での物理まで説明ができるという普遍性を示せたこと、について言及されました。さらに、人の交流と d - f 融合がうまく達成でき、5年間で多極子という概念の普遍性を示すことができたことは大きな成果であろうとの言葉をいただくことができました。また、結びとして、本研究の成果をコミュニティ外にも積極的にアピールしていくことが重要であるとの助言もいただきました。



最後に

この会議は新学術領域研究最後の全体会議となります。本新学術が採択される以前は、「 f 電子にはまだやることあるのか?」、「多極子はマニアックで難しい」とコミュニティ内でも声が出ていましたが、この5年間を通して、評価委員の上田先生が述べられましたように物事の本質を見極めるためには一つ一つを抑えていかなければ本丸にたどり着けないことを実感しました。また、若手の活躍もめざましく、鹿野田先生の提唱された“ J -wave”のように f -electron multiple physics から augmented multipole physics へとまだまだ広がって次の学理創造につながっていくと希望をもった瞬間でもありました。総括班・C01班員として活動させていただきましたが、播磨代表をはじめとする領域関係者の皆様の物理に対する熱意が実を結び、さらに新たなシードを生んだ5年間ではなかったかと思えます。

年末の気象予報では年始に寒波の襲来が予想されていましたが、蓋を開けてみると、会議開催中の毎日気温が10度以上と例年にない暖かい年始の会議となりました。参加者の多くは神戸大学へ通じる急勾配(通称、定年坂)を汗かきながら登る3日間となったようです。加えて、六甲ホールの空調設備の老朽化による不調が追い打ちをかけ、初日より不快な思いをされた方があったかと思いますが、ご容赦願えればと思います。





Ames滞在記

桑田 祥希

神戸大院理 物理学専攻 博士後期課程1年

古川 裕二

Ames Laboratory &
Iowa State University

丁慶平

Ames Laboratory &
Iowa State University

Khusboo Rana

Ames Laboratory &
Iowa State University

「JPhysics国際活動支援班」からの援助を受け、2019年6月15日から9月8日まで86日間、アメリカ合衆国、アイオワ州、エームス市に位置する、アイオワ州立大学・エームス研究所に滞在しました。このように始まるはずだった私のAmes滞在記ですが、航空券の搭乗者情報とパスポートの姓名が一致しないというミスにより、出発間近、気持ちの高まりも最高潮に達した空港を後に帰宅する、忘れられない1日遅れのスタートとなりました。しかし、そんな失敗も到着2日後には現地の学生と打ち解けるための良いつかみとなり、人生最大の失敗も「海外旅行の航空券は直接航空会社から予約するべし」という教訓とともに、経験という糧となりました。お騒がせしてしまった関係者の皆さまにはこの場を借りて改めてお詫び申し上げます。

私を受け入れてくださったのは、アイオワ州立大学・エームス研究所に所属しNMR実験を強みとしている古川ラボです。古川先生をはじめとする、ポスドクのQing-Ping Dingさん、博士学生のKhusboo Ranaさんによる手厚いサポートのおかげで、Amesに持って行った3つの試料のうち2つで、満足のいく挑戦ができました。さらにエームス研究所のP. C. Canfield氏のグループと古川ラボの共同研究にも参加させていただき、普段とは異なるテーマに取り組む楽しさも知ることができました。神戸から持って行った試料の一つは

200 Kと250 K付近で2段階の金属絶縁体転移を起こすRuAsです[1,2,3]。CDW形成によるパイエルズ転移の可能性などが指摘されていますが、金属絶縁体転移の機構は完全に明らかになったとは言えません。この派遣の目的の一つは、古川ラボの持つ高温環境で使用可能なNMR/NQR実験用プローブを使うことでした。300 K以上の高温金属相に対し⁷⁵As-NQRを行い、転移点で発散する電場勾配の揺らぎの振舞を、より高温まで明らかにすることを試みました。初めての高温環境での実験はとてもいい勉強になりました。高温では銅線の被膜が溶けるから全て剥く、冷却水が必要など、考えたら当たり前のように感じますが、実際に試料をセットして使ってみることで初めて本当の知識になった気がします。普段過ごしている神戸の研究室でも、漠然と使ってしまう先人の知恵があるのではないかと考える良い機会となりました。また、アメリカの研究所で印象的だったのは、研究をサポートする技術スタッフが充実していることです。高温実験用の試料ケースにガラスを使う必要があったのですが、信号強度をロスしないよう可能な限りコンパクトなガラス管封入が求められました。このような難度の高い作業をグラスショップの技術スタッフがしてくれたのはとても助かりました。英語でこちらの意図を正確に伝えるいい練習にもなります。圧力セルが意図せず破

[1] D. Hirai *et al.*, PRB **85**, 140509(R) (2012).
[2] H. Goto *et al.*, Phys. Proc. **75**, 91 (2015).
[3] H. Kotegawa *et al.*, PRM **2**, 05501(2018).

損した際もマシンショップの技術者が相談に乗ってくれました。

神戸から持って行ったもう一つの試料はRuAsと類似の結晶構造を持つNbCrPです。神戸で単結晶作製に成功し、125 K付近で何らかの一次相転移を示すことを発見しましたが、未だにその機構は解明されていません。³¹P-NMRの結果から相転移により結晶構造に何らかの変化が起きていることが示唆されていますが、Nbサイトを見ることで、より相転移に伴う電子状態の変化が明瞭になると考えAmesでNb-NMRを行いました。この結果については現在論文を準備中です。

生活面は楽しいことしかありませんでした。アイオワ州はとても平和で治安もよく、田舎ならではの静かさがとても心地良かったです。現地の学生が貸してくれた自転車のおかげで車がなくても自由に動き回ることができましたし、Amesはアメリカの田舎都市には珍しくバスが便利です。本当に住みやすいところで、住みやすい街ランキングの順位が上がっていることも納得しました。古川ラボのメンバーに加え、理論系や異なる実験手法で物性研究を行っている学生・ポスドクと交流できたことも刺激になりました。いろいろな研究室のメンバーが入り乱れた自主ゼミや、BBQを通して次々に新しい人に出会う文化に触れたことで、自分も少し社会的になりました。最後になりましたが、ご自宅での食事会やBBQに何度も招いて下さり、サポートして下さった古川先生ご夫妻にこの場を借りて改めてお礼申し上げます。ありがとうございました。宿舎のオープンでステーキと野菜をシンプルに焼いて食べる毎日だったので、たまにごちそうになる日本食のやさしさを実感しました。お二人のおかげでもつ

と長い期間Amesで生活してみたいと思うことができました。また、今回の海外派遣の機会をいただいた新学術領域J-Physicsの播磨尚朝代表をはじめ、快く送り出してくださった指導教員の小手川先生、藤先生、事務手続きを担当して下さった岩藤様、尾崎様、私のAmes滞在を支援して下さったすべての方々に、この場を借りて厚く感謝申し上げます。



日本食レストランにて。



左から古川先生、稲垣先生、Khusboo Ranaさん、桑田、Qing-Ping Dingさん



PSI滞在記

比嘉 野乃花

広島大学 先端物質科学研究科 助教

徳永 陽

日本原子力研究開発機構

神戸 振作

日本原子力研究開発機構

伊藤 孝

日本原子力研究開発機構

髭本 亘

日本原子力研究開発機構

J-Physicsの国際活動支援を受け、2019年10月9日から15日の日程で、スイスにあるポールシェラー研究所 (PSI) へ行き、EuPtSiに対するミュオンを用いた実験を行いました。これまでのEuPtSiの研究内容については前号(NL Vol.8)を確認していただければと思いますが、EuPtSiについてJ-PARCのD1ポートを用いて μ SRによる研究を行いました。しかし、EuPtSiの転移温度 $T_N = 4$ K近傍では、緩和が速くJ-PARCでは時間分解能が足りず測定が困難な状況にありました。そのため、J-PARCよりも時間分解能の高いPSIへ行き、実験を行いました。

ゼロ磁場から磁場中、極低温から常磁性温度までを効率よく測るためにHAL-9500とGPSと呼ばれる装置について申請を行いました。HAL-9500は磁場を9.5 Tまで、希釈冷凍機を使うことで約10m Kまで冷やすことができます。また、GPSは磁場は7500Gまでしかかけられませんが、ゼロ磁場で転移温度以下の1.5 Kから常磁性温度までを測るために申請しました。HAL-9500が4日、GPSが1日のビームタイムをもらい、並行して測定を行うことができました。その結果、転移温度近傍で揺らぎが発散的になるが磁気秩序により抑制され、それが1次転移的な振る舞いであること観測しました。この結果に関してはこれまでのJ-PARCでの結果と、NMRによる実験結果と併せて論文として執筆中です。

PSIはスイス・チューリッヒ空港から電車とバスを乗り継ぎ、長閑な雰囲気のある場所にあります。ゲストハ

ウスの前では写真で示すように羊が放牧され、施設の目の前には小高い丘が広がっていました。PSI敷地内にはレストランやカフェテリアもあり平日はそこで食事ができます。休日も、日替わりのフードトラックで食事が提供されますし、徒歩で行ける範囲内にスーパーもあり、買い物をすることができました。私の滞在中は、偶然にも日本人が作っている唐揚げのフードトラックが来ていました。1500円の唐揚げ弁当と日本では高価に感じる値段でしたが美味しくいただきました。

今回、2回目にもかかわらず支援していただいた播磨先生をはじめとするJ-Physicsの関係者の皆様、測定用の試料提供していただいた琉球大の辺土先生、仲間先生、大貫先生には、この場を借りてお礼申し上げます。ありがとうございました。



ゲストハウスから見た風景



イギリス・ISIS滞在記 山本編

山本 理香子

広島大学大学院 先端物質科学研究科 博士課程前期2年

鬼丸 孝博

広島大学大学院
先端物質科学研究科 教授

志村 恭通

広島大学大学院
先端物質科学研究科 助教

Duc Le

ISIS, Rutherford
Appleton Laboratory, UK

Devashibhai Adroja

ISIS, Rutherford
Appleton Laboratory, UK

「J-Physics:多極子伝導系の物理の国際展開」若手研究者の相互派遣からのご支援を頂き、2019年11月10日から10日間、イギリス・ISISにて非弾性中性子散乱実験を行いました。実験は、 $NdTr_2Zn_{20}$ ($Tr = Co, Rh, Ir$)の結晶場励起スペクトルの観測を目的として、チョッパ型分光器MARIを使用しました。MARIという名称は、日本の中性子散乱研究の黎明期を支えた故石川義和先生のご息女、真理さんのお名前に由来するそうです。今回の実験に漕ぎ着けるまでには困難もありましたが、それを乗り越えて「真理」からデータを得られたときはとても嬉しかったです。

一番の問題は、粉末試料を機内に持ち込めなかったことでした。保安検査所の検査員にどんなに説明しても、笑顔で断られました。結局、試料は大学に郵送して、そこからイギリスへ送ってもらうことにしました。私のマシンタイムまでに試料が届くか微妙だったので、「私は何のためにイギリスに行くのでしょうか…」と引率して下さった志村先生に10回は聞いた気がします。志村先生は困っていましたね。

私自身は、無事イギリスに到着しました。ロンドンからISISへは、電車で1時間と二階建てバスで40分かかりました。ISISはRutherford Appleton研究所の一部で、広大な施設には加速器放射光施設などの研究施設もあります。驚いたのは、食堂が一つしかなかったことです。その食堂も夜8時には閉まるので、それを逃すと自販機でスナックを買うしかありません。

空港で大学に送った試料は、マシンタイムから半日

遅れで無事イギリスに到着しました。到着後すぐにLocal contactのD. Le博士とD. Adroja博士に協力いただき、実験を開始しました。装置はほぼ自動化されており、幸いなことにビームも安定していました。試料が4種類あったため、優先順位と測定条件を慎重に考える必要がありましたが、結果的には全ての試料を測定できました。今回の目的であったNdの結晶場準位間の磁気励起も観測できました。

今回の実験では中性子実験ならではの困難もあり、限られた時間の中でデータをきちんと揃えることの大切さを痛感しました。今までに測定したことのない手法で新たな情報が得られたことや、海外の研究者と議論できたことを、今後の研究活動に役立てていきたいと思えます。最後になりますが、急な申請にも関わらずご支援くださった播磨先生、関係者の皆様に感謝いたします。





海外派遣制度によるラザフォード・アップルトン研究所滞在の報告

草ノ瀬 優香

広島大学 大学院 先端物質科学研究科 博士課程前期2年

鬼丸 孝博 広島大学 大学院 先端物質科学研究科 教授	志村 恭通 広島大学 大学院 先端物質科学研究科 助教	Tatiana Guidi ISIS Rutherford Appleton Laboratory	D. T. Adroja ISIS Rutherford Appleton Laboratory	Duc Le ISIS Rutherford Appleton Laboratory
--	--	--	---	---

国際活動支援班「J-Physics：多極子伝導系の物理の国際展開」からのご支援を頂き、2019年11月11日から11月20日までの10日間、イギリス・ラザフォードアップルトン研究所(RAL)の中性子およびミュオン源施設ISISに滞在しました。滞在の目的は、時間飛行中性子分光器MARIを用いて非弾性中性子散乱実験を行い、電気四極子の自由度をもつ立方晶PrMgNi₄の結晶場準位を決定することでした。ここでは、ISISでの生活や実験の様子について報告します。

滞在先のRALは、ロンドン郊外のDidcotから車で20～30分のHarwellキャンパスにあります。広大な敷地には、ISISだけでなく、シンクロトロン放射光施設ダイヤモンドや、医療・セキュリティなどへの応用研究をしているレーザー施設、宇宙関連の施設もあります。

ISISのエントランスにはシンクロトロン加速器のミニチュア模型があり、高エネルギー陽子ビームを模したLEDの光がくるくると回っていました。その光は、沢山の分光器で囲まれているTarget1とTarget2に4:1の比率で入るのですが、通りがけにTarget2が光るところはめったに見ることが出来ませんでした。たまたまTarget2が光るのを見ることが出来た日は、1日上手くいくと験を担ぐ始末でした。MARI分光器はTarget1の方に設置されており、ビームガイドの上に組んである鉄骨の通路を使ってキャビンへ通いました。MARIの名称は、故石川義和先生のお嬢様の真理さんのお名前から付けられたそうです。試料をセットするたびに、日本語で「真理」と書かれたプレートが目に入り、不

思議と研究を続けていく勇気をもたらった気がします。

Local ContactのTatianaさんは、テキパキとした素敵な女性でした。今回は、測定用の試料を準備するためにビームタイム前日に着いたのですが、Tatianaさんのサポートもあり、その日のうちに測定を始めることができました。そのおかげで、非磁性La化合物を測定し、フォノンの寄与を調べることができました。Ducさんには、解析をサポートしてもらいました。解析したい内容を伝えると、プログラムの修正方法や参考になる本を教えてくださいました。また、以前広島大学で研究されていたAdrojaさんには、磁気励起スペクトルの解釈の仕方について議論していただきました。磁化から求めた結晶場準位だけでは説明できない励起も観測されており、不純物や格子歪み、超格子などの影響を考慮する必要がありそうです。今回の議論を活かして課題を解決し、論文にまとめたいと思います。

最後となりますが、播磨先生をはじめとする国際活動支援班の皆様に、お礼を申し上げます。





グルノーブル滞在の抱負

佐藤 芳樹

東北大学工学研究科 博士課程後期1年

青木 大

金属材料研究所

本多 史憲

金属材料研究所

Ilya Sheikin

LNCMI Grenoble

Jean-Pascal Brison

CEA Grenoble

この度、J-Physicsの国際活動支援班のご支援を頂き、2020年2~3月にフランス・グルノーブルの強磁場施設であるLNCMI Grenobleおよびフランス原子力庁（CEA Grenoble）に滞在させていただけることになりました（55日間）。本ニュースレターでは、グルノーブル滞在向けた抱負と、金属材料研究所の国際共同研究センター（ICC-IMR）の援助で11~12月にフランスに出張した際の感想などを報告したいと思います。

今回の海外派遣の研究テーマは、超伝導を示すことが近年報告されたウラン系超伝導体 UTe_2 [1,2]の純良単結晶育成および、極低温・強磁場・高圧下など極限環境下での物性測定です。 UTe_2 の研究は日本とフランスの研究グループで協力して遂行されており、今回の海外派遣では、その国際共同研究を推し進めたいと思います。実は、 UTe_2 というウラン化合物は、私が所属する東北大学金属材料研究所大洗センターで10年以上前に単結晶育成に成功するとともに、希釈冷凍機での物性測定が行われていました。私は普段は希土類・アクチノイド化合物の単結晶育成や物性測定を行っています。今回の UTe_2 の超伝導の報告を受けて、純良単結晶の育成技術と精密な物性測定技術の重要性を痛感しました。今回の滞在先であるCEA Grenobleの研究グループは、極低温実験の長い歴史を持っており、共同研究の推進とともに実験技術やアイデアについても学んできたいと思っています。

海外派遣の滞在先のひとつであるLNCMI Grenobleでの強磁場下での量子振動実験が11月末から12月にかけて行われており、海外派遣の打ち合わせも兼ねて実験に参加してきましたので、そちらに関する報告もいたします。滞在先はIlya Sheikin氏の研究室です。Sheikin氏と彼の博士課程の学生であるSanu Mishra氏は2019年の夏ごろに大洗センターに長期滞在していたということもあり、スムーズに実験や議論を進めることができました。LNCMI Grenobleは、水冷の常伝導マグネットを用いて30 Tを超える磁場で実験ができる施設です。Sheikin氏の研究室では、希釈冷凍機を組み合わせて~50 mK・~36 Tという条件での実験が行われましたが、極限環境下にも関わらず美しい量子振動を観測することができ、その実験技術に非常に感銘を受けました。このような実験環境下で精密な物性研究ができる施設は、日本はもちろん世界的にも希少な施設です。今回の海外派遣では、彼らが2019年夏ごろから大洗センターで進めてきた共同研究をさらに発展させることも目的の一つです。

取り留めのない文章になりましたが、今回の海外派遣を通して多くのことを学び、また、それを日本の研究コミュニティに還元できるよう尽力したいと思います。海外派遣に関しまして、様々な方のご支援を頂きました。播磨先生をはじめJ-Physicsの関係者の皆様、青木先生をはじめ東北大学の皆様、Sheikin氏、Jean-Pascal Brison氏をはじめとするLNCMI、CEAの皆様に、この場を借りてお礼を申し上げます。

[1] S. Ran *et al.*, Science 365, 684 (2019).

[2] D. Aoki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 88, 043702 (2019).



チェコ・プラハにおける滞在記

高力 暁成

北海道大学大学院理学院 博士後期課程1年

Jiří Pospíšil

Department of Condensed Matter
Physics, Charles University

Vladimír Sechovský

Department of Condensed Matter
Physics, Charles University

網塚 浩

北海道大学大学院
理学研究院 教授

1月から3月までの期間、プラハ・カレル大学への滞りで国際派遣支援に採用していただきました。ありがとうございます。Vladimír先生率いるこの磁性グループの研究室に訪れたのは今回が初めてではなく、2年ほど前にも試料育成を目的として滞在しています。ほとんどのメンバーと顔見知りでしたのでスムーズに研究室に受け入れてもらった印象です。実は2019年の10月から正式にカレル大学の学生にもなり、研究生活&学生生活を同時に送っています。博士後期課程で毎週の講義をとるとするのは少し不思議な感じもしましたが、新しいクラスメイトもできましたし講義もAdvancedな内容になっており楽しいです。面白かった(かつ最も骨が折れた)講義はこちらで指導していただいているJiří先生が担当する「物性物理における実験手法」でした。まず各学生に対してその学生が専門とする分野の実験手段、専門外の実験手段の2つのテーマが割り振られます。それぞれのテーマに関して各自講義スライドを作成し、30分程度で他の学生に説明、そののち質疑に対応するというものです。私の場合は前者が「Single crystal growth」、後者が「Spectroscopy of low-frequency excitations」だったのですが単結晶育成も少しかじった程度の経験しかなかったので結局両テーマとも山ほど知識を収集することになりました。教員の方々の苦勞、そしてせっかく作った講義にあまり興味を持ってもらえなかった時の悲しさも実感することができました…。普段の寝泊りは実験施設から徒歩数分の場所にある寮でしています。

始めどのような寮なのかを全く下調べせずに行ったので、なぜかベッドが2つ用意されていることに違和感を覚えつつ生活をはじめた数日後、突然部屋に知らない男がいたときには驚きました。その方はアゼルバイジャンからきた学生の方で、今では楽しく同居しています。研究をしていてふさぎ込まないでいられるのはトーク好きの彼のおかげかもしれません。

私は今おもに2つの研究テーマに取り組んでいます。当初から取り組んでいた「磁気秩序が空間反転を破る金属化合物における新しい交差相関」ですが、 $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ の電流誘起磁化に引き続いて RMn_2X_2 (R: rare earth, X: Si and Ge)における電流誘起歪みの検証をもくろんでいます。実現可能性未知数のチャレンジングな課題です。うまくいかないことも色々ありますが、面白い結果が残ればなと思っています。当初見つかっていなかった新しい相転移を示唆する結果も得られており、この系そのものへの興味も増すところです。2つ目のテーマとして、最近2次元系Van der Waals結晶の結晶構造解析や特異な磁気特性の解明に取り組みははじめました。Vapor Transportで完成する試料はとても小さくて薄く、さらに空気中ですぐに水和が進行してしまうために取り扱いが難しい結晶ですが、実験の結果に対して群論を活かして可能な磁気構造を提案したりしながら、理論家とも活発に議論を行っています。今後も頑張っで取り組んでいきたいと思っております。改めまして、このような貴重な機会をいただけたことに深く感謝いたします。

国際周期表年2019

播磨 尚朝

神戸大学大学院理学研究科 教授

2019年は国際周期表年でした。これは、国連総会とUNESCOが2019年を「元素の周期表 (Periodic Table of Chemical Elements) の150周年」と位置づけ、国際周期表年 (International Year of the Periodic Table of Chemical Elements: IYPT) と宣言したことによります。[1, 2]日本においても、日本化学会をはじめ、日本物理学会、応用物理学会などがIYPT2019を記念し、様々な事業が行われました。[3]なぜ2019年かと言うと、2016年にニホニウムを含む118番目までの4元素が確定されて周期表の第7周期までが完成したことと、メンデレーエフが周期律を1869年に発見してから150年に当たる年だからです。

国内のイベントは2月23日の記念シンポジウム (日本学術会議講堂) から始まりました。講演者は、玉尾皓平先生、細野秀雄先生、前野悦輝先生、さらには、ニホニウムを発見した森田浩介先生と豪華な顔ぶれで、一人30分の講演時間ではとてももったいないと感じました。討論時間では、高校の先生からの「原子と元素の違いはなんですか?」という質問などで盛り上がりました。さらに、実行委員会から「私たちの元素-エッセイコンテスト」と「私たちの元素-産学からのメッセージ」についても紹介がありました。「産学からのメッセージ」は、元素を一つ選んでメッセージを送る (掲載する) ことで、国内の産学界と元素とのつながりを俯瞰する目的もあったと聞いています。

私たちのJ-Physicsでは「ものづくり」を大事にしています。「ものづくり」において、元素の基本的な性質と周期律を知ることは大変重要なことです。J-Physicsではメンデレーエフの功績に感謝し、101番のMd (メンデレビウム) に対してメッセージを送りました。[4]さらに、神戸大学大学院理学研究科と元素周期表同好会との共催で、「国際周期表年2019をお祝いする元素と周期表を学ぶ会 (元素検定スペシャル@神戸と講演会)」を7月20日に神戸大学で開催しました。内容は、「元素検定」と元素スペシャリストのお二人の先生の講演です。講演は、桜井弘先生による「世界を変えた周期表」と玉尾皓平先生による『「一家に1枚周期表」に込めた思い』です。「元素検定」には近隣の高校生を中心に80名ほどが参加して、2級と3級に挑戦しました。当日になって飛び入り参加した神戸大学研究担当理事も3級に挑戦されました。講演会は120名ほどが集まり、お二人の先生の講演に耳を傾けました。玉尾先生には講演の中で、J-PhysicsからMdに寄せたメッセージと共にJ-Physicsの活動についても紹介をしていただきました。



「元素検定」に取り組む参加者。



玉尾先生の話に耳を傾ける参加者。



Санктペテルブルグ工科大学の「周期表の壁」。左下にメンデレーエフの像が見える。この周期表はメンデレーエフが提案した最後のものである。



メンデレーエフ通り。

国際周期表年のイベントの一つに「巡回展：国際周期表年2019特別展」がありました。[5]特別展の巡回ルートはあらかじめ決まっていたのですが、実行委員会にお願いして、特別展とは別に「パネル展」を9月に開催された「J-Physics国際会議」の会場で行うことが出来ました。国際会議に参加された方はパネル展をご覧になったかと思います。「パネル展」は、神戸大学の教職員をはじめ、一般の方にも楽しんでいただきました。さらに、この会議での最優秀ポスター賞の副賞として、玉尾先生考案の「国際周期表年ネクタイ」が贈られました。この時に神戸大学での展示用に作っていただいたパネルは、その後で、岡山（SCESと岡山大学）を経て東邦大学などにも巡回されました。

国際周期表年の国際イベントとしての開会式は1月19日にパリのUNESCO本拠地とメンデレーエフの誕生日の2月8日にロシアで行われましたが、閉会式は12月5日に東京プリンスホテルで開催されました。[6]会場には、日本だけでなく、ロシアや台湾でイベントに使われた展示が出展されました。式典では、幾つかの元素に関わる講演に加えて、エッセイコンテストの表彰や都内の女子高生が作曲したピアノ幻想曲「ニホニウム」の演奏などがありました。閉会式の模様はホームページからたどればYouTubeで視聴することができます。

国際周期表年と直接は関係がないのですが、今年は Санктペテルブルグでメンデレーエフの足跡を尋ねる機会に恵まれました。ロシアのペトロザボーツク (Petrozavodsk) で開催された国際会議 [7] に参加するために、会議の前後に Санктペテルブルグに滞在しました。 Санктペテルブルグには大昔の新聞記事「水兵リーベ僕の船 ロシア・ Санктペテルブルグ (ことばの旅人)」 [8] で知った、いつか訪れてみたいと思っていた「周期表の壁」があります。調べてみると、メンデレーエフが勤めていたこともある Санктペテルブルグ工科大学に、その壁がありました。後で聞くところによると、メンデレーエフは生涯で9種類の周期表を発表したそうですが、この壁に書かれている周期表は最後の9番目のものだそうです。メンデレーエフは工科大学のあとで、ネヴァ川河口近くの Санктペテルブルグ大学に移ります。 Санктペテルブルグ大学の中には「メンデレーエフ博物館」があり、彼の書斎や手書きの周期表が展示されているらしいのですが、週末は大学の中には入れてもらえません。人伝てに聞くと、平日でも予約しないと博物館には入れてもらえないようです。残念でしたが、 Санктペテルブルグ大学前の「メンデレーエフスカヤ・リニヤ」 (メンデレーエフ通り) 沿いのパブで、メンデレーエフがここで過ごした日々を思いつつビールを楽しみ帰ってきました。



Санктペテルブルグ大学の玄関左に掲げられたメンデレーエフの銘。「ここで学び、働き、生活した。偉大なロシアの科学者ドミトリー・イヴァノヴィッチ・メンデレーエフ」とある。

[1] <https://iypt2019.org>

[2] <https://iypt.jp/jp.html>

[3] <https://iypt.jp/events/top.html>

[4] <https://iypt.jp/industry/Md.html>

[5] <https://iypt.jp/j-exhibition/top.html>

[6] <https://iypt.jp/events/closing.html>

[7] <https://oiks.pnpi.spb.ru/events/DMI-2019>

[8] 朝日新聞、2003年10月25日朝刊be

アウトリーチ活動「日本語からはじめよう」

大原 繁男

名古屋工業大学 物理工学科

アウトリーチ活動として「日本語からはじめよう」と題した授業を高校生に行なった。この活動は播磨代表によるニュースレター第5号の巻頭言「日本語からはじめる」に端を発する。巻頭言では石黒鎮雄著「日本語からはじめる科学・技術英文の書き方」(丸善株式会社, 1994)が紹介され、英訳する上で最も重要なのは科学・技術文の日本語が明瞭であるべきこと、また、明瞭な日本語を書くことが思考力の向上につながることを指摘されている。

私はスーパーサイエンスハイスクール (SSH) の愛知県立一宮高等学校において15年以上高温超伝導体の実験と講義を担当してきた。そのなかで、高校生は感想は書けるが考察は書けないことに気づき、高校教育に論理的な文章を書く学習を取り入れたいと考えていた。国語でパラグラフ・ライティングを教えていただくなどの取り組みをはじめていたが、よい文献を知ったことで自分で授業をやってみる勇気が出た。2019年2月に特別講義「日本語からはじめよう」を提案したところ、一宮高校に、ぜひやりましょう、と快諾していただいた。大学入学共通テストに記述式問題の導入が予定されていたことも、この授業の実現を後押しした。

授業は播磨先生と私で協同して2020年1月15日に一宮高校の理系選択の2年生を対象に行なった。途中10分の休憩を挟みながら、全体で2時間10分の授業を午前に約80名、午後に約120名、それぞれ2クラスと3クラス合同での実施となった。目的は、日本語の特徴を学んで文章を書く上での注意点を整理する、文章を修正する訓練をする、日本語で論理的でわかりやすい文章を書くことが英作文を容易にすることを学ぶ、の3つにした。授業はスライド64枚による解説とワークシートによる演習で構成されている。

ワークシートのひとつは、解説を聞きながら科学・技術文を書く上での7つの点検項目を記入してもらうもので、完成すると自分で書いた文章の点検ができるようになっている。また、英作文につなげるための注意点も1項目記入してもらった。文章修正の訓練は、高校3年生が書いた文章を例題に、4名の班で話し合いながら進めさせた。先輩の書いた文章を直す体験は印象に残ったようである。修正後と当初の文章を比較して変化を感じてもらい、さらに英訳してみせることで明瞭な日本語は英作文も容易になる例としてみせた。

授業では、動機付けに15分、日本語の特徴解説に50分、休憩をはさんで、文章修正演習に50分使った。また、最後の15分にまとめも兼ねて、J-Physicsの紹介、石黒鎮雄と著書の紹介などを行なった。ノーベル文学賞受賞者の父

親ですと紹介すると、すぐにカズオ・イシグロ!と生徒から声がかけていた。写真は休憩時間にニュースレターを読む生徒たちと見守る播磨先生である。

今後、生徒はSSH課題研究に取り組み、授業で作成した点検項目を利用しながら報告書を作成する計画になっている。このアウトリーチ活動が高校生の文章作成と論理的思考の能力育成に役立つかどうか、どきどきしながら経過を見たい。





J-Physicsを振り返って

鹿野田 一司

東京大学 大学院工学系研究科 教授

J-Physicsの皆様、5年間はあっという間でしたね。新しい学術の発展には、それが基礎的であればある程時を要するもので、5年限定の新学術領域研究は学術発展の基盤づくりと私は捉えています。私は、皆様と違う立場でJ-Physicsに関わらせていただき個人的に大変多くの学びがありましたが、それはさておき、この領域は発足時に掲げた目標、— i) 多極子概念の一般化 (局在多極子、遍歴多極子、拡張多極子)、ii) d電子系とf電子系を俯瞰する学融合— に向かって着実な成果を上げてきたと思います。局在多極子と遍歴電子の相互作用系について、近藤系の物理学を益々豊かにする秩序相や量子臨界状態が見出され、また、これまでd電子系が舞台となっていたskyrmionがf電子系においてd電子系とは異なる長さスケールで発現することが発見されました。物質科学の発展を牽引する両輪“普遍性と多様性”がうまく回っています。遍歴電子系では、何と言っても、新奇で多様な超伝導状態が次々に披露されているのは圧巻で、超伝導の常識がどんどん刷新されています。拡張多極子関連では、新しい交差相関物性の理論的な予言や実験的な検証が注意深くなされています。私の研究対象はスピン-軌道相互作用が極めて小さい分子性物質 (p電子系) ですが、ある種の強相関係では電場の印加によりスピン流が生まれることが拡張多極子の概念により見事な形で予言されています。J-Physicistsの成果がd, fの枠を越えて波及していることを示しています。

J-Physicsの成果は、もちろん参画者の奮闘から来るものですが、領域の運営がそれを強く後押ししたと思います。新学術領域研究には、単なる個々の研究の集合体ではない研究者間の連携が強く求められています。この5年間で30回を超える国内外のイベントが企画され、私も何回か参加しましたが、若手からシニアの幅広い世代のベストミックスの研究者集団が熱くフランクに語り合える連携促進の場がうまく作られ、研究活動に限らず若手の教育まで細かく目配せする領域代表の姿勢が領域全体に浸透している姿をみました。

正直なところ、もう数年続けられたら…と思うところではありますが、世の中すべてが始まりと終わりの連続で回っていることを思えば、この終わりは、次の始まりのためと思ひましょう。その意味でも、J-Physicsの成果をこの分野の枠を越えて“科学の成果”として伝える大きな仕事が残っています。総括班が全責任を負うのではなく、参画者の一人一人がこのことを本気で考える時、この研究領域が広い学問分野の中で継続的な市民権を得る力が生まれると思います。d電子って何？ f電子って何？ ---こういう人達にJ-Physicsとは何ぞやをどう伝えるか！（かく言う私もできておりませんが…。）

昨今、Society 5.0や科学技術イノベーションなど、刻々と変わる社会を反映した言葉が躍っていますが、それらを根幹から支える“物質”の中身を虚心坦懐に問う学問には普遍的な意義があると私は信じています。5年間のJ-Physicsを糧に、また新しい始まりが起こることを切に願っています。



J-Physics、そのなんと深い物理の世界

上田 寛

北岡氏に代わっての評価者への依頼があったとき、これまで3d遷移金属化合物を中心に物質開発をしてきてf電子系になじみがなかった私としましてはためらいましたが、物質開発を中心にということであり、また、本領域研究がd-f融合をうたっていて、当時勤めていた豊田理研で5dのReの酸化物に取り組んでいたこともあり、これは勉強させていただく良い機会と思いお引き受けした次第である。途中体調を崩し、これまでに全体会議を含めて3回ほどしか報告会に出席できませんでしたが、それでも、d電子系研究者のご他間に漏れず“細かい”、“マニアック”といったそれまで持っていた先入観が一掃され、これは誠に物性物理の王道を行く奥深い世界であると感銘を受けています。J-Physics N L 最終号への研究成果や活動への意見執筆依頼を受けるにあたり、最終年度の全体会議に出席して印象を受けたトピックスをいくつか取り上げ、評価の一端とさせていただく。

一つはEuPtSiで、良質の単結晶育成により研究がさらに進展し、d電子系のMnSiと似たf電子系のスキルミオン秩序が明らかになった。d電子が伝導性と磁性の両方を担うMnSiに対し、EuPtSiではPtのd電子が伝導性を、Euのf電子が磁性を担っていて、同様のスキルミオン磁気相図を示すことは、d電子系とf電子系を俯瞰して把握するという本領域研究の目的にかなった成果であろう。d電子系の多極子系として注目されるMn₃Sbでは、今回さらに外場応答の成果報告があり、有望な材料としてのポテンシャルを感じさせた。他にMnのニクタイトなどd電子系の拡張多極子の話題もあり、本領域研究の目的の一端が達成されつつあることを実感した。

超伝導では何といてもトリプレット超伝導のUTe₂であろう。U系超伝導体は本領域研究の目玉的な物質系であるが、強磁性相と超伝導相が近接していてリエントラント超伝導を示すUCoGeやURhGeと違って2成分系のUTe₂でトリプレット超伝導が出現することは同じく2成分系の強磁性UGe₂において加圧により超伝導相が出現することと合わせて、U自身の強磁性と超伝導へのかかわりを示していて興味深い。Uの特徴は5f電子と6d電子が接近していることで、そこに新たな超伝導の物理を感じさせる成果である。物質開発については、純良な単結晶育成をはじめ、私のような固体化学者が思いもつかないような層状物質の合成や対称性を考慮した物質の開発、キラル物質の右手系・左手系の作り分けなど、非常に印象に残っている。他にも印象に残った成果が色々ありますが紙面の関係から割愛させていただく。

本領域研究ではこれまで数多くの研究成果を出していて、スピン軌道相互作用の強いf電子系と弱いd電子系をつなぐ領域における伝導性と磁性を「多極子」の概念に基づいて俯瞰的に把握し、多極子伝導系の学理を確立するという本領域研究の目的はほぼ達成されつつあると感じました。特筆すべきは研究活動における理論と実験の連携で、特に若い理論家が多く、実験結果を解析するというのみならず理論に触発された実験も数多く見られ、素晴らしい連携がなされていると感じました。また、サッカーボールなどを例にとり対称性をもった物質を理解させるといった子供たち向けアウトリーチ活動にも感銘を受けました。高効率デバイスや室温超伝導などの戦略的物質開発によるエネルギー問題、環境問題解決への貢献という点については、これらの成果を基に今後の発展に期待したい。

今後の領域活動の予定

2020年 3月31日…………… JPhysics 領域設定期間終了

2020年 6月…………… 事後報告書提出

2020年 10月…………… 事業評価ヒアリング

2020年4月以降の関連行事

LT29 29th International Conference on Low Temperature Physics

日 時：2020年8月15日(土)～20日(木)
場 所：札幌コンベンションセンター(札幌市)
U R L：<http://www.lt29.jp/>

SCES2020 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems

日 時：2020年9月20日(日)～25日(金)
場 所：Casa Grande Hotel (Guarujá, São Paulo, Brazil)
U R L：<https://sces2020.org/>

日本物理学会 (2020年秋期大会)

日 時：2020年9月1日(火)～4日(金)
場 所：熊本大学(熊本市)



謝辞記載のお願い

本領域の支援を受けて進められた研究の成果発表に際しては、以下の要領で謝辞 (Acknowledgement) 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 JP15H05882 (J-Physics).

【和文】：本研究はJSPS科研費JP15H05882(J-Physics)の助成を受けたものです。

計画研究の課題番号と課題名の対応は以下の通りです：

- 15H05882 J-Physics:多極子伝導系の物理の研究総括
- 15H05883 局在多極子と伝導電子の相関効果
- 15H05884 遍歴多極子による新奇量子伝導相
- 15H05885 拡張多極子による動的応答
- 15H05886 強相関多極子物質の開発
- 15K21732 J-Physics:多極子伝導系の物理の国際展開

活動成果報告のお願い

以下の情報を随時メールで事務局までお知らせください。

論文 (著者名、タイトル、雑誌名、巻号、ページ、発行年、査読の有無)

著書 (著者名、タイトル、出版社、発行年)

国内・国際学会等発表 (発表者、タイトル、発表学会等名、場所、発表年月日、招待の有無)

アウトリーチ活動 (実施者、活動内容、場所、実施年月日)

連絡先 J-Physics事務局：steering@jphysics.jp

前号の岸根氏の解説記事において著者の所属が誤っておりました。
正しくは 放送大学・教授 (分子科学研究所・客員教授) です。
岸根氏及び関係各位にお詫び申し上げます。

NEWS LETTER

J-Physics #09

Physics of Conductive Multipole Systems

March

編集後記

時が経つのは早いもので、今号が新学術「J-Physics」の活動をお伝えする最後のNewsletterとなる。まずは、執筆頂いた多くの方に感謝いたします。また本Newsletterの読者の方から、デザインに対してお褒めの言葉を頂くことがしばしばあった。記事の背景、段組み一切は北海道大学網塚研究室の渡辺陽子さんによるものである。実は渡辺さんには「J-Physics」が主催したworkshopのポスターのデザインも手掛けて頂いており、ポスターの出来栄に驚かされた方も多いのではないのでしょうか。この場を借りて渡辺「画伯」に感謝いたします。

これらのポスターを見ていると、5年間の活動もあつという間のような感じを受ける。ただ、本新学術で取り扱った「J」の物理の重要性はこの5年間で多くの方に受け入れられ、認識されるようになったのも事実である。今後どのような方向に進んでいくのか大変楽しみである。

最後に、自身の興味でそれぞれの方向に向いている研究者のベクトルを「J」の物理の発展の方向に向かわせた、領域代表の播磨先生・事務担当の網塚先生に感謝致します。5年間お疲れさまでした。

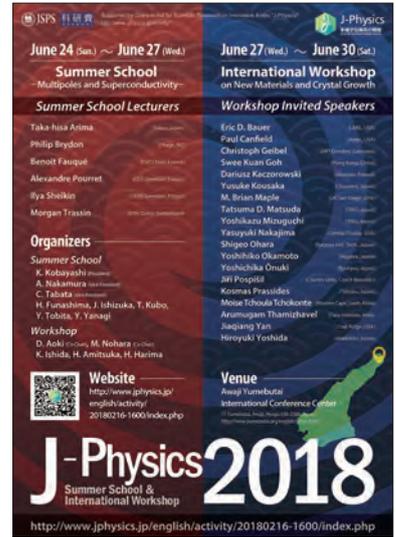
渡辺「画伯」のポスター集



2016 : 若手夏の学校



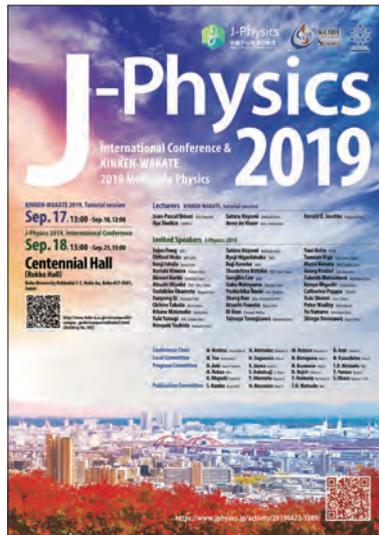
2017 : 国際 workshop



2018 : Summer School



2018 : j-ferrion workshop



2019 : J-Physics 2019



J-Physics

多極子伝導系の物理
Physics of Conductive Multipole Systems

J-Physics : 多極子伝導系の物理

文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究」(平成27~31年度) 領域番号: 2704

新学術領域研究

「J-Physics : 多極子伝導系の物理」ニュースレター 第9号
2020年3月 発行

領域ホームページ

<https://www.jphysics.jp/>

編集人 石田 憲二

発行人 播磨 尚朝

発行所

神戸大学大学院理学研究科 物理学専攻

TEL : 078-803-5628 / FAX : 078-803-5628/5770

事務局

北海道大学大学院 理学研究院 物理学部門

網塚 浩

TEL/FAX : 011-706-3484

