

Physics of Conductive Multipole Systems

March



巻頭言

神は細部に宿る 播磨 尚朝 002

研究解説

スピン変換研究から見た多極子伝導 大谷 義近 004

Eu化合物の特異な電子状態 大貫 惇睦 007

立方晶Sm化合物における特異な強相関電子状態 東中 隆二 013

サマリウム化合物における特異な重い電子状態 椎名 亮輔 018

公募班紹介

内殻光電子線二色性＝内殻ホール
ーf電子間相互作用の異方性から
軌道対称性とその温度変化を見る 関山 明 022

価数転移由来の新規量子現象の理論研究 渡辺 真仁 024

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 026

構造不安定性の制御による非クラマース系
多極子物質の開発とその圧力効果の研究 脇倉 和平 028

強磁場中性子回折とX線回折の進展と
URu₂Si₂の強磁場相における整合—非整合転移 野尻 浩之 030

遍歴多極子と多極子超伝導体の発展 池田 浩章 032

動的平均場法に基づく
多極子秩序の微視的理論 大槻 純也 034

梯子型鉄系化合物BaFe₂Se₃における
奇パリティ多極子秩序 大串 研也 035

3d電子系における奇パリティ磁気多極子秩序
に由来する電気磁気応答と量子伝導現象 阿部 伸行 037

What Alice Found There 大原 繁男 039

Emergent electronic phenomena in
hybrid f-/p-electron molecular materials Kosmas Prassides 041

空間反転対称性を「破る」
5d電子系の新物質開拓 岡本 佳比古 043

層状・3次元遷移金属化合物のスピンの軌道
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 045

今号の研究成果

ワイル磁性体Co₂MnGaにおける
室温巨大異常ネルンスト効果 酒井 明人 047

軌道磁気四極子と電気磁気効果 下出 敦夫 050

重い電子系超伝導体URu₂Si₂の
隠れた秩序状態の空間群 神戸 振作 052

キララせん磁性体CsCuCl₃の
磁気的キラリティの検証 高阪 勇輔 054

近藤半導体CeT₂Al₁₀ (T=Ru, Os)の特異な
相転移はどこまで理解されたか？ 高畠 敏郎 056

空間反転対称性の破れた金属の
「軌道交差」とスピンの反転 木村 憲彰 060

4f²希薄系Y(Pr)Ir₂Zn₂₀における
単サイトの非フェルミ液体的挙動 山根 悠 062

CONTENTS

研究会報告

共催シンポジウム(物理学会秋季大会)の報告 楠瀬 博明 065

第12回 物性科学領域横断研究会
領域合同研究会報告 石田 憲二 067

受賞
第13回凝縮系科学賞を受賞して 水口 佳一 069

International Workshop on j-fermion
Physics and Materials 会議報告 井澤 公一 070

J-Physics: Tropical Topical meeting 会議報告 神戸 振作 074

Multidimensional entropy landscape
of quantum criticality Hilbert v. Löhneysen 076

J-Physics トピカルミーティング
「拡張多極子研究の進展と展望」に参加して 高阪 勇輔 079

受賞

岡本佳比古さん
サー・マーティン・ウッド賞受賞 野原 実 080

第20回サー・マーティン・ウッド賞を受賞して 岡本 佳比古 081

滞在記

海外派遣制度によるチューリッヒ滞在の報告 角田 峻太郎 083

ドレスデン滞在記 藤井 拓斗 085

My maiden visit to Japan for collaborative
research work and subsequently attending
J-Physics 2018: Summer School and
International Workshop Rajib Mondal 087

若手紹介

内殻光電子スペクトル線二色性による
強相関Sm化合物の基底4f軌道対称性の決定 金井 惟奈 090

^{75}As -NQRによる
 $\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x\text{As}$ 超伝導相の研究 桑田 祥希 091

局所的に空間反転対称性の破れた反強磁性体
 $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ における電流誘起磁化 高力 暁成 092

硬X線内殻光電子線二色性による
多極子秩序状態の観測 濱本 諭 093

「ワイル反強磁性体 Mn_3Sn における
巨大な磁気光学カー効果と
拡張磁気八極子ドメインの直接観測」 肥後 友也 094

淡路島サマースクールと国際会議に参加して 山本 理香子 095

Magnetotransport measurement and
determination of Fermi surface through
quantum oscillation Yajian Hu 096

立方晶キラル化合物 EuPtSi の
特異な磁気構造と電子状態 垣花 将司 098

ダイヤモンド構造上での反強四極子秩序と
電気磁気効果による秩序変数の同定 石飛 尊之 099

一研究者の言葉

駄文 御領 潤 100

事務局からのお知らせ

2019年4月からの領域関連行事 101

事務局からのお知らせ / 編集後記 102

神は細部に宿る

領域代表 播磨 尚朝

神戸大学大学院理学研究科 教授

J-Physicsニュースレターも第7号となりました。領域発足から4年近くを経過して、4月からはいよいよ最終年度に入ります。これまでに多くの方に領域の活動に参加していただきました。おかげさまで、領域発足当初に予想していた以上の研究成果が出てきたように思います。それは、拡張多極子という概念が領域外にまで徐々に認知されてきていることにも現れています。電場誘起磁化効果が拡張多極子を用いて整理されて多くの物質において観測されていますし、磁気スピンホール効果も拡張多極子の概念を用いて理解されています。また、MnSiで観測されたスキルミオン磁性が同じ空間群の結晶であるEuPtSiでも観測されており、局所対称性を通じた遍歴磁性(d 電子系)と局在磁性(f 電子系)の共通概念の構築に向けても研究が進展しています。このような新しい成果を論文などにまとめる時は、意気揚々とした気分である一方で、新しさが故に細かな点が気になる場合もあるのではないのでしょうか。しかし、新しい成果ほど早く世に送りたいものですし、忙しい時代にあって、細かな点まで検討する時間をなかなかとれないものだと思います。

「神は細部に宿る」という言葉を聞いたことがあるでしょうか。一般的にはドイツの建築家であるルートヴィヒ・ミース・ファン・デル・ローエ(Ludwig Mies van der Rohe, 1886/3/27/-1969/8/17)が好んで口にした言葉とされているようです。建築家の言葉ですから、建築物を造る時は細部に手を抜いてはいけな、という様な意味なののでしょうか。関西学院大学の加藤哲弘教授は、美術史家のアビ・ヴァールブルク(Aby Warburg, 1866/6/13-1929/10/26)がハンブルグ大学での講義で用いたのが最初でないと指摘しています[1]。ともあれ、最初に指摘した人やその対象に限らず物を作りだす時にしばしば使われている様です。「神が宿る」とは、いかにもキリスト教的な世界観を表現しているように思えますが、もともと宗教画に対して言われた標語だったからかもしれません。

建築や美術には関係なく、私は「神は細部に宿る」という言葉が好きです。そう言うと、細かいところにこだわって、重箱の隅をつついて喜んでいる姿が思い浮かぶでしょう。そして、重箱の隅に神は潜んでいるのでしょうか。神が何処に潜んでいるかどうかは簡単には解らないものだと思います。しかし、できる限り細部に注意を払わなければ、神は姿を現してはくれないのではないのでしょうか。

最近、論文の執筆から出版までに必要な時間はすごく短くなってきました。その分、学問の進み具合も以前にも増して速くなって来たように感じます。実験での測定や数値計算でも格段に速く大量のデータが取得できるようになっています。関係する論文の情報もネットなどを用いて比較的簡単に手に入ります。論文執筆の作業についても、パソコンやネットの助けを借りることで簡単になりました。しかしながら、それらの情報を整理して自身の主張をまとめて表現することに要する時間を短くすることはできません。新規な話題ほど、共通認識が構築されていない分、押えておかなければいけない条件などが多くなるように思います。結果を早く公表しようとする、意図している訳ではありませんが、細かい点がつい御座成りになってしまうのは、私ばかりではないでしょう。

一過性の口頭発表とは違って、研究論文を出版する場合は、投稿から出版までの時間が短くなってきたとは

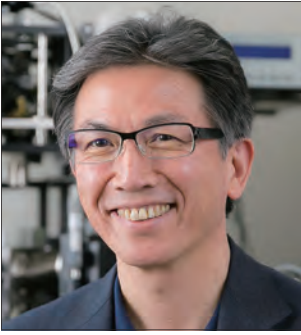
言っても、査読という過程を経ることが多いです。査読の有無は公表された研究論文としての価値を左右します。査読では、研究内容の評価や信憑性の検証などが行われており、検証は細部に渡ることもあるでしょう。研究論文でなくても、新聞や書物などの一般に公表される情報には信憑性が求められます。それを検証する作業は、査読ではなく閲読あるいは校閲と呼ばれるものでしょう。校正というのは元原稿と比べて正すことですが、校閲と言うのは元原稿の誤りを正す作業も指します。この巻頭言も、過去のものを読み直すといくつかの誤りを見つけて恥ずかしい思いをします。その多くは、パソコンに漢字変換を任せていたものや思い込みに依るものですが、いずれにしてももう少し注意深く検証していれば防げたものです。何を細かなことを、と思うかも知れませんが、一度書かれた文章というのは、簡単に二次拡散していくもので、ネットの世界での拡散の速さはご存知の通りです。研究論文においても、誤った参考文献が引用されていたり、図の説明が違っていたりするものを見かけますが、それらは熱心な読者をはっきりさせますし、延いては興味を失わせることにもつながります。

査読や校閲を経ない文章は、誤りをより多く含んでいると言ってもよいでしょう。査読付きの雑誌には評価の高い研究成果が掲載されていますが、査読だけでなく閲読や校閲の質も雑誌の価値を決める指標になると思います。本来は著者が気をつけることでしょうが、第三者である査読者や閲読者、場合によっては編集者がしっかりと指摘することも大事です。最近、成果発表のスピードが速くなったせいか、この点が御座成りにされているような気がします。もちろん、これは自らへの戒めも含めて書いているのですが、細部に渡る検証へのこだわりを諦めてはいけません。私がここで言いたいことは、細部の誤りを完全に無くせ、というのではなく、細部への検証作業を怠るな、ということです。時間の制約もありますので十分な検証が出来ないこともありますが、それでも検証が不十分なことは覚えておかねばなりません。

少しばかり話が抽象的になってきました。例えば、あることを主張する場合に、その前提となる条件を整えます。その条件が全て正しいということはまずありません。正しいことがある程度は検証されていることもあるでしょうし、正しいことが予想されているだけのこともあります。自分のものばかりでなく、他人の結果や主張を参考にして研究を進める訳ですから、全てが検証可能という訳にはいきません。実験結果や計算結果に少しばかり怪しい点があっても、気にしない場合もあります。研究成果＝物語というものは、その様なあやふやなものの上に成り立っています。細部にこだわってばかりでは研究を前に進めることが出来ませんが、新規な点をことさら強調して、細かな点への配慮が足りない成果というものは、実は賞味期限も短いのではないのでしょうか。細部にこだわるからこそが、研究成果をより確実なものにして、さらには将来につながる大きな研究の流れを作っていくために必要なことだと思います。

細部へのこだわりの先にこそ神は現れるのだと思います。

[1] 加藤哲弘、人文論究、53巻1号、(2003)15-28.(<http://hdl.handle.net/10236/363>)



スピン変換研究から見た多極子伝導

大谷 義近

東京大学物性研究所

新学術研究領域ナノスピントロニクス（スピン変換）の着想は、スピンを媒介とした固体内部の角運動量保存則であり、これに基づいて電気、光、音、振動、熱の相互変換を実現しようとするものである。これまでに、反強磁性スピン軌道トルク、スピンゼーベック効果、スピンペルチェ効果、スピン流体発電など多くの成果が上がっている[1]。これらの諸現象を電氣的に観測することを可能にしているのが、スピンホール効果であり、最も代表的なスピン流－電流相互変換現象であると言っても過言ではない。

この変換を発現させる主要原理がスピン軌道相互作用であり、J-Physicsで着目する諸物理現象においても、空間・時間の対称性とともにもスピン軌道相互作用が重要な役割を担っている。最近では、我々のスピン変換研究においても、空間反転対称性が破れたラッシュバ界面やトポロジカル絶縁体の表面状態において、スピン運動量ロッキング現象やエデルシュタイン効果を通じて多様なスピン流・電流相互変換機能が発現しており、多くの関連研究が進行している。このように“対称性”や“スピン軌道相互作用”というキーワードをとっても、両研究領域の関連性は密接であることが分かる。

我々のスピン変換では、三つの達成目標の一つとして「スピン変換による新物性の創出」を設定していることから、私のグループでも新奇なスピン変換物性の創出を目指して研究を進めている。新しい展開の芽を探していたところ、私の所属する東京大学物性研究所の中辻グループからワイル反強磁性体 Mn_3Sn において強磁性体にも匹敵する異常ホール効果が発現することが報告され[2]、スピン変換の観点から強い興味を持った。一般的に、異常ホール効果の発現機構には、サイドジャンプやスキュー散乱と言った外因性とバンド構造の作るベリー位相に由来する内因性機構の二つがある[3]。スピンホール効果も異常ホール効果と発現機構を共有することから、我々の実験手法を用いれば、新奇な反強磁性体のスピンホール効果が観測できると予想し、即座に実験の提案をしたところ快く共同研究の申し出を受けて頂いた。その後、試行錯誤の末、従来のスピンホール効果とは異なる時間反転対称性を破った磁気スピンホール効果と言う新しいスピンホール効果を観測するのに成功した(図1参照)[4]。

この他にこの物質で特筆すべきことは、鈴木ら[5]が言及しているように時間反転対称性が破れた磁気八極子を基底に取ることで異常ホール効果の見通しが良くなることである。すなわち、磁気八極子は、あたかもマクロスピンのようにふるまうと考えることができ、これまでに培った強磁性スピントロニクスの知見を、磁気八極子構造を内包する反強磁性体に当てはめることができそうである(図2a. 参照)。

磁壁電流駆動型メモリーやロジック素子などのスピントロニクスデバイス研究において、スピントルクによる磁壁の電流駆動ダイナミクスの詳細を明らかにすることは重要な研究課題の一つである。このため、強磁性体中の磁壁の電流駆動ダイナミクスに関する多くの研究がなされてきた。その結果、磁壁の移動速度は駆動磁場や電流の大きさに比例して増大するものの、閾速度を超えるとウォーカー・ブレイクダウンと呼ばれる磁壁構造の不安定化に伴う急激な減速現象が生じ、磁壁素子の駆動速度や駆動電流の限界値を与えることが明らかとなっている。

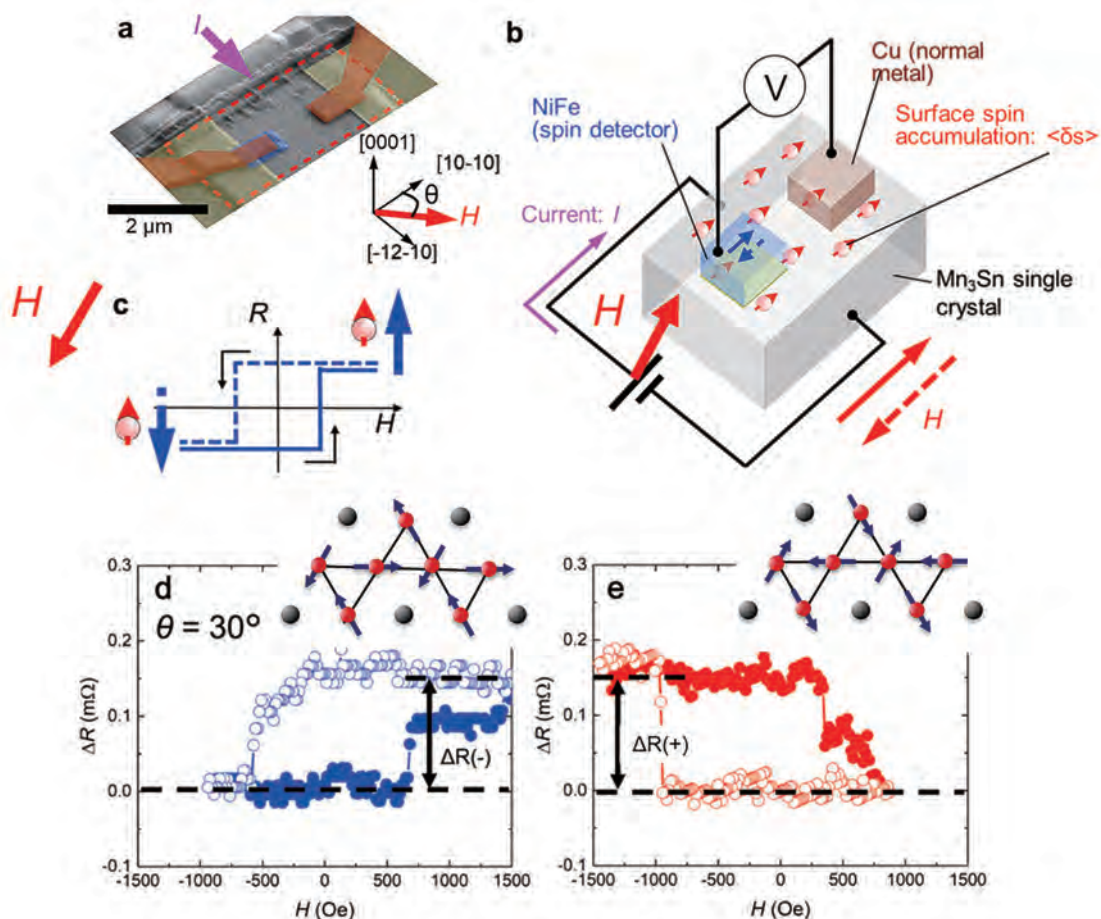


図 1 a. スピンホール効果によって生じるスピン蓄積測定用素子の電子顕微鏡像。図中青色の部分は強磁性電極、オレンジ色の部分は非磁性銅電極。 b. スピン蓄積測定原理の説明図、外部磁場により強磁性体検出器の磁化方向を反転させると、c. 図に示すようなヒステリシスを伴うスピン蓄積信号が測定される。八極子スピンを反転させると時間反転対称性が破れるためヒステリシスの符号が反転する。

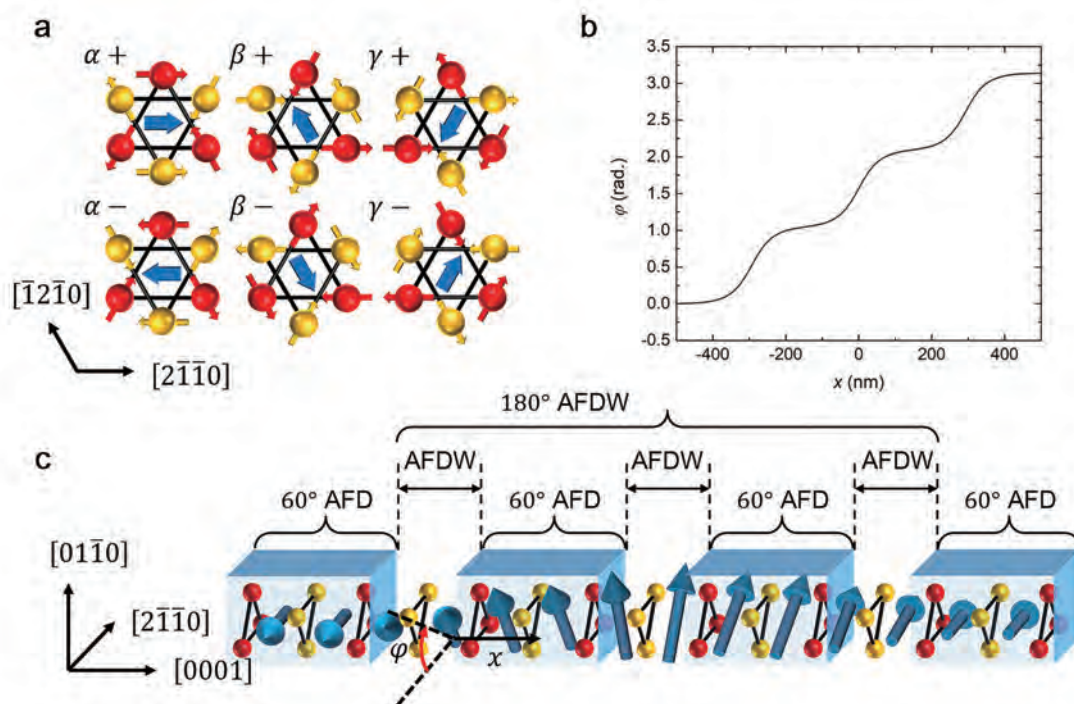


図 2. マイクロマグネティクス計算による反強磁性磁壁の計算: a. 二つの隣接するカゴメ格子の副格子磁化が作る 6 種類の磁気八極子構造、b. 磁気八極子（マクロスピン）の位置依存性、c. 3 つの 60°ごとに回転する磁壁（60°磁壁）で構成された反強磁性磁壁構造の模式図。

一方で、次世代デバイスの主要構成材料として、漏れ磁場がなく高密度化に適し、強磁性体の磁壁より高速のテラヘルツでの動作が可能な反強磁性体への関心が高まっている。最近になって、フェリ磁性体において系全体の角運動量がほぼゼロとなる補償温度近傍において磁壁移動速度が、従来の数倍の2 km/sと非常に大きく、超高速になることが見いだされている[5]。磁気八極子が磁区構造の主構成要素となる Mn_3Sn は、強磁性スピントロニクスの知見をテストする打って付けの舞台を提供する。我々の準備的な研究からも、図2に示すように、基本磁気構造として二つの隣接するカゴメ格子面の副格子磁化は回転する6種類の磁気八極子構造を取る。図2 b.に示すように、八極子構造をマクロスピンとみなした強磁性成分の[0001]方向の位置と角度をプロットすると、興味深いことに、通常のプロッホ磁壁の様に連続に回転するのではなく3つの60°ごとに回転する磁壁（60°磁壁）で構成された磁壁構造を取り、正味の磁壁幅は800 nmと比較的大きな値になることが分かった。

これらの知見をもとに現在実験を進めており、電流誘起磁壁移動の兆候も見え始めている。今後、多極子の観点から金属スピントロニクスで用いられているスピントルクやスピン軌道トルクなどの駆動原理を磁気八極子に拡張することが出来れば、スピン流ならぬ磁気八極子流（Octupole currents）の物理が出現し、スピントロニクスの分野もJ-Physicsのコミュニティと融合して新しい研究展開を見せるのではと夢見ている。

-
- [1] Y. Otani *et al.*, Nature Physics **13**, 829 (2017).
 - [2] S. Nakatsuji *et al.*, Nature **527**, 212 (2015).
 - [3] Y. Niimi *et al.*, Rep. Prog. Phys. **78**, 124501 (2015).
 - [4] M. Kimata *et al.*, Nature **565**, 627 (2019).
 - [5] K. J. Kim *et al.*, Nature Materials **16**, 1187 (2017).



Eu化合物の特異な電子状態

大貫 惇睦

琉球大学 理学部 客員教授

本多 史憲

東北大学
金属材料研究所 准教授

竹内 徹也

大阪大学
低温センター 助教

播磨 尚朝

神戸大学 理学部
教授

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

これまでのEu化合物の物性研究は、主としてアーク溶解した多結晶での研究であった。それはCeとは異なっており、蒸発しやすく単結晶育成が難しいからである。私達は単結晶を育成し、その電子状態を研究したので報告する[1, 2]。Eu化合物も様々な電子状態があることが明らかにされつつある。

単結晶育成

銀白色の金属であるEu原材料は通常オイルの中に入れて市販されている。純度は3Nで融点826℃、沸点1529℃である。Ceと異なり弱硝酸によるエッチングの表面洗浄はできない。表面の酸化層をナイフで削り、脱水アセトンの入ったガラスビンにほんの一時保管する。例えば、EuGa₄の単結晶を育成する時は、このガラスビンのまま超音波洗浄したEuと原材料Gaを二元状態図に従いEu : Ga = (0.15 ~ 0.1) : (0.85 ~ 0.9)の割合でアルミナるつぼに入れて石英管に封入し、Gaの自己フラックス法で育成する。この時のEuの表面層は購入時のEuほどではないが、削る中で直ちに酸化する。自己フラックスではない時は、Inがフラックスとして使用されることが多い。フラックス法ではこの程度のEuで充分良質な単結晶が育成される。育成期間はおよそ2週間である。フラックス法が適用されない時は、封入型のブリッジマン法になる。例えば融点1427℃のEuPd₃の単結晶を育成する時は、るつぼは融点2623℃のMoるつぼにする。この時は前述のEuをアルゴンガスで置換したグローブボックスの中でEuの表面を更にナイフで削り、Moるつぼの中に入れて、そのふたをアーク溶解して封入する。このような手続きをしても、完全にはEuOを排除することはできない。それは5 ~ 10 mm角の原材料のEuをナイフで削っていると、ブロックの中に黒い筋があったりする。これは酸化物であり、これがEuOとなって単結晶の中にわずかではあるが混入するのであろう。EuPd₃の場合は1480℃くらい的高温で若干の高温勾配の中にセットし、1週間ぐらいかけて育成する。

EuT₂Si₂ (T : Co, Rh, Ir, Ni, Pd, Pt) の時は、T₂Si₂をあらかじめアーク溶解することが重要である。例えばRhの融点は1964℃でRhSiの融点は1452℃である。前述のMoるつぼを使ったブリッジマン法では使用温度は1500℃以下にしたいため、またEuRh₂Si₂の融点は1600℃以上と推定されるので、仕込みのEuの量を1.8 ~ 2.0と多くして、Euのフラックス法という考えで育成する。

電子状態

これらの手法で育成したEu化合物の電子状態を以下に説明する。Eu化合物の95%以上がEu²⁺(S = 7/2, L = 0, J = 7/2, $\mu_{\text{eff}} = 7.94 \mu_B / \text{Eu}$, gJ = 7 μ_B / Eu)の磁性体、その多くは反強磁性体である。ほんのわずかEu³⁺あるい

は3価に近いEu化合物が存在する。しかし、 EuRh_2Si_2 , EuNi_2Ge_2 , EuCo_2Si_2 , EuGa_4 などのいくつかの化合物では圧力を加えると、図1(b)に示すようにある圧力 P_v で、温度に関して1次の価数転移を起こす。つまり、ある温度 T_v で2価に近い電子状態から3価に近い電子状態に1次の価数転移を起こす。図1(a)はよく知られたドニアックの相図であるが、 $\text{Eu}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$, EuPt_2Si_2 , EuCu_2Ge_2 ではこのドニアックの相図に従って Eu^{2+} の反強磁性体が比較的重い電子状態に圧力とともに変貌する。これらの化合物の中から、典型的な化合物の常圧での電気抵抗を図2に示す。

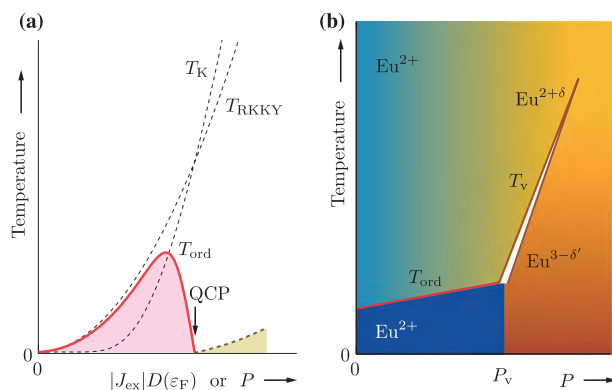


図1. (a) ドニアック相図と (b) 価数転移の圧力-温度相図

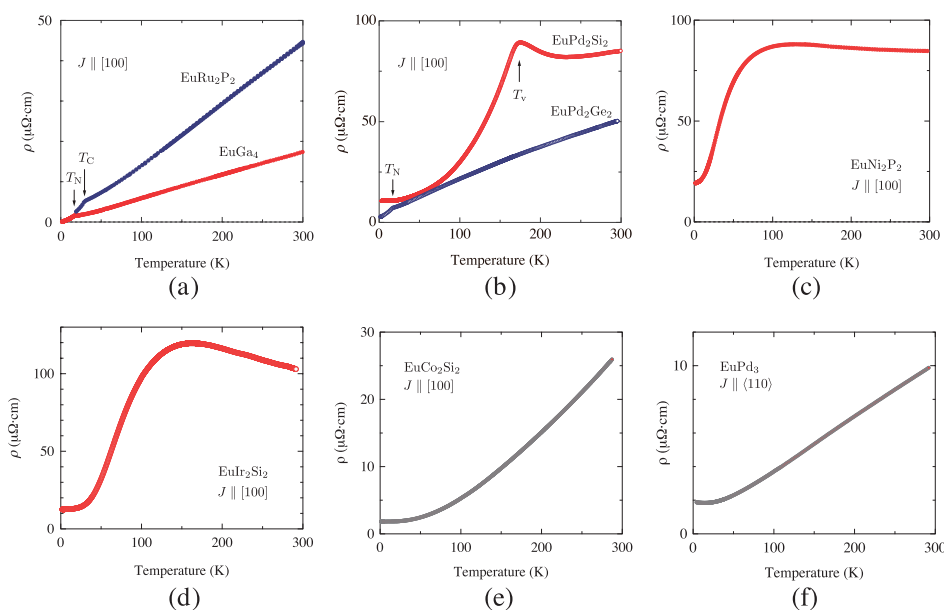


図2. 典型的なEu化合物の電気抵抗

Eu²⁺の化合物の磁化曲線

まず Eu^{2+} の電子状態について述べよう。図3(a)はネール温度 $T_N = 17\text{ K}$ の反強磁性体 EuGa_4 の磁化容易軸 $H // [100]$ と困難軸 $H // [001]$ での磁化曲線であり、2つの磁化曲線はほとんど変わらない。 $L = 0$ のため、結晶場がない局在4f電子は単純な磁化曲線を示す。磁化困難軸 $H // [001]$ は($H // [100]$ も)、fan構造から $7\mu_B/\text{Eu}$ に達する磁場 H_c で磁場により誘起された強磁性(基本的には常磁性)状態となる。その H_c は $H_c = (k_B / 3\mu_B)(T_N - \theta_p)$ 、すなわち $H_c [\text{kOe}] = 4.96 (T_N - \theta_p) [\text{K}]$ で表される。しかし、教科書に載るような典型的な磁化曲線が図3(b)に示すように EuNiGe_3 などで見出される。更にはスキルミオンを示す EuPtSi の磁化曲線もある[3]。

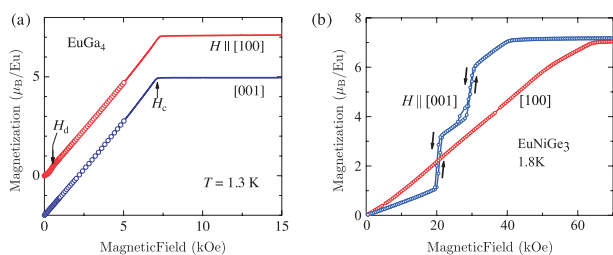


図3. (a) EuGa₄ と (b) EuNiGe₃ の磁化曲線

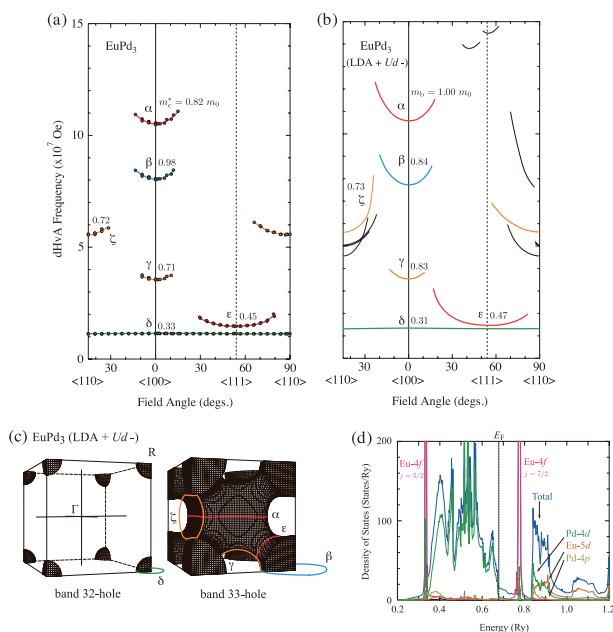


図4. (a) EuPd₃ のdHvA振動数の角度依存性と、(b) バンド理論の結果、(c) フェルミ面、及び (d) 状態密度

2 価の化合物の $H > H_c$ でのフェルミ面は、Sr化合物、すなわちEuGa₄はSrGa₄のフェルミ面で説明可能である。

Eu³⁺の化合物のフェルミ面

次に3価のEuPd₃では、Eu³⁺が4f⁶5s²5p⁶(5d¹6s²)のため、 $S = L = 3, J = 0$ であるので磁気モーメントは持たない。5d¹6s²が価電子となり、主としてPd-4dとPd-5s、及びEu-5d電子でフェルミ面が構成される。ドハース・ファンアルフェン(dHvA)効果によるdHvA振動数 F の角度依存性(実験)とLDAに基づくバンド計算の結果を図4(a)と(b)にそれぞれ示す。この時の4f電子は $j-j$ 結合で考え、6重縮退の $j = 5/2$ と8重縮退の $j = 7/2$ に分裂し、 $j = 5/2$ の準位はフェルミ準位から0.34 Ry下に、つまり4.7 eVあたりに占有し、4f電子の空席の $j = 7/2$ はフェルミ準位より1.3 eV上に位置するようにセットして計算されたものである。つまり、遮蔽クーロンパラメーター U をf電子に導入する。実験と理論は極めてよく一致している。

この4f電子は $J = 0$ ではあるが、 $J = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ の多重項のエネルギー差はそれほど小さくなく、そのためヴァンブレック常磁性が出現する。図5はEuPd₃のヴァンブレック常磁性の温度依存性であり、 $J = 0, 1, 2, 3$ は

$E_0 = 0, E_1 = 467 \text{ K}, E_2 = 1150 \text{ K}, E_3 = 2500 \text{ K}$ と推定された。図中の赤の一点鎖線がその理論曲線である。

重い電子状態

さて、図6に示されるEuNi₂P₂は電子比熱係数が約100 mJ / (K²・mol)の重い電子状態の化合物である。この重い電子状態は近藤効果に基づいていることを、熱膨張係数 α の温度依存性から明らかにした。図6(a) は40 Kに熱膨張係数がピークを示している。また、熱電能も40 Kにピークを持つ。CeRu₂Si₂の同様な実験結果の解析ではピークを示す温度の2倍が近藤温度 T_K とされている。従ってEuNi₂P₂は $T_K = 80 \text{ K}$ と決定され、100 mJ/(K²・mol)の重い電子状態は近藤効果によることを私達は明らかにした。更に図6(b)に示す4f電子の寄与する体積の相対変化 $(\Delta V / V)_{4f}$ はメスbauer分光のアイソマーシフトから求めた4f電子の価数に対応することも明らかに

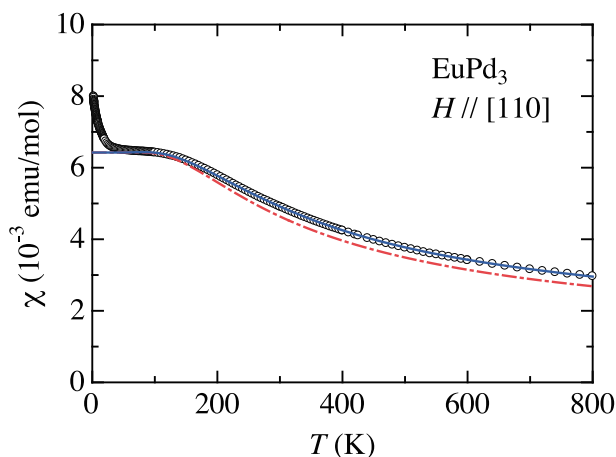


図5. EuPd₃のヴァンブレック常磁性による磁化率の温度依存性、赤の一点鎖線は理論曲線

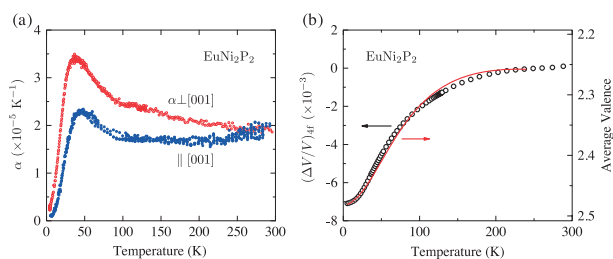


図6. (a) EuNi₂P₂の熱膨張係数 α の温度依存性 (b) 4f電子による体積の相対変化の温度依存性とメスバウアーのアイソマーシフトから推定されたEuの価数 [4]

され、 ρ_0 と A の値を圧力に対してプロットしたのが、図 8 (f) である。この図からも 7 GPa が $T_N \rightarrow 0$ の量子臨界点と思われる。この著しい圧力変化は三宅和正氏が指摘するように、CeRhIn₅で議論された価数転移も関与した現象なのかもしれない [5]。CeRhIn₅で見出された圧力誘起超伝導が、EuCu₂Ge₂の7 GPaで見出されるか、今後の研究が楽しみである。

した。EuNi₂P₂の室温での価数は2.25であり、近藤温度 $T_K = 80$ K以下から急激に価数は増大し、4.2 Kでは2.48となる。

価数転移

次に、価数転移を起こすEuRh₂Si₂, EuNi₂Ge₂, EuCo₂Ge₂の温度—圧力相図を図7(a) - (c)に示す。価数転移が始まる圧力 P_V はそれぞれ約1, 2, 3 GPaである。その1次の価数転移が終わる圧力 P_{CEP} は2, 3.5, 4.5 GPaと推定される。 $P > P_{CEP}$ では価数はEuNi₂P₂のように徐々に降温とともに変化していくことになり、やがては3価に近い電子状態となる。EuRh₂Si₂の圧力下での電気抵抗を図7(d)と(e)に示す。

ドニアックの相図

更にネール温度が徐々にゼロになるドニアックの相図に従うEu₂Ni₃Ge₅, EuPt₂Si₂, EuCu₂Ge₂の圧力—温度相図を図8(a) - (c)に示す。この中でEuCu₂Ge₂の6 GPaから7 GPaへの変化は著しい。図 8 (c)の相図作成のもととなるEuCu₂Ge₂の圧力下の電気抵抗の温度依存性を図 8 (d)と(e)に示す。低温での電気抵抗は $\rho = \rho_0 + AT^2$ で表

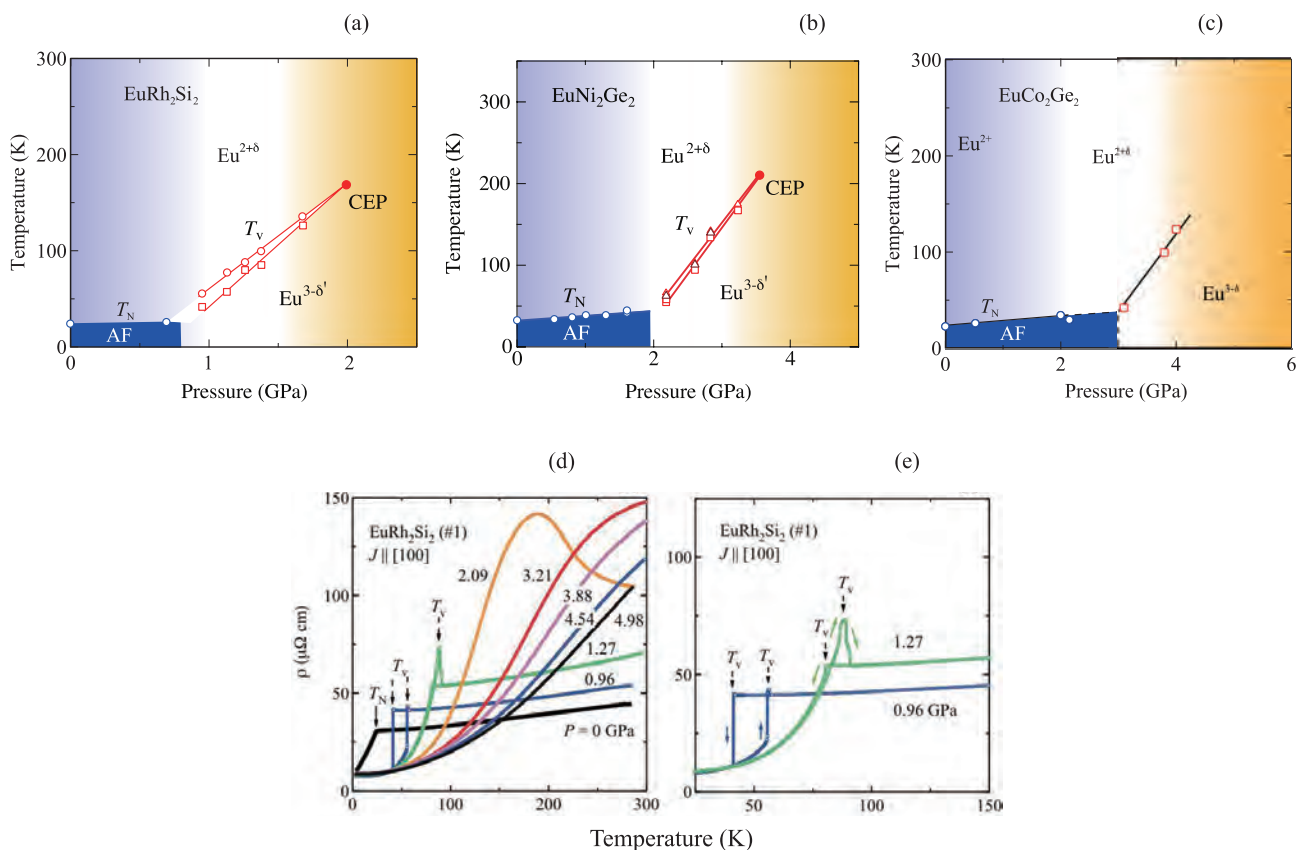


図7. 価数転移を起こす (a) EuRh_2Si_2 , (b) EuNi_2Ge_2 , (c) EuCo_2Ge_2 の圧力 - 温度相図. (d) と (e) EuRh_2Si_2 の圧力下での電気抵抗の温度依存性

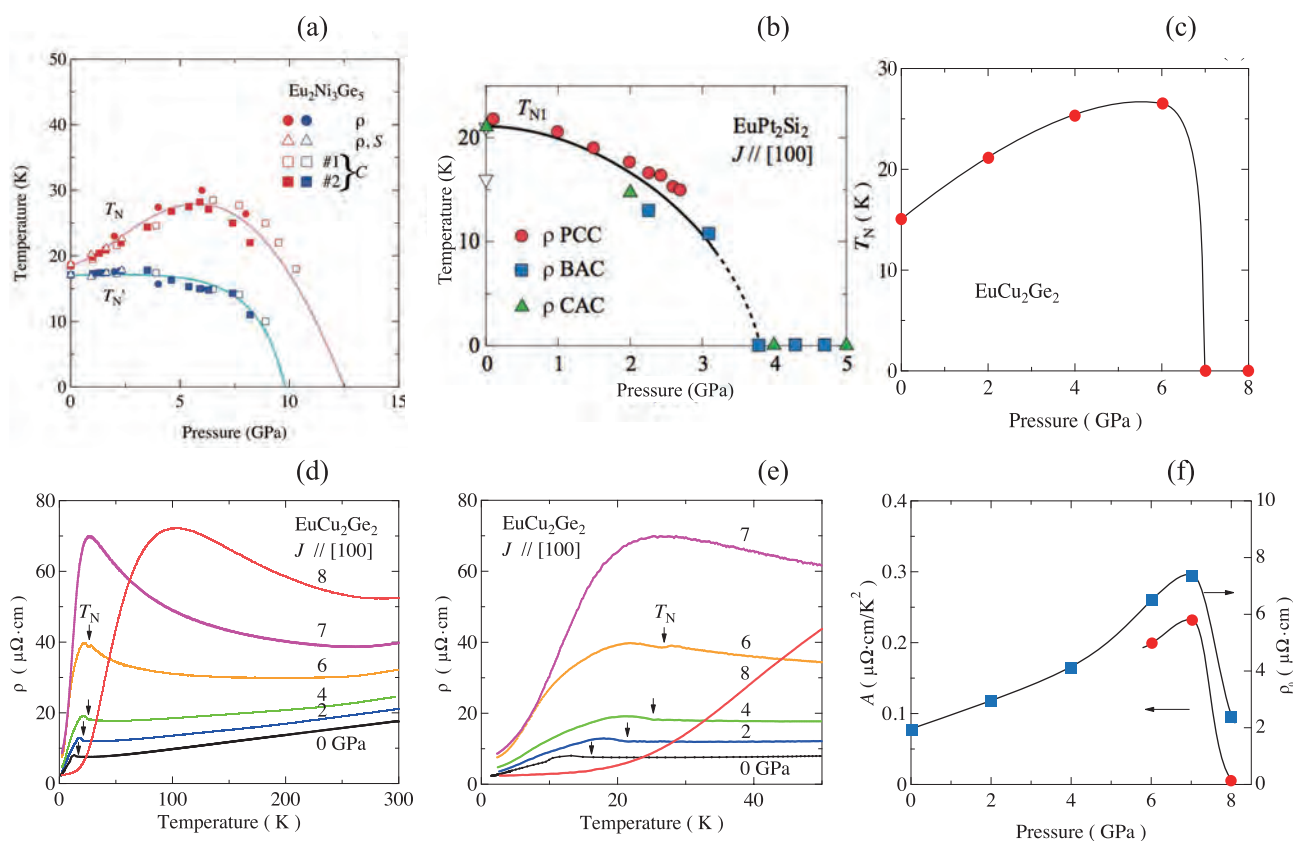


図8. ドニアックの相図に従う (a) $\text{Eu}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$, (b) EuPt_2Si_2 , (c) EuCu_2Ge_2 の圧力 - 温度相図 (d) - (f) EuCu_2Ge_2 の圧力下の電気抵抗の温度依存性, $\rho = \rho_0 + AT^2$ のA値, 残留抵抗値 ρ_0 の圧力変化

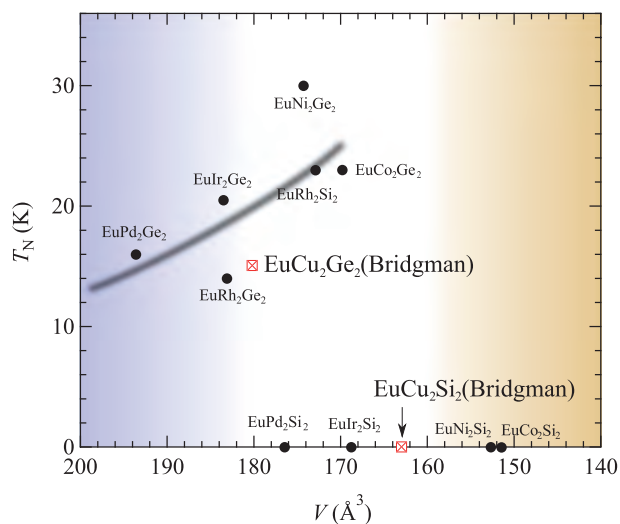


図9. EuT_2X_2 (T: 遷移金属, X: Si, Ge) の体積 V とネール温度 T_N の関係

まとめ

最後にまとめとして EuT_2X_2 (T: 遷移金属, X: Si, Ge) の体積 V とネール温度 T_N を図9に示す。体積は図の右側が小さく、左側が大きいことに注意されたい。体積が大きいと Eu^{2+} の反強磁性体、体積が小さいと Eu^{3+} のヴァンブレック常磁性体である。その中間に価数転移を起こしたり、徐々に価数が変化して $T_N \rightarrow 0$ となるEu化合物が存在することを示している。

- [1] Y. Ōnuki *et al.*, *Philos. Mag.* **97**, 3399 (2017).
- [2] F. Honda *et al.*, *Physica B* **536**, 182 (2018).
- [3] M. Kakihana *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 023701 (2018).
- [4] R. Nagarajan *et al.*, *Phys. Rev. B* **32**, 2846 (1985).
- [5] S. Watanabe and K. Miyake, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 033707 (2010).



立方晶Sm化合物における 特異な強相関電子状態

東中 隆二

首都大学東京 理学研究科 助教

山田 瑛

首都大学東京
理学研究科 博士課程

松田 達磨

首都大学東京
理学研究科 准教授

青木 勇二

首都大学東京
理学研究科 教授

本ニュースレターでは、Eu系の重い電子状態について大貫先生が解説記事を執筆されており、一方、私は同じく価数自由度が深く関わりと考えられるSm化合物における重い電子状態についての解説記事を執筆させて頂くことになりました。本稿では、Sm系で観測されている「磁場に鈍感な重い電子状態」あるいは、「磁場に鈍感な秩序状態」について、 $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ (Tr : 遷移金属)の研究結果を通してその物理的特徴を紹介します。これまでの研究により明らかになったことに加え、残された課題も含め現状を紹介する内容となりますので、是非今後の研究にご助言を頂ければ幸いです。このSm化合物における「磁場に鈍感な重い電子状態」の研究のきっかけとなる物質は、充填型スクテルライト化合物の $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ です。この研究に続き、同じく籠状物質として注目を集めた $\text{RTr}_2\text{Al}_{20}$ において、YbやPr系で精力的な研究が展開される一方、Sm化合物においてこの「磁場に鈍感な重い電子状態」が発見されたことで、我々はSm化合物特有の新奇な強相関電子状態に注目してきました。

このSm系特有の特異な現象を考える上で、Smのイオン単体の特徴を簡単に述べておきたいと思います。まず、価数状態に関して、希土類元素の2価から3価へのイオン価エネルギーに注目します(図1(a))。この図から、Eu, Ybイオンが2価になりやすいことが端的に分かると同時に、本稿主役のSmやTmにおいて、Euほどではないものの2価をとりやすい傾向があることがわかります。イオン化エネルギーの違いは、実際の化合物において2価をとるEu化合物は多数報告されている一方、典型的な2価をとるSm化合物が非常に少ないことにも現れています。しかしながら、Sm化合物では、以下の内容でも示すようにX線吸収実験から、中間価数状態をとると思われる物質が多いことがわかってきています。

一方、磁気的自由度に注目して、磁気的な基底状態を持つ Sm^{3+} と Eu^{2+} の状態を比較してみると、図1(b)に示すように、一般に磁気的なエネルギースケールに対応するde Gennes factorが Eu^{2+} に比べ Sm^{3+} では1/4程度の小さな値になっています。このことは、Smが磁気的基底状態を取るエネルギー利得が小さい傾向があることを示していると考えられます。さらに両者で大きく異なる特徴は、軌道自由度の大きさ(Sm^{3+} : $L=5$, Eu^{2+} : $L=0$)であり、 Sm^{3+} は、磁気モーメント(g_JJ)が小さいものの、軌道の自由度が大きく残っていることがわかります。これらの単体イオンに見られる、価数の自由度とこの軌道の自由度の違いが複雑に関係することが、SmとEu化合

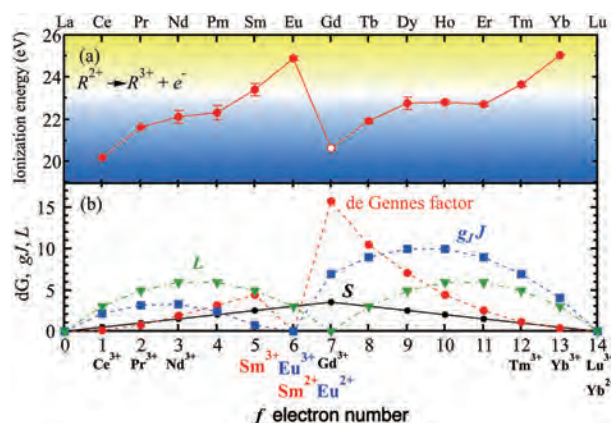


図 1: 希土類元素における (a) 第三イオン化エネルギー (b) S , L , g_JJ , dG

物における物性の違いにも深く関わっているのではと考えています。

磁場に鈍感な強相関電子物性を示す $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$

従来の重い電子状態の特徴として、近藤効果に起因した $-\log T$ に依存する電気抵抗率と増強された電子比熱係数が挙げられます。両者とも通常磁場印加により抑制されますが、 $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ では、磁場に殆ど依存しない特異な振る舞いを示します。まず、図2に電気抵抗率の温度依存性を示します。室温から降温につれて、電気抵抗が金属的に減少した後、極小値を持ち、上昇に転じます[1,2]。この上昇は $-\log T$ の依存性を示すため、近藤効果を示唆すると考えられますが、図に示すように磁場中でほとんど変化せず、従来の重い電子系で見られる負の電気抵抗が観測されません。さらに、 $T = T_x$ で相転移を起こし、転移温度以下で電気抵抗率の減少を示します。この相転移温度も同様に磁場中で殆ど変化しない特徴を示します。

次に、磁気比熱 C_{4f}/T の温度依存性を図3に示します。電子比熱係数 γ は、秩序相内にも関わらず、大きな値(最大値は 3.2 J/mol K^2 (Ta))を取ります(図3)[1-3]。興味深いことに、この秩序相内のみならず、常磁性状態での C_{4f}/T の振る舞いすら磁場中で殆ど変化していません。 Sm の基底状態は、 S_{4f} が $R\ln 4$ で飽和傾向を示すことから Sm^{3+} の $J = 5/2$ 多重項の結晶場 Γ_8 四重項であると考えられています。 Sm の秩序磁気モーメントの値は、ゼロ磁場での核比熱解析から $0.22 \mu_B/\text{Sm}$ (Ta)程度となり、

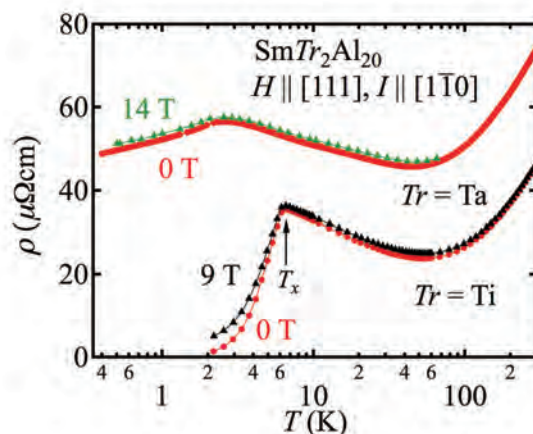


図2: $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{Ta}$) の抵抗率の温度依存性

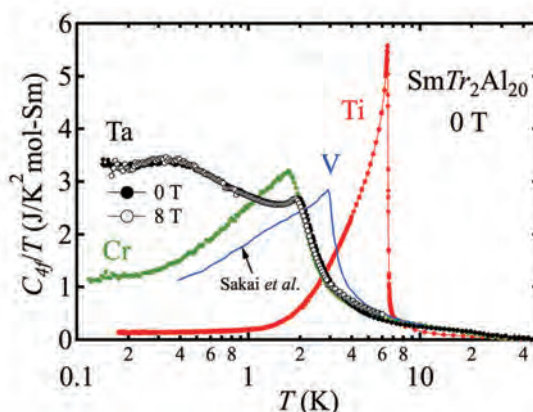


図3: $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Ta}$) の C_{4f}/T の温度依存性

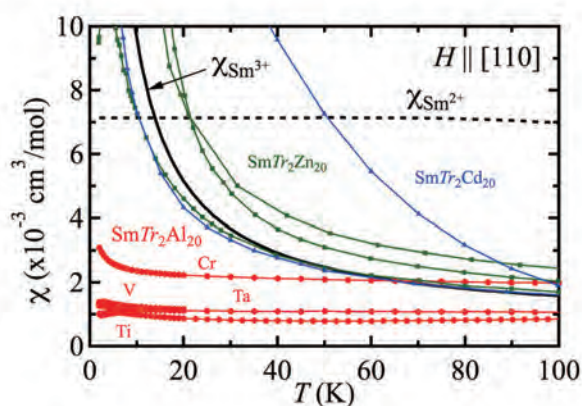


図4: $\text{SmTr}_2\text{X}_{20}$ (Tr : 遷移金属, X : Al, Zn, Cd) の磁化率の温度依存性

[1] R. Higashinaka *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 093703 (2011).
 [2] A. Yamada *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 123710 (2013).
 [3] A. Sakai and S. Nakatsuji, Phys. Rev. B **84**, 201106(R) (2011).

[4] T. U. Ito *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81** SB050 (2012).
 [5] 中瀬 迅 他, 日本物理学会秋季大会 24aF21-7 (2017).
 [6] 高橋 祥平 他, 日本物理学会秋季大会 13pJD-12 (2016).

Γ_8 状態($0.67 \mu_B/\text{Sm}$)や Sm^{3+} の自由イオン($0.85 \mu_B/\text{Sm}$)から期待される値から大きく抑制されています。磁気秩序は中性子、 μSR 実験[4]からも観測されており、中性子実験の磁気散乱強度が単純な磁気双極子の磁気構造因子のみでは説明できず、小さな秩序モーメントを持つことが分かっています。これらのことより、秩序変数への高次多極子自由度の関与が示唆されます。これは、 $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ のNQR測定における T_x 近傍のAlサイトのスペクトル幅の温度依存性が単純な磁気双極子秩序、電気四極子秩序では説明できないこと[5]や、超音波測定における T_x 付近で四極子の寄与が示唆される明確なソフト化[6]と矛盾していません。

磁化率の温度依存性も、Ce系等の重い電子状態とは異なる振る舞いを示します。従来の系では、重い準粒子のフェルミ液体状態特有の増強されたPauli常磁性が観測されますが、本系では、大きな常磁性成分が存在せず、低温領域で非常に抑制された有効磁気モーメント μ_{eff} を持つCurie-Weiss的な振る舞いが見られます(図4)[1-3]。この温度依存性は、 Sm^{3+} の磁化率と良く一致する $\text{Sm}Tr_2X_{20}$ ($X = \text{Zn}, \text{Cd}$)の温度依存性と明らかに異なっています。 $\text{Sm}Tr_2X_{20}$ ($X = \text{Zn}, \text{Cd}$)は、 $\text{Sm}Tr_2\text{Al}_{20}$ と同様のカゴ状構造を持ちますが、c-f混成強度が弱く、局在した4f電子状態を示します。実際に、磁化率の温度依存性で、明確なCurie-Weiss的な振る舞いを示すことに加え、電気抵抗率の温度依存性では、近藤効果を示唆する $-\log T$ 依存性は観測されていません。

Smイオンの価数 ν_{Sm} は、X線吸収スペクトロスコピー [7]、メスバウアー分光実験[8]により、平均価数+2.85価であり、 10^{-7}sec. 以下の時間スケールで揺動していることが分かっています(図5)[8]。 ν_{Sm} (以下、XASの測定値を指す)は、全ての $\text{Sm}Tr_2\text{Al}_{20}$ でほぼ同じ値を取り、殆ど温度依存しません。一方、 $\text{Sm}Tr_2\text{Al}_{20}$ と同じく磁場に鈍感な重い電子状態を示す $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の ν_{Sm} は、同様に室温で中間価数(+2.84価)を取りますが、 $\text{Sm}Tr_2\text{Al}_{20}$ とは異なり、 $\log T$ に依存して+2.76価(10 K)に減少する振る舞いを示します[9]。

上記の特異な振る舞いのSm濃度依存性を明らかにするために、 $\text{Sm}_x\text{La}_{1-x}\text{Ta}_2\text{Al}_{20}$ の物性測定を行ったところ、 $x = 0.01$ の系においても電気抵抗率に明確な $-\log T$ 依存性が観測され[10]、その振る舞いは非希釈系と同じく磁場応答が非常に小さいことが分かりました。また、 ν_{Sm} に関しても非希釈系と同様な振る舞いを示しており[11]、磁場に鈍感な近藤効果及び中間価数状態はSm単サイトでも実現することを見出しました。

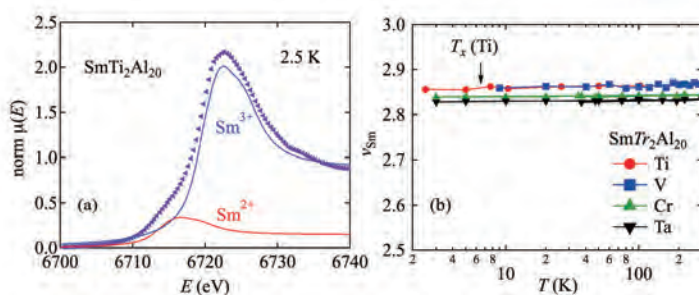


図 5: (a) $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ の XAS スペクトル (b) $\text{Sm}Tr_2\text{Al}_{20}$ ($Tr = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Ta}$) の Sm イオンの価数 ν_{Sm} の温度依存性

[7] R. Higashinaka *et al.*, JPS Conf. Proc. **3**, 011079 (2014).
 [8] S. Tsutsui *et al.*, Hyperfine Interact. **238**, 100 (2017).
 [9] K. Fushiya *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 075118 (2015).

[10] A. Yamada *et al.*, Physics Procedia **75**, 522 (2015).
 [11] A. Yamada *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **683**, 012020 (2016).
 [12] R. Higashinaka *et al.*, AIP Advances **8**, 125017 (2018).

立方晶Sm強相関化合物

以上で述べたように、 $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ の特徴として、① 増強されたPauli常磁性成分が無く、強く抑制された有効磁気モーメントを持つこと、② Smの顕著な価数揺動、という二点が挙げられます。これらの特徴と重い電子状態の関係を明確にするため、Sm立方晶化合物に絞って、電子比熱係数、有効磁気モーメント、Sm価数に注目して、その振る舞いをまとめたものが図6及び図7です[12]。

図6に γ と μ_{eff} の関係を示します。また、中間価数物質を赤字で示しています。 $\mu_{\text{eff}} > 0.4 \mu_{\text{B}}/\text{Sm}$ の領域には $\text{SmTr}_2\text{X}_{20}$ ($\text{X} = \text{Zn}, \text{Cd}$)、充填スクッテルダイト化合物が位置します。これらの化合物のSmの4f電子は伝導電子との混成が弱く、局在性が強いと考えられます。注目すべき点は、磁気モーメントの大きさが抑制されている $\mu_{\text{eff}} < 0.4 \mu_{\text{B}}/\text{Sm}$ の領域の化合物のSmの価数状態は全て中間価数となっている点です。これは、Sm系での強相関電子物性には、価数自由度が大きな役割を果たしていることを意味します。全ての $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ がこの領域に属しており、 100 mJ/mol K^2 を超える電子比熱係数を示します。また、ほとんどの化合物が $\gamma = \alpha / \mu_{\text{eff}}^2$ ($\alpha = 5 \sim 2 \times 10^2 \text{ mJ} \mu_{\text{B}}^2 / \text{mol K}^2$)の領域内に存在する傾向が見られています。

γ と ν_{Sm} の関係を図7に示します。 ν_{Sm} が3価から少しずれた領域で、大きく増強された γ を示します。 Sm^{2+} は自由度を有しない一重項基底状態であるため、 ν_{Sm} が2に近付くにつれて γ が減少するのは妥当な振る舞いです。 Sm^{3+} は様々な多極子自由度を持ちうるため、価数自由度の寄与も考えられる3価付近で強相関効果により価数が少し減少した領域で重い電子状態が現れると考えられます。価数のズレと γ の関係を定量的に見ると、Ce系

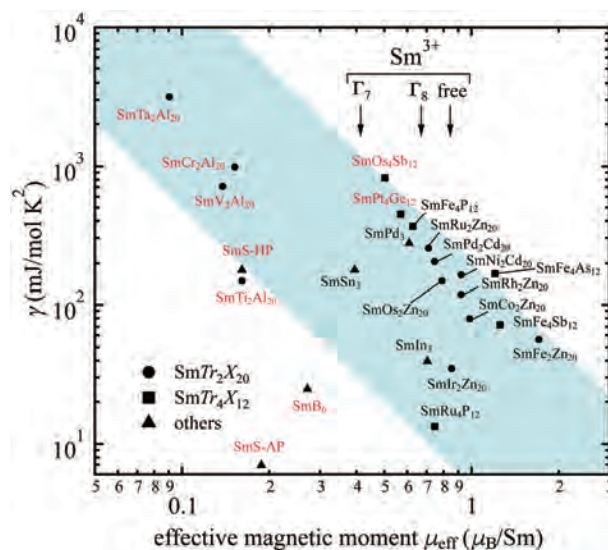


図6: Sm立方晶化合物の電子比熱係数 γ と有効磁気モーメント μ_{eff} の関係

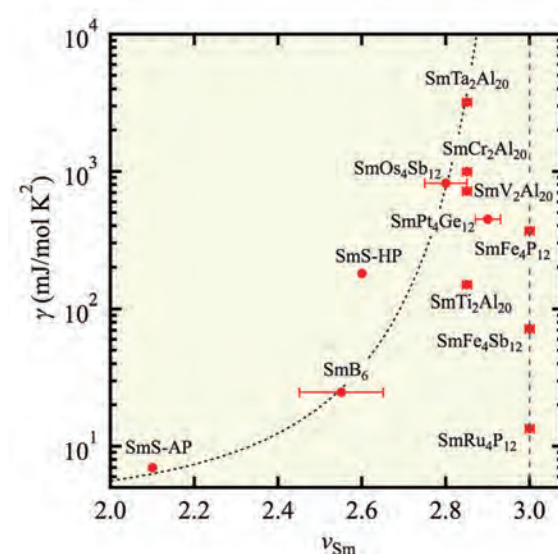


図7: Sm立方晶化合物の電子比熱係数 γ とSm平均価数 ν_{Sm} の関係

とは顕著に異なっており[12]、ここからもCe系とは異なる自由度の関与が示唆されます。最近、椎名氏により二軌道不純物アンダーソン模型を用いた理論が提唱されています。本系で観測された重い電子状態の特徴である非常に抑制されたPauli常磁性磁化率、中間価数で特異な重い電子状態が実現していることの理解に成功しており、これからの進展が期待されます。

まとめ、これからの展望

本稿では、 $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ で見出した特異な強相関電子物性の実験的事実を紹介した後、Sm立方晶化合物が示す物性を整理し、その傾向について紹介しました。Euも含めてSm系での多数f電子を持つ系での強相関電子物性研究は未開拓な領域が残されていると考えており、精力的にSm化合物の物質探索を進めていき、これまでの理論的枠組みを超えた新奇強相関電子物性を発見したいと思っています。

最後に、本稿の内容は、筒井智嗣、水牧仁一郎(JASRI)、藤秀樹(神戸大)、中西良樹(岩手大)、三宅厚志、徳永将史(東大物性研)、椎名亮輔(琉球大)各氏との共同研究の成果であり、多大なるご協力を頂きました。また、佐藤英行先生(首都大)には貴重なご助言を頂きました。ここに感謝いたします。



サマリウム化合物における 特異な重い電子状態

椎名 亮輔

琉球大学理学部 教授

1. はじめに

近藤格子系として広く研究されてきたセリウム (Ce) 化合物に比べて、サマリウム (Sm) 化合物の電子物性が一筋縄で理解できないことは良く知られています。Smの4f状態が多f電子系としての複雑さを内包していることや、f電子数によるイオン価数そのものが不安定であることが、Sm系のミクロな理解を困難にしてきたからです。例えば、圧力印可や元素置換により生じるSmの価数転移や [1]、Smイオン内でのスピンおよび軌道磁性の相殺現象などは [2,3]、それぞれ長年研究されてきた問題で、Sm系の複雑な物性の典型例と言えるでしょう。一方、近年、新物質の合成や結晶の純良化によってSm系の実験研究には格段の進展があり、それに伴って理論的な検討も広がりを見せています。こうした中で、本稿では、近年話題になってきたSm系の新たな特性、磁場鈍感重い電子現象とその理論的解釈について、私見を交えて紹介させていただきたいと思います。

2. 磁場鈍感重い電子状態

この現象が脚光を浴びる契機は、もう10年以上前になりますが、スクッテルダイト化合物の一種である $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の発見に遡ります [4]。この物質では、10 K以下の常磁性状態で電子比熱係数 γ が 1 J/mol K にも達し、また電気抵抗率の T^2 係数 A にも同様な増大が観測され、典型的な重い電子系の特徴が見出されました (図1)。そして興味深いことに、この重い電子状態が10 T以上の強磁場を印可してもほとんど変化せず、磁場に対して極めて頑強であることが明らかになったのです。これは、Ce系での従来の重い電子状態が磁場に敏感であることとは対照的です。ちなみに、冒頭でも指摘したように、もともとSmには軌道・スピンの相殺による磁性の減少傾向があるのですが、それらを考慮しても、この著しい磁場鈍感特性は明らかな異常現象と考えられてきました。

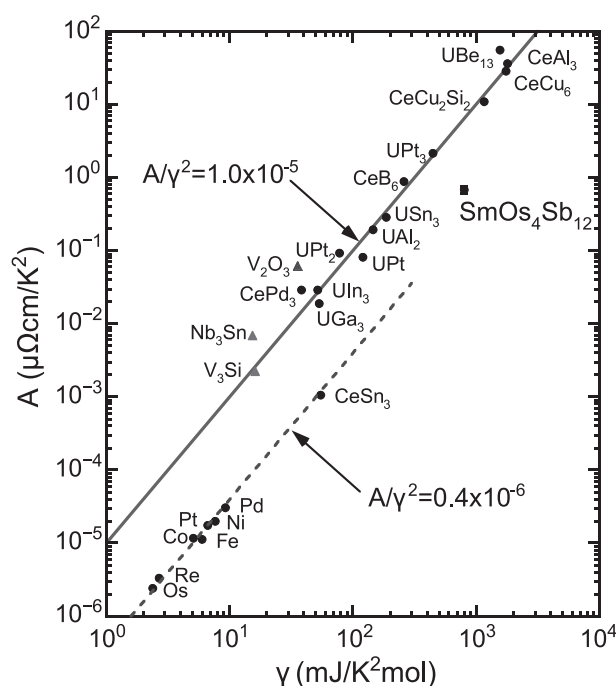


図1. Kadowaki-Woodsプロット。(文献[5]から転載)

この物質のもう一つの特性は、重い電子状態が中間価数で生じている点です。X線吸収実験によりSmの価数が低温20 K以下で2.76と見積もられており [5]、局在極限の2あるいは3価からは大きく離れていることが示されました。これも従来の重い電子状態からすれば大変異常なことです。すなわち、Ce化合物などにしばしば見られる重い電子状態は、電子系の相互作用効果が主に有効質量にくり込まれる現象で、局在極限に近づけば近づく

ほど有効質量が大きくなります。例えば、Ceを念頭に置いた周期アンダーソンモデルに対する標準的な平均場理論によると、有効質量の増強因子は、 n_f をf電子数として $(1 - n_f)^{-1}$ に比例することが導かれます。この表式からすれば、100～1000倍の有効質量を得るためには価数のずれは $dn_f < 0.01$ であることが必要であり、 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ で見出されている中間価数が、従来型の重い電子状態とは整合しがたいことが分かります。

さて、当時、スクッテルダイト系を含む籠状物質で、籠に内包された原子の局所的な非線形振動（ラトリング）による現象が注目を集め、バルク物性への

影響が広く議論されていました。その流れで、 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の磁場鈍感現象がラトリングと伝導電子との相互作用に起因する可能性も指摘されました。もしf電子が関与しなければ、磁性の担い手がないので磁場鈍感特性自体は自然に理解できるわけです。しかしながら、顕著な有効質量増強を電子格子相互作用から導くことは、特殊な状況を考えない限り困難であることも認識されていました。

一方、2010年以降、この問題に新たな進展がもたらされました。 $\text{Sm}1-2-20$ 系でも同様な現象が発見されたのです [6,7,8]。その詳細は当ニュースレター掲載の東中氏らの解説記事に委ねますが、当初 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ のみに見られた磁場鈍感重い電子が、実はSm化合物を舞台として現れることが明らかになったわけです [9]。ラトリングは充填された希土類原子の種類によらないはずなので、こうした発見は、第一義的にはSmの4f状態が重要であることを示しています。

3. 理論的解釈

このような現状を踏まえて、磁場鈍感現象をどのように理解したら良いのでしょうか？ 筆者が最近行なった理論研究について簡単に紹介させていただきたいと思います [10,11]。まず着目したのは Sm^{2+} に対応する f^6 状態です（図2）。 f^6 配位では全角運動量 $J = 0$ の一重項状態が基底となるので [12,13]、 f^5 配位の磁気的多重項との価数ゆらぎを考えれば、一見Ce化合物における f^0 - f^1 配位間の価数ゆらぎと似ています。しかし、Ceの f^0 状態との本質的な違いは、同じ一重項でもSmの f^6 状態が多電子状態であり内部構造があることです。この違いが、cf混成による強い価数ゆらぎにどう影響するかは理論的にも大変興味深い問題です。

具体的なモデル化に当たってのポイントは、Smスクッテルダイトおよび1-2-20系ともに立方晶であり、結晶場

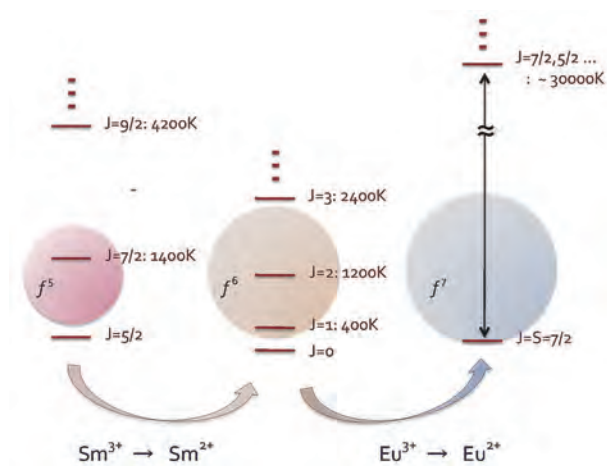


図2. SmおよびEuイオンのJ多重項構造と価数ゆらぎの概念図（一般にイオン半径はf電子数とともに増加）。

分裂したf状態のなかで Γ_8 四重項状態の混成が主要であることが予想される点です。この点に留意して、複雑な f^5 および f^6 状態をあらわに扱うことを避けて、思い切った単純化を行ないました。すなわち、モデル自由度として Γ_8 状態のみを考慮し、 Γ_8 の一重占有を f^5 、二重占有を f^6 とみなそうというものです。さらに、希土類イオンを不純物系とみなせば、問題は反強磁性相互作用を有する二軌道アンダーソン模型にマップされます。実は類似のアンダーソン模型は、二不純物近藤問題や結晶場一重項系の近藤効果などに関連して調べられてきた経緯があり、混成の強度変化により局所一重項と近藤一重項の間で量子転移を示しうることが指摘されていました。この量子転移がSm系でも、というのが、この現象に対する理論的なアイデアの起点でもあったわけです。筆者は、この模型に数値くり込み群法を適用し、隠れた量子転移の有無や価数ゆらぎ、フェルミ液体特性などを調べました。

それによれば、混成の変化に対して確かに明確な転移が存在し、転移点での比熱係数 γ の発散的増大が確認され、また γ の増大が広い領域に及ぶことが明らかになりました(図3)。さらに、比熱係数と一様帯磁率の比に対応するウィルソン比 $W \propto \chi / \gamma$ が転移点で消失し、その近傍領域で極めて小さな値をとることも分かりました。従来型の重い電子状態ではウィルソン比は $W = 1 \sim 2$ となるので、それらとの比較で考えれば、一種の磁場鈍感重い電子状態が転移点近傍に現れたと言えるわけです。また、若干意外なことに、 f^2 配位における励起三重項が十分な高エネルギー準位となっても有限の混成強度で転移が生じることが明らかとなり、そのため、このような重い電子状態が広く中間価数領域で生じることも示されました。このように、比較的単純な二軌道モデルにより、従来型とは質的に異なった重い電子状態が得られ、それらがSm系で見出されている異常現象を良く説明することが示されたわけです。特に、質量増強に伴ってウィルソン比が減少するという特性は、圧力印可や元素置換により実験的チェックが可能と思われます。

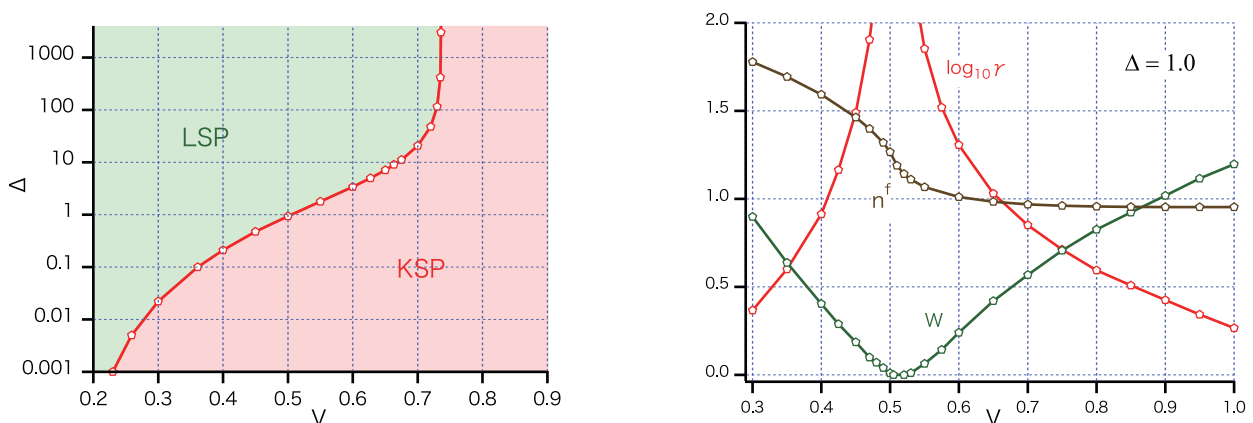


図3. 左図[10]: 近藤一重項(KSP)と局所一重項(LSP)の相図。Vは混成強度、 Δ はモデル f^2 配位(Sm^{2+} に対応)における一重項-三重項励起エネルギー。右図[11]: 比熱係数 γ 、ウィルソン比 W 、 Γ_8 状態占有数 n^f の計算結果の一例。イオン価数は $x = 4 - n$ 。

4. まとめ、およびEu化合物について

本稿では、近年Sm系の特性として定着しつつある磁場鈍感重い電子現象とその理論的解釈について紹介させていただきました。もちろん、理論は簡単化されたモデルによる解析であり、現実物質とのミクロな対応関係や実験結果との比較について多くの課題が残っています。また、今回の解析は一不純物模型によるもので、格子系において量子転移や重い電子の性質がどのように変更されるかは理論的にも興味深い問題です。

周期表でSmと隣接するユーロピウム (Eu) を含む化合物についても、Sm系と同様に価数転移が容易に生じる系として、近年活発な研究が行なわれているので、最後に少しだけコメントしたいと思います。Euの場合、3価が f^6 配位の非磁性状態に、2価が f^7 配位の磁性状態に対応し、その間の価数ゆらぎにはSm系との類似性があります。一方、Euの f^7 配位においては、軌道角運動量が消失しスピンだけのいわば強い磁性状態になるため(図2)、通常の近藤状態を想定できず、今回紹介したSm系における局所一重項と近藤一重項の競合の物理が、そのままEu系にも適用できるとは言えません。しかし少なくとも、Euにおける f^6 多体一重項からの価数ゆらぎは、Smと同様、劇的な J 多重項構造の変化をもたらします(図2)。その途上で生じる複雑かつ興味深い物理は、まさにJ-Physicsとでも言うべきもので、Sm系との類似性を踏まえて解明を進めることには大きな意義があると思います。本稿がその一助となれば、筆者にとって望外の喜びです。

-
- [1] C. M. Varma: Rev. Mod. Phys. **48**, 219 (1976).
 - [2] J. A. White and J. H. van Vleck: Phys. Rev. Lett. **6**, 412 (1961).
 - [3] H. Adachi and H. Ino: Nature **401**, 148 (1999).
 - [4] S. Sanada *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 246 (2005).
 - [5] M. Mizumaki *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 053706 (2007).
 - [6] R. Higashinaka *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 093703 (2011).
 - [7] A. Sakai and S. Nakatsuji: Phys. Rev. B **86**, 024106 (2012).
 - [8] A. Yamada *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 123710 (2013).
 - [9] R. Higashinaka *et al.*: AIP advances **8**, 125017 (2018).
 - [10] R. Shiina: J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 014702 (2018).
 - [11] R. Shiina: AIP Advances **8**, 101301 (2018).
 - [12] Y. Nanba *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 104712 (2013).
 - [13] G. H. Dieke and H. M. Crosswhite: Appl. Opt. **2**, 675 (1963).



内殻光電子線二色性＝内殻ホール－ f電子間相互作用の異方性から 軌道対称性とその温度変化を見る

関山 明

大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

前回 (FY2016-2017) に引き続いて今回も公募研究に採択頂きましてありがとうございます。前回の時は、「角度分解内殻光電子線二色性, 発見しました」というタイトルでニュースレター No. 2に寄稿させていただきましたが、その時には角度分解内殻光電子線二色性について言葉で説明しました。その後、それまで観測に成功していたYb化合物[1,2]だけでなく他の希土類でも内殻光電子線二色性を観測すべく(私というより研究室の学生・スタッフが)頑張りました。鬼丸さんの作成した立方晶PrIr₂Zn₂₀や関山研の先代にあたる菅研時代から永らく保管されていた立方晶PrB₆ (國井暁先生が東北大学でご活躍の頃に作成) で同様にPr 3d内殻に対して行い、結晶場基底状態が前者で四極子のみ活性な Γ_3 対称性、後者で磁気双極子および四極子の両方が活性な Γ_5 対称性ということの確認というか決定を何とか果たせました[3]。他にもSm³⁺化合物でも結晶場基底状態を反映した内殻光電子線二色性が得られること[4]や正方晶CeCu₂Ge₂において (他の実験から知られていましたが) 4f軌道がGeサイトを向いたタイプの Γ_7 対称性かつ $J_z = \pm 3/2$ と $\pm 5/2$ の成分がだいたい同じ割合 (少しか $J_z = \pm 3/2$ が多め) で混じった軌道であることを明らかにしました[5]。

・・・と、ここまで実験を進めた段階で、「順序が逆なのではないか?」と言われると返す言葉もないのですが最近ようやく「言葉」ではなく数式で正確に「エネルギーだけでなく光電子放出角度と直線偏光方向の関数としての内殻光電子スペクトル関数」を理論家 (広大先端 田中新氏) の助けを借りて表すことができるようになりました[6]ので今回少しだけ紹

介します (憶えている方もいないと思いますが、今までの研究会等で何度か示した式は少し間違えていました、申し訳ありません)。ここで「結晶場中の座標原点に孤立した希土類イオンからの内殻光電子放出」を考えます。測定する軌道は主量子数 n_c , 軌道量子数 l_c の $n_c l_c$ 内殻としますと、この内殻準位には磁気量子数 m_c , スピン量子数 s_c で指定された内殻電子が (内殻軌道のスピン軌道相互作用を無視した場合) ほぼ縮退して複数あります。従来の内殻光電子スペクトルの議論では、個々の内殻電子からの遷移行列要素 (遷移確率) の効果を平均化 (この場合、励起する光子はエネルギーを運ぶ粒子としてしか振舞いません) して、スペクトル関数はフェルミ準位から測ったエネルギーを ω (結合エネルギーは $-\omega$ となります) として

$$\rho_{n_c l_c}(\omega) = \sum_{f, m_c, s_c} |\langle E_f | a_{n_c l_c m_c s_c} | E_i \rangle|^2 \delta(\omega + E_f - E_i) \quad (1)$$

と表されてきました。ここで $|E_i\rangle$ はエネルギー E_i の始状態 (十分低温ならば結晶場基底状態)、 $|E_f\rangle$ はエネルギー E_f の光電子終状態、 $a_{n_c l_c m_c s_c}$ は当該量子数をもつ内殻電子の消滅演算子です。実は、これだけでも内殻光電子スペクトル形状は複数ピークを有する多重項構造になります。なぜなら、 n_c, l_c, m_c, s_c で指定される内殻ホールと磁気・スピン量子数 m, s をもつ4f電子とのクーロン及び交換積分は (m_c, s_c, m, s) の組合わせで異なるだけでなく、始状態から量子数 n_c, l_c, m_c, s_c の内殻電子を取り除いた状態 $a_{n_c l_c m_c s_c} | E_i \rangle$ は終状態の固有状態にならず、それらの線形結合で表されるからです。ここまでは古くから知られ実験的にも観測され続けてきました。しかし、

ここで光電子の波動関数と光の偏光方向まで考慮して個々の内殻電子の遷移行列要素を考えると、この多重項構造が変調を受けた形になります。簡単のため電気双極子遷移($l_c \pm 1$)かつ $l_c \rightarrow l_c + 1$ 遷移が $l_c \rightarrow l_c - 1$ 遷移よりも十分大きい(これは光電子の運動エネルギーが十分高ければそうなります[7])とすると、内殻光電子スペクトル関数はエネルギーに加えて光電子放出角度(θ_k, ϕ_k)および光の偏光方向 $\mathbf{e}$ (単位ベクトル)の関数として、

$$\rho_{ncl_c}(\omega, \mathbf{e}, \theta_k, \phi_k) \propto \sum_{f, s_c} \left| \sum_{m'_c} Y_{l_c+1}^{m'_c}(\theta_k, \phi_k) A_{l_c m_c}^{m'_c}(\mathbf{e}) \langle E_f | a_{ncl_c m_c s_c} | E_i \rangle \right|^2 \delta(\omega + E_f - E_i) \quad (2)$$

$$A_{l_c m_c}^{m'_c}(\mathbf{e}) = \int \int Y_{l_c+1}^{m'_c*}(\theta, \phi) (\mathbf{e} \cdot \hat{\mathbf{r}}) Y_{l_c}^{m_c}(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{r}} = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta) \quad (4)$$

と表すことができます。ここで $Y_{l_c}^{m_c}(\theta, \phi)$ は球面調和関数です。式(1)と式(2)を比べると、各内殻電子の励起に対して偏光方向と光電子放出角度による変調がかかり、多重項構造の相対的な強度が変化しうることが理解できます。単なる孤立イオンであれば球対称な電子系の座標軸は任意の方向に取れますが、結晶場中だとそうは行きませんので原理的に線二色性や角度依存性が生じうることになります。もう少しだけ進めると、有為な線二色性が得られるかどうかは励起する内殻の軌道量子数 l_c で決まります。

立方晶の場合、 p 軌道内殻($l_c = 1$)は p_x, p_y, p_z どの軌道も等価なので線二色性は生じませんが、 d 軌道内殻($l_c = 2$)であれば m_c が等価ではなくなるので線二色性が生じ、不完全殻 $4f$ 軌道の対称性が決定可能となります。正方晶であれば p 軌道内殻励起でも原理的に線二色性は生じます。

原理の説明でかなりスペースを使ってしまったが、今度の期間では課題名にあるように線二色性の温度変化観測を通じて第一励起状態の対称性や双極子も含めた多極子秩序前後の電子構造変化を捉えられればと考え、この号の別欄で濱本君が紹介しているような実験も既に進めているところです。いわゆるARPESでは波数をパラメータにして遍歴側からのアプローチと言えるのに対し、同じ「角度分解光電子分光」でも内殻励起ですと実空間での局在側からのアプローチという対照的な手法になるところが面白いと改めて感じております。今後ともよろしくお願いいたします。

[1] T. Mori *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 123702 (2014).
 [2] Y. Kanai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 073705 (2015).
 [3] S. Hamamoto *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123703 (2017).
 [7] S. M. Goldberg, C. S. Fadley, and S. Kono, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **21**, 285 (1981).

[4] Y. Kanai *et al.*, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **220**, 61 (2017).
 [5] H. Aratani *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 121113(R) (2018).
 [6] A. Sekiyama *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 013706 (2019).



価数転移由来の新規量子現象の理論研究

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

前世紀末から今世紀にかけて複数の物質で発見された非従来型の量子臨界現象は、強相関電子系における重要な問題として注目を集めている。非従来型の量子臨界現象を統一的に説明する機構としてYbの臨界価数ゆらぎの理論が提案され、本新学術領域において「価数転移由来の新規量子現象の解明」がA01研究項目として掲げられている。H28～H29年度までの研究により、準結晶 $\text{Yb}_{15}\text{Al}_{34}\text{Au}_{51}$ の零磁場・常圧においてチューニングなしに非従来型の量子臨界性が発現し、驚くべきことにそれが圧力に対してrobustであり、磁化率が温度と磁場の比で一つのスケーリング関数で表される T/B スケーリングが出現するメカニズムが、Ybの価数ゆらぎの理論に基づいて統一的に説明されることが示された[1]。これらの振る舞いは周期結晶 β - YbAlB_4 でも報告されており、臨界価数ゆらぎを起源として新しい普遍性クラスが周期系・準周期系に形成されている可能性が指摘されている[1]。実際、 β - YbAlB_4 の姉妹物質 α - $\text{YbAl}_{1-x}\text{Fe}_x\text{B}_4$ ($x=0.014$)で価数量子臨界性およびシャープなYb価数の変化が観測され、価数量子臨界性の実験的証拠が観測された[2]。本研究課題では、さらに理論研究を推進し、価数転移および臨界価数ゆらぎに由来する新しい量子現象を明らかにすることが研究の目的である。H28～H29年度の成果はニュースレターに報告した[1]ので、興味を持たれた方はそちらをご覧ください。本稿では、その間にも発展を続けている理論研究ならびに本新学術領域の関連する実験研究を紹介し、今後の研究の展望を述べる。

最近準結晶 $\text{Yb}_{15}\text{Al}_{34}\text{Au}_{51}$ のAlとAuを同族元素のGaとCuで系統的に置換した $\text{Yb}_{15}(\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x)_{34}(\text{Au}_{1-y}\text{Cu}_y)_{51}$ が作成され、Ybの価数 v の格子定数 a [注1]依存性が観測され

た[3]。興味深いことに、量子臨界性を示す準結晶 $\text{Yb}_{15}\text{Al}_{34}\text{Au}_{51}$ は v - a プロットにおいてYbの価数が急激に変化し始める点に位置しており、量子臨界性の発現にYbの価数が重要な役割を果たしていることを示している。

準結晶と共通のTsai型クラスターが体心立方格子に配列した格子構造をもつ1/1近似結晶 $\text{Yb}_{14}\text{Al}_{35}\text{Au}_{51}$ の拡張周期アンダーソン模型に基づいてYbの価数転移の量子臨界点近傍でのYbの価数の格子定数依存性を計算した結果、格子定数の減少に伴いYbの価数が量子臨界点から急激に減少し、実験と整合する振る舞いが得られた[4]。この量子臨界点近傍でのYbの価数の非対称な変化は、基底状態相図における価数量子臨界点の混成依存性に由来することがわかった[4]。近似結晶の単位胞のサイズを無限大にした極限が準結晶に対応し、Tsai型クラスターのYbの周りの局所構造は準結晶と近似結晶で共通であることから、この結果は準結晶 $\text{Yb}_{15}\text{Al}_{34}\text{Au}_{51}$ がYbの価数転移の量子臨界点に位置していることを示していると考えられる。

また、近似結晶でも圧力を $P=1.96\text{ GPa}\equiv P_c$ 印加すると、準結晶と共通の量子臨界性が出現するので、[4]の理論が正しいとすると、圧力下の近似結晶でも $P=P_c$ 近傍で上記準結晶と同様のYb価数の格子定数依存性が観測されることが期待される。実際、最近のSPring-8での低温精密価数測定により、それが観測された[3]。これらは準結晶と圧力下の近似結晶でYbの価数転移の量子臨界点の実現していることを直接示す実験的証拠として非常に重要である。

最近準結晶 $\text{Yb}_{15}\text{Al}_{34}\text{Au}_{51}$ のグリユナイゼンパラメータ $\Gamma(T)$ が観測され、驚くべきことに降温につれて $|\Gamma(T)|$ は減少し、最低温 $T=70\text{ mK}$ で有限値をとるこ

とが発見された[5]。一方、常圧でフェルミ液体的振る舞いを示す近似結晶 $\text{Yb}_{14}\text{Al}_{35}\text{Au}_{51}$ のグリユナイゼンパラメータも観測され、最低温 $T=70\text{ mK}$ での $|\Gamma(T)|$ は準結晶の値よりも大きいことが観測された[5]。これまで、「いかなる量子臨界点でもグリユナイゼンパラメータが発散する」ことが繰り込み群の理論により提唱されており[6]、この実験事実をいかに理解するかは重要かつ概念的に本質的な問題である。

この問題を解明するには、まず磁気量子臨界点近傍での磁気体積効果の理論的枠組みを構築した後で、価数量子臨界点での理論的枠組みをつくる必要がある。しかしながら、スピンゆらぎのSCR理論の枠組みにおいて磁気量子臨界点での熱膨張係数 $\alpha(T)$ およびグリユナイゼンパラメータ $\Gamma(T)$ はこれまで未解明であった。最近、筆者はその理論的枠組みを構築し、比熱 $C(T)$ 、 $\alpha(T)$ 、 $\Gamma(T)$ の完全な表式を導出することに成功した[7,8]。比熱は $C=C_a-C_b$ と表され、低温では $C_a(T)$ が支配的になり、過去に報告されているSCR理論および繰り込み群の理論の臨界性を再現することを確認した。一方、熱膨張係数とグリユナイゼンパラメータは C_a 、 C_b と関係する $\alpha=\alpha_a+\alpha_b$ 、 $\Gamma=\Gamma_a+\Gamma_b$ の和の形でそれぞれ表され、低温で α_b 、 Γ_b 項が支配的になることがわかった。さらに α_b 、 Γ_b 項に過去の繰り込み群の理論[6]では未報告の温度に依存する係数が存在していることを明らかにした。これにより、2次元反強磁性の量子臨界点では[6]で報告されている $T\rightarrow 0$ での熱膨張係数の発散は生じ

ないこと、また、2次元及び3次元の強磁性および反強磁性の量子臨界点における、量子臨界領域からキュリーワイス温度領域までの $\alpha(T)$ 、 $\Gamma(T)$ の温度依存性がはじめて明らかとなった[7,8]。

この枠組みをもとに価数量子臨界点での臨界体積効果の理論を構築してYb準結晶へ適用すれば、特異な臨界体積効果の機構解明につながることを期待される[9]。

また、準結晶 $\text{Yb}_{15}\text{Al}_{34}\text{Au}_{51}$ の μSR 測定[10]、中性子散乱による動的構造因子の観測[11]も行われており、 $\beta\text{-YbAlB}_4$ におけるメスバウアー分光測定によるゆっくりとした価数ゆらぎの時間スケール[12]が、準結晶の場合にどうなっているかも含めて今後の進展に期待したい。また、 YbNi_3Ga_9 [13]において価数転移の量子臨界点を同定し、各物理量の温度依存性を測定する実験も進行中であり[14]、今後の発展が楽しみである。

また、価数量子臨界点での臨界体積効果の理論を $\beta\text{-YbAlB}_4$ や $\alpha\text{-YbAl}_{1-x}\text{Fe}_x\text{B}_4$ ($x=0.014$)に適用し、実験との比較を行うことができれば興味深い。これらの理論研究と実験研究を推進することにより、本領域から、価数に由来する新しい量子臨界現象の動かぬ証拠と新しい性質が確立することが期待される。

このほか、上述した臨界体積効果のほかにも新しい量子現象を理論的に提案したいと考えており、研究を進めている[15]。今後領域の方々と議論させていただき、共同研究など新たな発展につながればと考えている。

[注1] 6次元空間における格子定数 $a\equiv a_0$

[1] 渡辺真仁, J-Physics ニュースレター No. **5**, 10 (2018) (https://www.jphysics.jp/newsletter/2018/03/22/J-Physics_NL_web_v05.pdf).

[2] K. Kuga *et al.*, Science Adv. **4**, 3547 (2018).

[3] 井村敬一郎 他, 日本物理学会 (2018) 秋季大会 9aB202-4; K. Imura *et al.*, submitted.

[4] S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys.: Condens. Matter **30**, 184001 (2018).

[5] P. Gegenwart, Phil. Mag. **97**, 3415 (2017); A. Wörl, S. Matsukawa, N. K. Sato, and P. Gegenwart, in preparation.

[6] L. Zhu, M. Garst, A. Rosch, and Q. Si, Phys. Rev. Lett. **91**, 066404 (2003).

[7] S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 034712 (2018).

[8] S. Watanabe and K. Miyake, Phys. Rev. B **99**, 035108 (2019).

[9] S. Watanabe and K. Miyake, submitted.

[10] 石田憲二 他, 日本物理学会 (2018) 秋季大会 9aB202-2.

[11] 佐藤卓 他, 日本物理学会 (2018) 秋季大会 9aB202-3.

[12] 小林寿夫, J-Physics H29年度領域全体会議 A01-3.

[13] 松林和幸、上床美也, 日本物理学会誌 **73**, 5月号 292, (2018).

[14] 梅尾和則, J-Physics ニュースレター No. **6**, 38 (2018) (https://www.jphysics.jp/newsletter/2018/11/26/J-Physics_NL_web_v06.pdf).

[15] S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 033701 (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

量子スピン系や強相関電子系の分野では、いくら温度を下けてもスピンの長距離秩序が生じず、絶対零度でも量子ゆらぎで秩序が溶けてしまったという意味で、量子スピン液体と呼ばれる現象が注目されている。とくにこれが、1986年に発見された銅酸化物の高温超伝導の起源ではないかと提唱されて以来、フラストレーション系を中心に、量子スピン液体探索が精力的に続けられている。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「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。

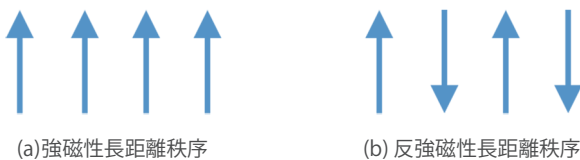


図1. 従来の(a)強磁性、(b)反強磁性長距離秩序

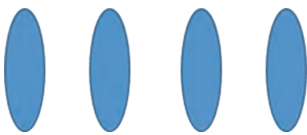


図2. スピネマティック秩序

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。

スピネマティック相は、最初は、強磁性相互作用を含む低次元フラストレーション系の飽和磁化付近に現れるマグノン対の凝縮相として理論的に提案され[1]、密度行列繰り込み群（DMRG）による詳細な数値解析により、定量的にも立証された[2]。一方、この候補物質と考えられているLiCuVO₄における強磁場磁化測定において、理論的に予想されている飽和磁化近傍で、新奇相が発見されているが、これが本当にスピネマティック相であるかどうか、決定的な証拠を得るには至っていない[3]。理論的に予想されるスピネマティック相が実現する磁場が非常に大きいため、中性子散乱等の大掛かりな測定が難しいことが問題となっている。そこで本研究では、低磁場領域で実現するスピネマティック相を理論的に提案し、検証実験を提案することを目指している。

2. 低次元量子スピン系のスピネマティック相

本研究代表者の以前の理論的・数値的研究において[4]、従来の容易軸異方性を持つ反強磁性体で実現する磁化ジャンプを伴うスピフロップ転移が、量子ゆらぎの強い一次元系においては、中間相を伴う2回の二次相転移に変わり、磁化曲線が連続につながることを見出した(図3)。具体的なモデルとしては、S=1反強磁性鎖に結晶場による異方性Dを導入

した系で、以下のハミルトニアンで記述される。

$$\mathcal{H} = \sum_i J \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j + D(S_i^z)^2$$

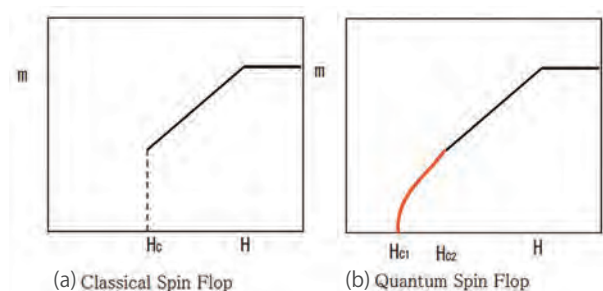


図 3. (a)従来のスピントロップと、(b)量子一次元系のスピントロップ：二次転移が二回起こり、中間相としてスピネマティック相が出現する。

この系は、異方性が無い場合には、Haldane ギャップを持つが、十分大きい負の D がある場合には、容易軸異方性のためにネール秩序を持つ。このネール秩序に平行な磁場をかけると、スピントロップ転移が起きると予想されていたが、本研究代表者による数値対角化と有限サイズスケールリングの解析により、磁化ジャンプの代わりに、2 回の二次相転移が起き、その中間相として、2 マグノンの束縛状態となる新しい朝永ラッティンジャー液体相が出現することが判明した。そして、この中間相が、いま注目されているスピネマティック相と等価であることもわかってきた。もしこのスピネマティック相が現実の物質で実現すれば、低磁場領域で観測可能なため、さまざまな測定による検証実験が期待できる。

3. 最近の成果

本研究では、この低磁場領域に現れるスピネマティック相を実現する系を理論的に予測し、検証実験を提案するとともに、期待される新現象や新物性の可能性を明らかにすることを目標とする。最新の成果として、 $S=1$ スピンラダー系に対する数値対角化とサイズスケールリングにより明らかとなった、スピネマティック相を含む磁化 m と異方性 D の相図を図 4 に示す。異方性が $-3.0 < D < -0.05$ の場合の磁化過程では、最初の臨界磁場からスピネマティック朝永ラッティンジャー液体が現れ、次の臨界磁場で従来の朝永ラッティンジャー液体へと転移することがわかる。

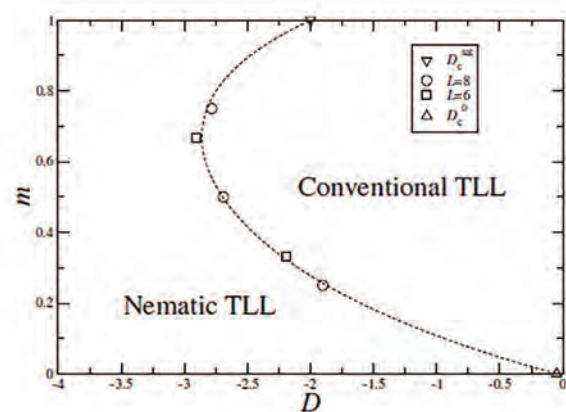


図 4. $S=1$ スピンラダー系（足方向と桁方向の交換相互作用を等しく $J_1=J_z=1$ とした場合）の容易軸異方性 D と磁化 m の相図。低磁場側でスピネマティック相に相当する朝永ラッティンジャー液体相、高磁場側で従来の朝永ラッティンジャー液体相が実現する。

- [1] N. Shannon, T. Momoi and P. Sindzingre, Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 027213
- [2] T. Hikihara, K. Lars, T. Momoi and A. Furusaki, Phys. Rev. B **78** (2008) 144404
- [3] N. Buttgen, et al., Phys. Rev. B **90** (2014) 134401
- [4] T. Sakai: Phys. Rev. B **58** (1998) 6268



構造不安定性の制御による非クラマース系多極子物質の開発とその圧力効果の研究

脇倉 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

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

自己紹介

今年度より、J-Physicsの領域研究に参加させていただきます、横浜国立大学の脇倉和平と申します。この度は、公募研究に採択いただき誠にありがとうございます。最初は簡単な自己紹介をさせていただきたいと思います。私は、広島県竹原市出身で、学部から学位取得までを広島大学で過ごしました。学部4年から高畠敏郎先生と鬼丸孝博先生のもとで試料合成を中心に学び、2016年3月に学位を取得しました。その後、横浜国立大学の梅原出先生の研究室に助教として着任し、現在に至ります。梅原研では圧力下熱物性測定を中心とした研究を行っており、私は試料合成環境の整備と新物質探索を行いながら、圧力下物性測定の手法を学ばせてもらっています。今回の公募研究は追加採択だったこともあり、少し短い期間となりますが、残りの1年半どうぞよろしくお願いいたします。

研究紹介

Pr1-2-20系と呼ばれている $\text{PrT}_2\text{X}_{20}$ (T : 遷移金属, $X = \text{Al, Zn, Cd}$) では、四極子と八極子の自由度のみをもつ非クラマース Γ_3 二重項が結晶場基底状態となっており、特に四極子が関与する興味深い現象が多数見出されています[1]。一方で、 Γ_3 基底状態をもつ化合物はPr1-2-20系を除くと数種類に限られることから、新たな物質群の探索が強く求められていました。そこで、我々の研究グループでは構造相転移

を示し、転移温度以下で多極子自由度が消失する同型の $\text{PrRu}_2\text{Zn}_{20}$ に着目しました。1-2-20系は図1の $\text{CeCr}_2\text{Al}_{20}$ 型構造をもち、3つのZnサイト(16c, 48f, 96g)があります。私は以前、 $\text{PrRu}_2\text{Zn}_{20}$ の構造相転移の起源を調べていたのですが、16cサイトのZn原子($\text{Zn}(16c)$)を囲むカゴの空間が広すぎることに起因することがわかりました[2]。また、これと少し関連して富山大のグループが、 $\text{RT}_2\text{Zn}_{20}$ (R : 希土類, $T = \text{Co, Fe}$)では、 $\text{Zn}(16c)$ を選択的にSnで置換可能であることを報告しました[3]。これらを考慮して、 $\text{PrRu}_2\text{Zn}_{20}$ にZnより原子半径が大きいSnを置換すると、大きな空間がある16cサイトへ選択的にSnが置換され、カゴの空間が相対的に狭くなることで構造相転移が抑制されるのではないかと考えました。実際に試料合成を行い、B01班の松田先生(首都大)の協力を得て単結晶構造解析を行ったところ、期待通り16cサイトにSnがオーダーした四元化合物 $\text{PrRu}_2\text{Sn}_2\text{Zn}_{18}$ が得られていることが確認できました。さらに、構造相転移が抑制され、 Γ_3 基底状態が低温まで維持されることも明らかになりました[4]。

本研究課題では、以上を踏まえて以下の2点に重点を置き研究を進めます。

(1) $\text{PrRu}_2\text{Sn}_2\text{Zn}_{18}$ の圧力下物性測定

(2) $\text{PrRu}_2\text{Sn}_2\text{Zn}_{18}$ 以外の同型化合物の探索

(1)では、我々が新たに発見した Γ_3 二重項基底状態をもつ新物質 $\text{PrRu}_2\text{Sn}_2\text{Zn}_{18}$ について、試料の純良化を行い、常圧と圧力下での物性測定を行います。

Pr-1-2-20系では、 $X = \text{Cd}$ 、 Zn 、 Al 系の3種類が知られていますが、多極子自由度を担うPrの4f電子はX

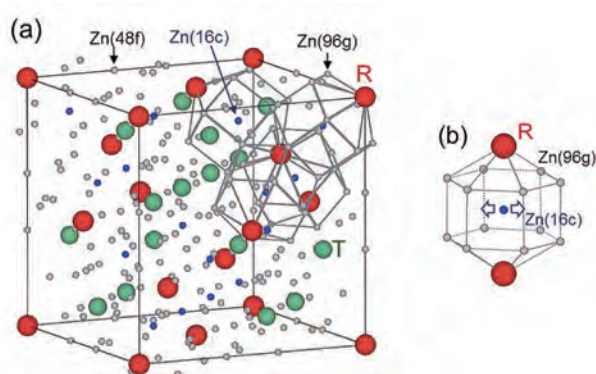


図1 (a) RT_2Zn_{20} の結晶構造。(b) 16cサイトのZnを囲む希土類Rと96gサイトのZnから成るカゴ。

= Cd系で最も局在しており、Zn系、Al系の順に伝導電子との混成効果が強くなります。この混成強度を知る上で同型Ce化合物での混成強度がある程度の指標になります。CeRu₂Sn₂Zn₁₈を合成し、CeRu₂Zn₂₀の物性と比較すると、Sn置換により重い電子状態から価数揺動状態へ移り変わることがわかりました。このことは、4f電子と伝導電子の混成効果がSn置換により増強されたことを示唆します。つまり、Sn置換系はZn系とAl系の中間となる混成強度をもち、両者の間をつなぐ化合物となり得ると思われます。そこで、Sn置換系の低温物性を詳細に調べ、Zn系やAl系で報告された温度-圧力相図、非フェルミ液体的振る舞いや超伝導などが、中間程度の混成強度をもつことでどのように変化するかを明らかにしていきたいと考えています。

また(2)について、Sn以外でもZnより大きな原子半径をもつ元素であれば、同様の手法により新たな四元化合物が得られると期待されます。この候補としてZnサイトに置換可能であることが報告されているInが挙げられます[5]。実際にIn置換系について $R = \text{La}$ 系の試料合成を行ったところ、残留抵抗比RRR~20程度の試料が得られており、現在単結晶構造解析を進めているところです。この他、遷移金属サイトにも自由度があり、例えばPrOs₂Zn₂₀は、PrRu₂Zn₂₀とほぼ同様の構造相転移を示すため[2]、PrOs₂Zn₂₀のSn、In置換系も4元化合物の有力な候補となります。このように、有望な元素の組み合わせを幾つか試し、四元化合物となることが確認できた試料についてPrRu₂Sn₂Zn₁₈と同様に圧力下での物性測定を進めていく予定です。

これまでの研究は、東京大学物性研究所の上床先生・郷地先生、首都大学東京の松田先生・青木先生、琉球大学の與儀先生、電気通信大学の松林先生と共同で進めてきました。今後も上記の先生方のお力をお借りしながら研究を進めていく予定です。また、領域の皆様との共同研究を積極的に行っていきたいと考えておりますので、もし得られた試料についてご興味をお持ちいただけましたら、お声をかけていただけると幸いです。

[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] Y. Isikawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 074707 (2015).

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

[5] Y. Okamoto et al., J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 093712 (2010).



強磁場中性子回折とX線回折の進展と URu₂Si₂の強磁場相における整合-非整合転移

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

はじめに

様々な磁性イオンの中で、ウランは遍歴性と局在性が共存し、さらには多極子の秩序と揺らぎもあいまって多様な電子相・磁気相が現れる物質系である。中でもURu₂Si₂は1つの物質の中で、超伝導、メタマグ転移、隠れた秩序などが、磁場、温度、圧力で入れ替わるカメレオンのような物質であり、長年興味もたれてきた。我々は、この物質の強磁場相に焦点をあてて、中性子回折やX線回折の実験を進めている。ここでは、こうした強磁場実験の紹介とURu₂Si₂の強磁場相で見られる整合-非整合転移という2つの観点から、我々の研究を簡単に紹介する。

中性子回折

中性子回折を強磁場中で行うためには、パルス強磁場を用いる。現在ウランの実験は国内のJ-PARCでは受け入れていないため、イギリスのラザフォード研究所とフランスのラウエランジュバン研究所で実験を行っている。前者は、白色中性子を生成するパルス中性子源で、後者は単色中性子を用いる原子炉中性子源であり、それぞれ広い波数空間の探索、特定の波数における低バックグラウンドの測定に特徴がある。磁場の生成には海外で使うために自主開発した持ち運び型のコンパクト電源を用いる。体積1 m³、重量600 kgの電源で40テスラの磁場発生が可能である。URu₂Si₂は低磁場では、VanVleck的にみえる小さな磁化が出るだけであるが、35テスラ以上で多段のメタマグ転移を示す。強磁場相の磁気構造を決めるた

めには、中性子回折実験が必要であり、パルス強磁場装置が使えるようになって、初めてそれが可能になった[1]。



図1 ラザフォード研究所の中性子分光器Merlinにおける強磁場実験のセットアップ。手前がクライオスタット、奥の銀色の箱がコンデンサ電源。

X線回折

近年のX線実験の進歩はめざましいが、我々が最近着目しているのはX線自由電子レーザー (XFEL) である。XFELは数十フェムト秒のパルスX線であり、瞬時強度は放射光に比べて数桁高い。この特徴を利用すると、パルス強磁場の最大の弱点であった短時間しか強磁場を発生出来ないということはもはや弱点でなくなる。磁化やESRなどの測定と同様にX線回折においてもシングルショットの測定が可能になる。これは大きなパラダイムシフトと言って良い。この瞬時

強度を生かせば、電荷密度波による微弱な超格子反射、相転移における過渡的な構造変化などが容易に測定出来る[2]。さらには、発光分光のような分光測定も可能であり、電子状態やスピン状態と構造の両面を調べる事が出来る。URu₂Si₂への応用では、最近の技術的な進歩により、発生磁場を40テスラまで向上することに成功し、強磁場相の対称性を調べる事が可能になった。ウランが扱えるSwissFELでの実験が今後実施される予定である。

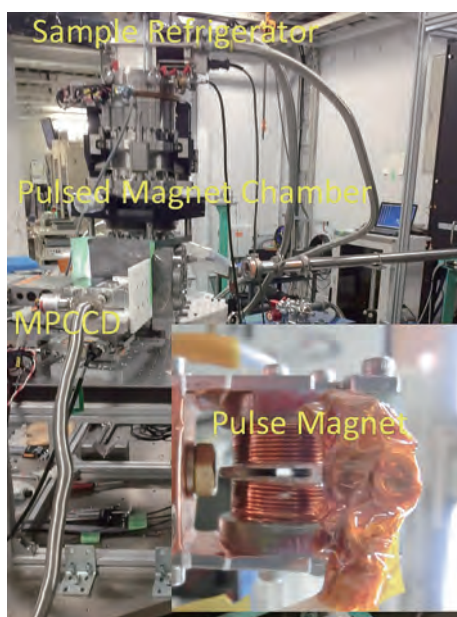


図2 SACLAのXFELにおける強磁場実験のセットアップ。試料とコイルを独立した冷凍機で冷却し、スプリット磁石では40テスラまでの、ソレノイドコイルを利用者後方散乱では50テスラまでの回折実験が可能である。

URu₂Si₂の強磁場相

これまで、Rhドーピング系の強磁場相について、系統的中性子回折実験が行われ、Rh濃度が3%付近を

境に高濃度側では、磁気波数(2/3 0 0)の面内整合変調構造が、それより低濃度側では、磁気波数(~0.6 0 0)の非整合構造(スピン密度波的な変調構造)が見出されることが判ってきた[3, 4]。また、非整合構造の波数はRhドーピング量に応じて、変化することも見出されている。これらの結果を踏まえると、強磁場相ではRhドーピングにより、非整合-整合の磁気転移が起こっていることになる。興味深い点として、この転移とほぼ呼応する形で、低磁場の隠れた秩序相が消滅することである。憶測を逞しくすれば、非整合磁気秩序と隠れた秩序は、競合する状態ではあるが、両者は、同一の電子状態に根ざしたものであるという見方も成り立つ。この考え方が妥当かどうかを検証するには、これらの相転移における構造変化を調べる事が必要であり、XFEL実験は、この点で鍵になると言える。

なお、金研は、今年度から国際共同利用共同研究拠点に認定された。このプログラムを利用すると、我々が海外で展開している実験装置を、共同利用制度を通して使う事が可能となる。その他、我々のグループでは、NMR、熱測定など、金研の定常強磁場を利用した多様な研究を展開しているので、興味を持たれた方は、ぜひご相談頂きたい。

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] R. Toft-Petersen *et al.*, Phys. Rev. B **95**(2017) 064421.
[2] S. Gerber *et al.*, Science **350**, 949 (2015)
[3] K. Kuwahara, K. *et al.* Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 216406.

[4] W. Knafo *et al.* NATURE COMMUNICATIONS (2016) 13075



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

この度は公募研究に採択していただき、どうもありがとうございます。残り2年間、よろしくお願いいたします。これまで主に第一原理計算や群論を用いて超伝導の理論研究を行ってきました。昨年度までの研究で、東大物工(助教)に異動された野本拓也さん、および、同じく公募班の班員であった首都大学東京(准教授)の服部一匡さんとの共同研究で、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多極子ペアの可能性[1-4]について研究できました。その際、本領域プロジェクトから多大なサポートを受けました。この場をお借りして感謝いたします。

このような分類学は、京大理の柳瀬さんを中心にさらに系統的な研究[5,6]がなされ、多軌道超伝導体の分類学という観点からはずいぶんと発展したと感じます。では、本公募研究において、何を中心に据えて研究しようとしているかについてですが、方向性としてはタイトル通りその発展で、一つにはこれまでに提案した多極子超伝導体の超伝導状態における素励起についての系統的な研究です。多極子伝導系で見られる多彩な超伝導体の素励起の構造を調べ、新奇な非BCS超伝導体の可能性を探るという切り口が考えられます。

しかし、より重きを置きたいのは、やはり既存の重い電子系超伝導体を解決に導くということです。実験的には、装置開発が進み、解析手法が洗練されたことで、豊富な情報が手に入るようになってきました

が、その結果について考察する際における理論サイドからの情報がまだまだだと痛感します(私だけ?)。実際、ウラン系はもとより、セリウム系超伝導でさえ、最近まで d 波だと信じて疑わなかったCeCu₂Si₂がフルギャップ s 波であったという話[7]まで出ています。ご存知のように、重い電子系超伝導体は電子相関が強く、バンドも複雑であるため、その解析が難しいわけですが、さすがにそろそろ解決すべきだと感じています。

最近では、理論的な道具立てもそろってきており、 d 電子系を中心に今や世界標準となりつつあるワニエ関数を用いたモデル計算で超伝導の議論が進んでいます。私自身も、URu₂Si₂の研究[8]に代表されるように、同様の研究手法で、これまで第一原理計算に基づいた遍歴多極子についての解析を行ってきました。重い電子系ですので、当然、電子相関が非常に強いわけですが、フェルミ液体描像が成り立つのであれば、LDAやGGAによるバンド計算でも低エネルギー励起の構造は正しく再現できると期待して計算を進めるわけです。この際重要なのは、当然ながらフェルミ面の構造がきちんと実験を再現できていることですが、実験的にフェルミ面の全貌が明らかになっているケースは稀ですので、結局、どこまでうまく表現できており、どこからうまくいかないかについては、その他の情報との比較が必要になります。そうすると、 f 電子特有の局在的な側面の情報が多いので、結局、具体的な物質を対象として電子相関を

[1] T. Nomoto, K. Hattori, H. Ikeda, Phys. Rev. B **94**, 224503 (2016).
 [2] T. Nomoto, H. Ikeda, Phys. Rev. Lett. **117**, 217002 (2016).
 [3] T. Nomoto, H. Ikeda, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 023703 (2017).

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

真面目に扱い、その結果を通して判断するしかないという結論に至ります。

その意味では、海外を中心に発展してきたLDA+DMFT法は一つの具体的な計算手法であり、十分に検討の価値があります。LDA+DMFT法が万能とも思いませんが、まずは海外勢に追いつかないことには同じ土俵で議論できないですし、国内からももっと発信すべきであるとの考えから、最近、東北大金研(准教授)の鈴木通人さんや埼玉大理工(助教)の星野晋太郎さんのお力添えを頂きながら、第一原理計算の計算手法の改良、特に、LDA+DMFT法の独自コードの開発に力を入れています。実際に計算を進めてみて感じたのは、一口にLDA+DMFT法と言っても、実際の計算アルゴリズムには曖昧な部分があり、海外の各研究チームによっても取り扱い方が異なっており、得手不得手があることがはっきりしてきました。特に、DMFTの自己エネルギーの取り込みにより波動関数に変化するわけですが、その際、電荷分布の変化を自己無撞着に取り込むことが非常に重要であることが理解できたので、現在は、この辺りをきちんと詰めながら第一原理計算手法の発展に貢献していこうと考えています。現在、超伝導・多極子とも分類学はずいぶん整理されたように思えますので、今後は具体的な物質における電子状態の情報が必要になると考えられます。そのときに、すぐにお答えできるような第一原理計算手法の

開発(実験で言う所の装置開発)が必要だと考えています。

また最近、新奇性とは対極的ですが、高い転移温度を持つ超伝導体の物質探索に興味を持つ学生も多く、我々のグループでも遺伝的アルゴリズムを利用したUSPEXによる結晶探索を行なっています。ちなみに添付の図1は今年卒業の修士2年の学生(岩井君)が YbH_x で高温超伝導を探索したときのデータです。何かお探しの際にはひと声かけていただければ幸いです。では、2年間という短い間ですが、皆様と活発に議論できることを楽しみにしています。どうぞよろしくお願いいたします。

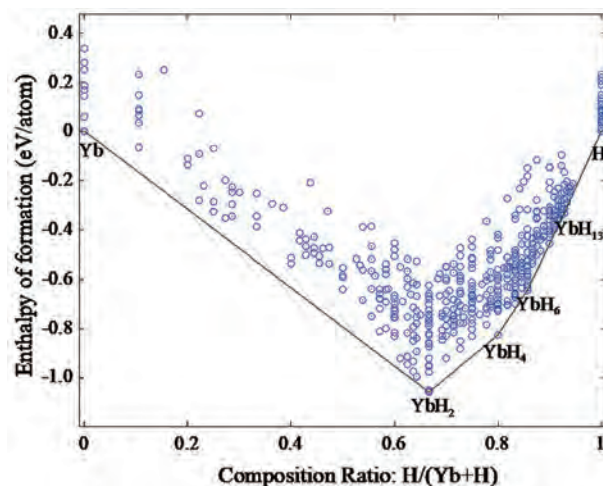


図1. 200GPaにおける YbH_x の物質探索。

[5] S. Kobayashi, S. Sumita, Y. Yanase, M. Sato, Phys. Rev. B **97**, 180504(R) (2018).

[6] S. Sumita, Y. Yanase, Phys. Rev. B **97**, 134512 (2018).

[7] 竹中崇了, 芝内孝禎, 常盤欣文, 松田祐司, 日本物理学会誌 **73**, 575 (2018).

[8] H. Ikeda, M.-T. Suzuki, R. Arita, T. Takimoto, T. Shibuchi, Y. Matsuda, Nat. Phys. **8**, 528 (2012).



動的平均場法に基づく 多極子秩序の微視的理論

大槻 純也

岡山大学異分野基礎科学研究所 准教授

品岡 寛

埼玉大学大学院理工学研究科
助教

A01班からC01班に移って再び公募研究に採択していただき、引き続きJ-Physicsに関わることができて嬉しく思います。また、私事ではありますが、2018年11月から岡山大学に異動しました。新しい班、新しい環境で成果をあげる意気込みでおります。

さて、本公募研究では、この新学術領域の主題である多極子秩序に関して、「王道」とは異なる理論的アプローチで取り組みたいと思っております。王道とは、言うまでもなく、CeB₆の一連の研究で確立したような点群の既約表現に基づく理論のことです。例えば、ある四極子秩序が起こっていると仮定すると、磁場をかけた時にどちらの方向に磁化が誘起されるか、というようなことが分かります。これを逆に使えば、実験で観測された誘起磁化の方向から秩序変数を絞り込むことができ、複数の実験から候補を一つに決定できます。

多極子秩序変数の同定法に関しては、上記のような現象論が威力を発揮し、その手順は20年程におよぶ研究の積み重ねによってほぼ確立していると言えます。一方、なぜそのような秩序が起こるのかという疑問については、まだ十分な答えが出ていません。伝導電子を介したRKKY相互作用が起源である、という基本的な理解はありますが、具体的に、ある物質である秩序が起こることを、物質固有の性質、例えば、エネルギー分散やf電子の結晶場準位などと結び付けて理解するまでには至っていません。これが可能となった時、多極子秩序の理解が一步進み、多極子秩序物質の設計などの新しい可能性が拓けてくると思います。

微視的理論によって多極子秩序を導出するには、多極子

自由度を持つf電子だけでなく、伝導電子も含めて扱う必要があります。この広い模型から伝導電子の自由度を消去してf電子のみを残すとRKKY相互作用が導かれます。一方、伝導電子の自由度が加わることで、f電子だけでは起こらない秩序状態も可能となります。これがC01班のテーマである「拡張多極子」ですが、さらに多体効果、すなわち近藤効果を考慮することで、面白い基底状態も出現します。

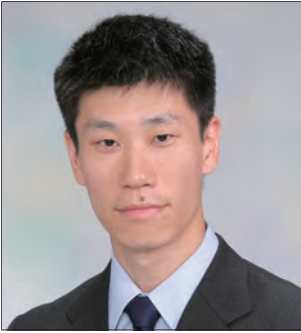
充填スクッテルダイト化合物PrFe₄P₁₂のスカラー秩序状態は、従来の局在描像では説明のつかない状態で、近藤効果を考慮して初めて可能となります[1]。そして注目すべき点は、この物質が、隠れた秩序として長年謎であり続けているURu₂Si₂と非常によく似た性質を持っている点です[2]。このことからURu₂Si₂の解明には従来の多極子理論の枠を超えた理論が必要であると期待され、特に、近藤効果が重要な役割を果たす「非従来型」多極子秩序の可能性も密かに期待されるところです。その理論的検証も微視的アプローチの目指すところです。

最後に、成果物の共有について触れてこの稿を締めたいと思います。現在ではバンド計算プログラムが数多く公開され、少し勉強すれば誰でも計算できるようになっています。それと同様、多体効果を考慮した電子状態計算(LDA+DMFT法)も、近い将来、誰でも行えるようになると思います。そのとき中心となるのは、いま地道に基盤を作っている人たちです。既に公開しているプログラムDCore[3]を足掛かりに、プロジェクトの本流とは別に、将来の布石を敷いておくことも重要な仕事であると考えています。

[1] S. Hoshino, J. Otsuki, Y. Kuramoto, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 033703 (2011).

[2] Y. Kuramoto, H. Kusunose, A. Kiss, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 072001 (2009).

[3] <https://github.com/issp-center-dev/DCore>



梯子型鉄系化合物BaFe₂Se₃における奇パリティ多極子秩序

大串 研也

東北大学大学院理学研究科 教授

今泉 聖司

東北大学大学院理学研究科
修士課程2年

青山 拓也

東北大学大学院理学研究科
助教

松原 正和

東北大学大学院理学研究科
准教授

私たちは、奇パリティ多極子秩序に興味をもって研究を進めています。奇パリティ多極子秩序の典型例としては、電気双極子の強制的秩序に対応する強誘電秩序が挙げられます。その研究の蓄積は膨大であり、強誘電秩序を安定化させる微視的機構はよく理解されています。では、思考実験として絶縁体である強誘電体へキャリアを注入した場合を考えてみましょう。伝導電子が電気双極子を遮蔽することで、強誘電秩序が失われることが想像されます。しかしながら実際には金属においても強誘電秩序が生じることが、最近の研究により分かっています[1]。私たちの研究目的は、比較的伝導性の大きな物質において強誘電秩序を探索すること、そしてその発現機構を微視的に解明することです。

私たちの着目した物質は、梯子型鉄系化合物BaFe₂Se₃です。そもそもの研究の動機付けは、新超伝導相の探索にありました。今日まで多数の鉄系超伝導体が発見されてきましたが、その全ての物質はFeの正方格子を含むという共通点がありました。そうした状況に風穴をあけるべく、Feが梯子格子を組む硫化BaFe₂Se₃の物性解明を進めてきました。試行錯誤を重ねた結果、圧力下で超伝導相を発見するに至りました[2, 3]。その後、セレン化合物BaFe₂Se₃に

研究を展開しました。BaFe₂Se₃も高压下で超伝導を示すことがわかっていますが[4]、常圧では250 K以下で図1に示すようなブロック型の反強磁性秩序を示します。なぜバイパータイトの梯子格子で、複雑なブロック型反強磁性秩序が生じるのかということに興味をもたれる所です。これは、多軌道ハバード模型の範疇で理解できることが理論的に解明されています[5]。むしろ私たちが不思議に感じたのは、ブロック型反強磁性秩序が当時知られていた結晶構造の空間群 $Pnma$ における単一の規約表現で記述できないことでした。これは、反強磁性相転移が2次的であることと整合しません。そこで疑ったのは、実は結晶構造はより低い対称性をもっているのではないかということです。先行研究によるとDSC信号の400 K付近にアノマリーがあり[6]、これが構造相転移に対応すると考えました。

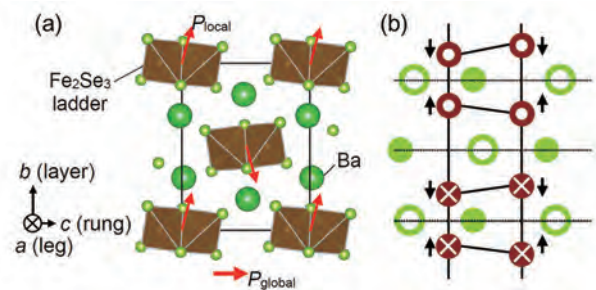


図1. BaFe₂Se₃の結晶構造と磁気構造。

[1] Y. Shi *et al.*, Nat. Mater. **12**, 1024 (2013).

[2] H. Takahashi *et al.*, Nat. Mater. **14**, 1008 (2015).

[3] 山内徹, 高橋博樹, 南部雄亮, 佐藤卓, 平田靖透, 大串研也, 固体物理, **54**, 27 (2019).

[4] J. Ying, *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 241109(R) (2017).

通常なら構造解析をやり直せばよいということになりますが、X線回折実験の範疇では空間群 $Pnma$ から逸脱している証拠は得られませんでした。そこで、400 Kにおける相転移において、電子系の不安定性により僅かな構造歪が誘起されていると考えました。また、理論的に $BaFe_2Se_3$ のブロック型反強磁性相において空間反転対称性が破れている可能性が指摘されていることにも注目しました[7]。これらのことを考慮して、空間反転対称性の破れを検知する有力な手法である非線形光学応答の一種である第二高調波発生の測定を行いました[8]。実験の詳細は省きますが、図2に示すように400 K以下で第二高調波発生のシグナルを観測しました。第二高調波発生強度の偏光依存性を詳細に解析することで点群が $mm2$ であることが求まり、また中性子回折データを再検討することで室温における結晶構造が空間群 $Pmn2_1$ に属することを明らかにしました。

得られた結晶構造は図1のようなものであり、低温におけるブロック型磁気秩序を安定化させるような構造歪が導入されています。その結果、ブロック型磁気構造は、空間群 $Pmn2_1$ の単一の規約表現で表せることになり、2次的な反強磁性相転移と整合することがわかりました。結晶構造の最大の特徴は、空間群 $Pmn2_1$ においては空間反転対称性が破れていることであり、対称性の観点からは電気双極子がマクロに有限になることが期待されることです。つまり $BaFe_2Se_3$ は強誘電秩序を示すことになります。残念ながら $BaFe_2Se_3$ は電気抵抗率の小さな絶縁体であり、秩序化した電気双極子の大きさを実験的に見積もることができません。しかし、逆に言えば比較的伝導性の

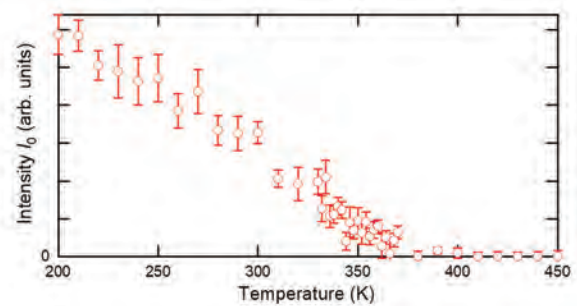


図 2. $BaFe_2Se_3$ における第二高調波発生強度の温度依存性。

大きな物質において強誘電秩序が生じているわけで興味深い現象といえます。なぜこうした強誘電秩序が生じているのかという微視的機構に関しては、低温の磁気構造がブロック型であることを反映してマルチフェロイックス分野で知られるmagnetostriction機構を通して結晶構造が歪んでいると考えています。しかしながら、本来ならば250 Kの反強磁性相転移とともに構造が歪めばよいのに、400 Kというはるかに高温で構造相転移が生じていることはとても不思議な点です。低次元系におけるスピン系と格子系の分離を示唆しているのかもしれませんが。

梯子型鉄系化合物 $BaFe_2Se_3$ は新しい奇パリティ多極子秩序系であり、その比較的高い伝導性から新奇な輸送現象発現の格好の舞台であると考えています。低次元系ではドメイン壁に相当するソリトンが伝導を担うことがあり、それが風変りな輸送現象を導く可能性があるのです。その観測のためにも、奇パリティ多極子ドメインの観察は重要な課題です。また、高圧下で発現する超伝導相との関連も興味深く、奇パリティ多極子揺らぎが超伝導相にどのような影響を与えているのかに興味を持っています。これらの課題に関して、本新学術領域の皆様と議論できることを期待しています。

[5] Q. Luo *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 024404 (2013).

[6] V. Svitlyk *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **25**, 315403 (2013).

[7] S. Dong *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 187204 (2014).

[8] T. Aoyama *et al.*, submitted.



3d電子系における 奇パリティ磁気多極子秩序に由来する 電気磁気応答と量子伝導現象

阿部 伸行

東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教

有馬 孝尚

東京大学

徳永 祐介

東京大学

前半の公募研究から引き続き公募研究に採択いただき、ありがとうございます。昨年度まではD01班の公募研究として物質探索の研究を進めてまいりましたが、計測に力を入れてみたい物質がいくつか現れてきましたので、C01班に公募研究を申し込ませていただきました。今後も学生とともに研究を進めてまいります。どうぞよろしくお願いいたします。

研究対象は主に3d遷移金属化合物を中心に誘電体から金属まで、あまり対象を絞り込みすぎずに面白そうな現象が現れないかと探索してきました。物質探索を進める上での指針として、まずは点群があり、空間群があります。J-Physicsの会議に参加するといただけるサッカーボールと点群のステレオ投影図がまとめられたクリアファイルを片手に、色々考えてデータベースを検索します。自分で結晶を作ることだけではなく、試料を提供していただいて研究を進める場合もあります。J-Physics内でもC01計画班の高阪さんからキラル磁性体CsCuCl₃のホモキラル結晶を提供していただき[1]、磁気キラル二色性の研究にも取り組んできました[2]。そのような経緯ですので、D01班とC01班を行ったり来たりするのも私（や私が所属する有馬徳永研究室）らしいのかなと思っています。

本研究課題では、引き続き3d遷移金属化合物を対象として、局所的な反転対称性の破れに伴う物性応答の観測を目的としています。対象物質としてはキラル磁性体やハニカム構造を持つ磁性体であり、誘電体であれば電気磁気効果、電気伝導性があれば

磁気伝導現象、磁気キラル二色性などの方向二色性の検出とドメイン観察、などの手法によって研究を進めていきたいと考えています。

私自身や所属研究室では最近ではキラルな無機化合物における物性応答を調べていることが多いです。キラル磁性体の面白さとしては、結晶構造の空間反転対称性の破れと、磁化の存在による時間反転対称性の破れが同時に生じていることであり、対称性の複合的な破れに起因する物性が生じ得る事だと思います。このことは奇パリティ磁気多極子における電気磁気効果の発現のように、新しい物性の起源にもなっています。実際にキラル磁性体ではスキルミオン格子や、磁気ソリトン格子などの研究が、日本の研究者がリードしつつ世界中で行われております。スキルミオン格子や磁気ソリトン格子は電子顕微鏡や量子ビームの小角散乱によって観測されますが、私自身はその技術を持ち合わせておりませんので、もう少しマクロな物性応答を期待して研究を進めております。その一例が磁気キラル二色性であり電気磁気効果の観測です。

磁気キラル二色性[3]は物質の持つキラリティ、磁化あるいは磁場の向き、そして光などの電磁波の進行する向きに依存して吸収係数が変化する現象です。一方で結晶はもともと異方性を持つことが多いので、例えば線二色性などとファラデー効果が重なると、同様な吸収係数の方向依存性が生じ得ます。このため物質本来の磁気キラル二色性を検出するた

めには、結晶の持つ光学異方性や光の偏光にも十分注意する必要があります。先に述べましたCsCuCl₃は六方晶でありab面内には光学異方性が生じないため、光の進行方向と磁場の印加方向を特殊軸のc軸とすることで、磁気キラル二色性を観測することができました。

CsCuCl₃はキラルな空間群に属する物質でしたが、先程の点群の表を眺めていると、極性（電気分極）を持つもの、キラリティを持つもの、どちらも持たないもの、そして極性かつキラルなものがあります。最近では極性かつキラルな点群に属する結晶構造を持つ磁性体に着目して、強磁場下での電気磁気効果の測定や、磁気光学効果、量子ビームを用いた磁気構造の研究などを進めております。またこのような物質では、極性のドメイン、キラリティのドメイン、磁気秩序のドメインがそれぞれどのように結合しているかも自明ではありませんので、ドメイン観察と操作の研究にも着手したいと考えております。

もう一つの対象物質であるハニカム構造を持つ磁性体ですが、最近ではCo₄Nb₂O₉という物質で電気磁気効果と電気分極の磁場による操作について報告しました[4]。この物質は三方晶に属しており、Co²⁺に着目しますと上下に折れ曲がったハニカム構造を形成しており、ここに反強磁性的な磁気構造が形成されると反転対称性が破れるため電気磁気効果が発現します。実際の磁気構造も隣接したCo²⁺スピンは反強磁性的に配列し電気分極がab面内に現れます

が、Co²⁺スピンはab面内では磁気異方性は無いように、磁場をab面内で走査すると付随して電気分極も回転するという現象が現れました。この応答についてはD01計画班の楠瀬先生や柳さんが理論的に調べられております[5]。現在は同様の上下に折れ曲がったハニカム構造を持つ磁性誘電体や磁性半導体を対象として研究を進めております。

このような形で2年間研究を進めてまいりますので、どうぞよろしくお願いいたします。

また、研究の他にも今年度は本領域にご支援いただき博士課程の学生をドイツに派遣することができました。その際には播磨代表をはじめとして関係のみなさまに大変お世話になりました。学生が成長できる機会を与えていただけることも本領域の素晴らしい点だと思っております。この場をお借りしてお礼申し上げます。

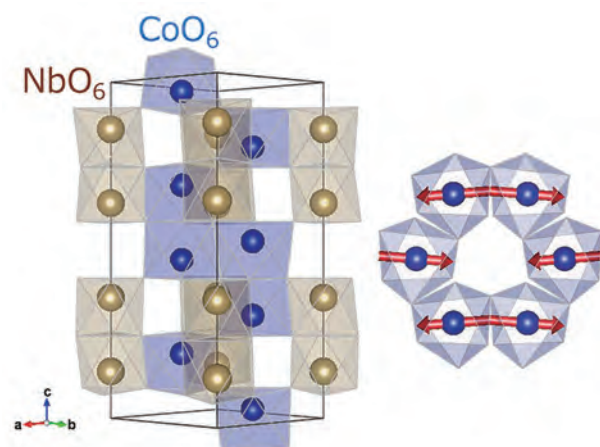
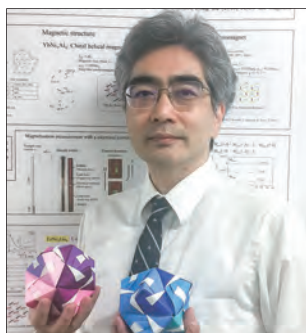


図 . 三方晶 Co₄Nb₂O₉ の結晶構造と磁気構造

[1] Y. Kousaka *et al.*, Phys. Rev. Materials **1**, 071402(R) (2017).
[2] N. Nakagawa *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 121102(R) (2017).
[3] G. L. J. A. Rikken and E. Raupach, Nature (London) **390**, 494 (1997).

[4] N. D. Khanh *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 094434 (2017).
[5] Y. Yanagi *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 020404(R) (2018).



What Alice Found There

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
助教

私は奇パリティ拡張多極子秩序による電気磁気 (ME) 効果の観測を目的に、キラル結晶構造を持つ YbNi_3Al_9 [1] を出発点として研究を進めています。まだ成果には至っていませんが、本稿ではキラリティについて説明しながら、挑戦していることを紹介します。

表題の What Alice Found There は、Lewis Carroll の『Through the Looking-Glass, and What Alice Found There (邦題: 鏡の国のアリス)』(1871年) の後ろ半分を借りてきました[2]。Looking-Glass は鏡 (mirror) の古語で、アリスは鏡の中で空間や時間が反転した世界を体験します。私たちは J-Physics において空間や時間の反転対称が破れた世界に興味をもっていますから、アリスの追体験をしているわけです。アリスに追いつくには、アリスがそうしたように、逆向きに走ってみるとか、新しい挑戦が必要となるでしょう。

アリスは鏡に入りながら "Perhaps Looking-glass milk isn't good to drink." とつぶやきます。アミノ酸や糖類は鏡像体 (右と左の分子) があり、回転させてもその構造は一致せず、その性質も異なります。これをキラリティがあると言います。私たちはアミノ酸や糖類の左右どちらかの分子を利用して生きていますから、鏡写しのミルクの味は変わってしまうに違いありません。Lewis Carroll は数学者で『Euclid and his Modern Rivals』(1879年) という本も書いていますから、幾何学に詳しかったのでしょう。キラリティは数理科学と物質の出会いの場でもあります。

さて、結晶構造がキラリティをもつ場合には、ME

効果も生じます。私が研究している YbNi_3Al_9 は空間群 $R32$ (#155) の ErNi_3Al_9 型構造[3]を持ちます。 $R32$ はソッケ群 (Sohncke groups) と呼ばれる空間群に属し、結晶の対称操作には回転と並進しかなく、結晶構造はキラリティを持ちます[4]。 $R32$ の対称操作の配置を International Tables for Crystallography Vol. A で見ると、c 軸に平行な右回りと左回りの3回らせん軸が60度おきに交互にあることがわかります。 YbNi_3Al_9 の場合には、例えば、Ni イオンは一般位置にあり、3回の右らせんか左らせんで結晶中に配列しています。つまり、右結晶と左結晶が存在します。磁性を担っている Yb は主軸 (3回軸) 上にあり、らせんの配置とは言えません。なお、ややこしいですが、 $R32$ は空間群としてアキラルです。 $R32$ をキラルな空間群と言うと誤りになるので注意してください[4]。

キラルな結晶構造を反映して、 YbNi_3Al_9 は 3.4 K でキラルらせん秩序を示します。面白いことに Ni を Cu で置換すると磁気相互作用が増大し、キラル磁性の性質が顕著に観測できます[5]。最近、らせん軸に垂直に磁場を加えると Chiral-soliton lattice (CSL) と呼ばれるキラル磁性体に特有の磁気構造が発現することが証明されました[6]。CSL の存在が立証された物質はまだ世界で数例しかありません。

J-Physics の目標は多極子伝導の物理の開拓ですが、私の研究の第一の目標は、キラル金属磁性体における ME 効果としての電流誘起磁気現象の観測です。 $R32$ の点群は D_3 で、線形な ME テンソルは

$$A_{R32} = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22}(=a_{11}) & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

となりますから[8]、電流 I （電場 E ）を加えた向きに磁化 M が現れるME効果が期待されます（ $M=AI$ ）。

現在、磁気秩序により対称性が $R32$ から $C2$ （あるいは $C2'$ ）にかわる ErNi_3Ga_9 [8]と DyNi_3Ga_9 [9]に注目しています。 $C2$ になればMEテンソルは

$$A_{C2} = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

に変わり非対角項が現れるので、磁気秩序にともなって電流に垂直な磁化が生じる場合がでてきます。これまでに ErNi_3Ga_9 において電流によって誘起された磁化の観測に成功しましたが、ジュール熱を抑え込むことが難しく格闘中です。MEテンソルを正確に反映した効果が現れていることを立証したいと思っています。

次の挑戦は、 UNi_4B [10]のような奇パリティ拡張多極子によるME効果の観測です。 YbNi_3Al_9 では磁性を担うYbイオンがハニカム構造を形成していますが、同じハニカム構造を持つアキラルな構造の希土類化合物 $\text{R}_2\text{Pt}_6\text{Ga}_{15}$ ($R=\text{La-Lu}$) (空間群： $P\bar{6}m2$, #187) [11]

を合成しました。結晶は反転対称を持っていますが、希土類イオンの位置には反転中心がない構造が実現しています。次に期待することは、ハニカム構造上の磁気秩序が奇パリティ拡張多極子秩序となる状態の実現です。 $\text{R}_2\text{Pt}_6\text{Ga}_{15}$ は全ての希土類元素について作ることができ、さまざまな磁気構造をとりますから、可能性はあると考えています。奇パリティ拡張多極子によるME効果が現れるかどうか検証します。

奇パリティ拡張多極子秩序が期待される構造を持つ新物質の探索も行っています。これまでに反転中心のない構造が交互に積層した正方晶 YbNi_2Si_3 ($I4/mmm$, #139)とYbのジグザグ鎖を持つ $\text{Yb}_2\text{Rh}_3\text{Si}_5$ ($C2/c$, #15)を発見しました。いずれもYbサイトでは反転対称がありません。これらの物質の基底状態の観測を進めていますが、紙面が尽きてしまいました。こちらの紹介はまた別の機会にしたいと思います。

最後になりましたが、共同研究者の方々にお礼申し上げます。また、ここに書いた事柄の多くがトピカルミーティングなどを通してJ-Physicsの活動の中で学んだことです。みなさまにお礼申し上げます。反転中心のない結晶の世界で私たちは何を見出すことができるでしょうか。楽しみましょう。

[1] T. Yamashita, R. Miyazaki, Y. Aoki, S. Ohara, *JPSJ*, **81**, 034705 (2012).

[2] 高阪勇輔氏の講演を参考にAliceの話をキラリティの導入に使いました。

[3] R. E. Gladyshevskii, K. Cenual, H. D. Flack, E. Parthé, *Acta Cryst.* **B49**, 468 (1993).

[4] 例えば、ネスボロ マッシモ, 日本結晶学会誌, **59**, 39 (2017).などが簡潔で参考になります。

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

[6] T. Matsumura, Y. Kita, K. Kubo, Y. Yoshikawa, S. Michimura, T. Inami, Y. Kousaka, K. Inoue, S. Ohara, *JPSJ*, **86**, 124702 (2017).

[7] J. -P. Rivera, *Eur. Phys. J. B* **71**, 299-313 (2009).

[8] H. Ninomiya, T. Sato, Y. Matsumoto, T. Moyoshi, A. Nakao, K. Ohishi, Y. Kousaka, J. Akimitsu, K. Inoue, S. Ohara, *Physica B*, **536**, 392 (2017).

[9] H. Ninomiya, Y. Matsumoto, S. Nakamura, Y. Kono, S. Kittaka, T. Sakakibara, K. Inoue, S. Ohara, *JPSJ*, **86**, 124704 (2017).

[10] H. Saito, K. Uenishi, N. Miura, C. Tabata, H. Hidaka, T. Yanagisawa, H. Amitsuka, *JPSJ*, **87**, 033702 (2018).

[11] Y. Matsumoto, T. Ueda, S. Ohara, *J. Phys. Conf. Series*, **683**, 012035 (2016).



Emergent electronic phenomena in hybrid f-/p-electron molecular materials

Professor **Kosmas Prassides**

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

Yasuhiro Takabayashi

WPI-AIMR,
Tohoku University

Zhanqiang Xu

WPI-AIMR,
Tohoku University

Naoya Yoshikane

Osaka Prefecture University

Naoki Tarutani

Osaka Prefecture University

A most prominent manifestation of many-body electron interactions is provided by f-electron systems in which the correlations are so strong that the quasiparticle effective mass becomes orders of magnitude higher than the bare electron mass. This leads to intermediate valence, Kondo, and heavy fermion systems with complex electronic and magnetic behavior including unconventional superconductivity, quantum critical phenomena, and multipole order. The electronic properties are determined by the unconventional strongly correlated character of the cationic rare-earth sublattice alone as the anionic sublattices comprise closed-shells units and are electronically inactive. Such examples are provided by intermediate valence solids (SmS), which show electronically-driven valence changes with changes in external stimuli (temperature, pressure). These have been rationalized phenomenologically in terms of the valence fluctuation model of two nearly-degenerate electronic configurations, $4f^n5d^0$ and $4f^{n-1}5d^1$ (or theoretically by the one-impurity Anderson model). Some of these systems (SmB₆, YbB₁₂) have been also identified as candidates for topological insulators.

This contrasts sharply with the strongly correlated p-electron fullerene solids in which strong correlations are exclusively associated with the

electronically-active anionic C₆₀ sublattice. The question is then: can one fuse the two behaviors and couple both electronically-active f-electron and fullerene electronic structures? Evidence that this was feasible came from our past work on rare-earth fullerides. Selected systems, such as intermediate valence Sm_{2.75}C₆₀ and Yb_{2.75}C₆₀ were shown to exhibit both temperature- and pressure-induced valence transitions accompanied by drastic changes in the lattice metrics and the conducting properties [1-3].

This important question created the opportunity to synthesize and study new families of hybrid molecular-based Kondo insulators and heavy fermions with strong coupling between charge, lattice, and spin degrees of freedom. Such fusion is being pursued within J-Physics and is now leading to a new family of hybrid f-/p-electron molecular materials with unpredictable and theoretically challenging physics. These f-electron fullerides have properties intrinsically unattainable in f-electron systems with closed shell anions (like S²⁻) and in fullerides with closed shell cations (like K⁺), and entirely novel phenomena are expected. The project has two inter-related parts:

- establish a robust chemical methodology to synthesize new hybrid 4f, 5f-/p-electron fullerides, and
- use chemical and physical pressure to control

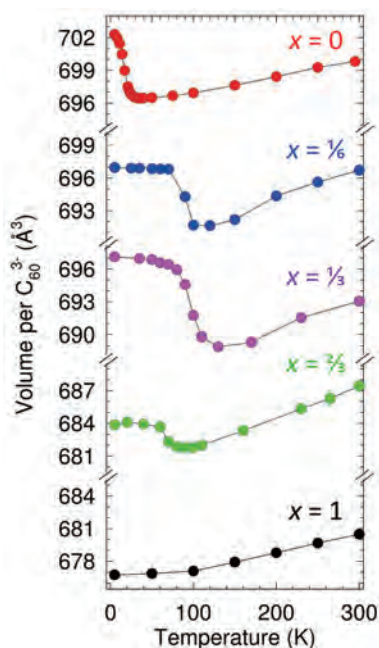


Figure 1. Temperature-induced valence transitions in the family of rare-earth fullerides, $(\text{Sm}_{1-x}\text{Ca}_x)_{2.75}\text{C}_{60}$ ($0 \leq x \leq 1$) probed by synchrotron X-ray powder diffraction.

functionality and study structure-property-composition relationships.

We made significant advances within J-Physics in the past two years and established robust routes to isolate the ternary systems, $(\text{Sm}_{1-x}\text{Ca}_x)_{2.75}\text{C}_{60}$ ($0 \leq x \leq 1$) – 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 $\text{Ca}_{2.75}\text{C}_{60}$ (Fig. 1). 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 and elevated pressures using element-specific spectroscopic techniques (Fig. 2). What is intriguing here is that, while the response to pressure seems conventional and in analogy with that of SmS (sharp increase in the rare-earth valence with pressure), the temperature response is non-monotonic: on cooling, there is a continuous increase in valence, followed by a sharp

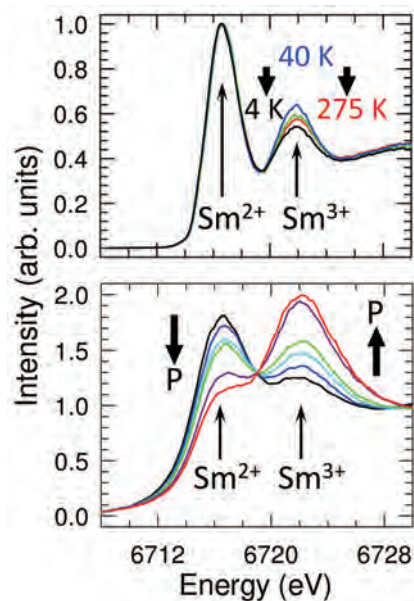


Figure 2. Temperature- (top) and pressure-induced (bottom) valence transitions in $\text{Sm}_{2.75}\text{C}_{60}$ probed by synchrotron partial fluorescence yield X-ray absorption spectroscopy (PFY-XAS).

collapse at low temperatures, indicative of the non-innocent nature of the C_{60} sublattice, which can accept /donate electrons from/to the rare-earth $4f/5d$ bands leading to a complex electronic behavior.

The research members who contribute to these research activities are Assistant Professors Yasuhiro Takabayashi and Naoki Tarutani, Research Associate Zhanqiang Xu, and Master student Naoya Yoshikane. The research activity of our team consists of two integrated components: (i) establishing reproducible synthetic protocols for new materials discovery and (ii) accessing new electronic ground states through advanced structural (synchrotron X-ray/neutron diffraction) and spectroscopic (XANES, RIXS) studies and physical property (transport, magnetism) measurements of the new materials following systematic changes in chemical features and external physical parameters such as pressure.

- [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).



空間反転対称性を「破る」 5d電子系の新物質開拓

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 大学院理学研究科
助教

山影 相

名古屋大学 大学院理学研究科
助教

名古屋大学の岡本佳比古です。この度はJ-Physicsの公募研究に採択していただき、ありがとうございます。引き続き2年間、よろしくお願いいたします。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す。皆さんよくご存じの通り、空間反転対称性は結晶固体の物性を左右する最も重要な対称性の一つです。例えば強誘電体では空間反転対称性が破れることにより自発分極が生じますし、超伝導体におけるクーパー対の性質は空間反転対称性の有無によって全く異なります。グラファイトやダイヤモンドに現れる sp^2 や sp^3 といった伝統的な混成軌道の考え方から、ワイル半金属のような現代的なトポロジカル物性に至るまで、空間反転対称性は固体物理学のあらゆる場面に現れます。

空間反転対称性が破れることが、電子物性において際立った形で現れると期待される系の一つが、かなり強いスピン軌道結合とそこそ強い電子相関が共存しうる5d電子系です。5d電子系はスピンと軌道の自由度が結合した全角運動量によって物性が記述されうる舞台ですし、空間反転対称性が破れた5d電子系では電子バンドに大きなスピン分裂が現れる可能性があります。しかし、現状では空間反転対称性の破れの効果が確立した5d電子系物質は、U化合物やCe化合物を擁するf電子系と比べて少ないです。例えば、CePt₃Siにおける巨大な上部臨界磁場を

伴う超伝導のような、空間反転対称性の破れの効果が物性にわかり易くはっきりと現れる物質はほとんど知られていません。本公募研究では、空間反転対称性の破れが明らかな影響をもつ新しい5d電子物性を発見するため、ただ単に空間反転対称性をもたないのではなく、次に示すより特徴的な二通りの形で空間反転対称性を「破る」新物質を開拓します。

一つは、温度や圧力を変化させることで空間反転対称性を破る相転移を示す5d電子系物質の開拓です。ある物質の物性は、その物質のもつ様々な要素が複雑に絡み合う結果生じます。そのため、空間反転対称性が破れた物質において興味深い電子物性が発現したとしても、その電子物性にとって空間反転対称性の破れがどの程度寄与しているかは自明ではないと思います。その点、空間反転対称性を破るような相転移を示す物質では、相転移前後の物性を比較することにより、破れの効果をかなり正確に抽出できるのではないかと期待されます。現状では、このような相転移を示す5d電子系物質は、Cd₂Re₂O₇やCsW₂O₆などに限られます。両物質はともにパイロクロア構造をもちます。図1に示したパイロクロア構造やカゴメ構造をもつ物質は、高対称であるにもかかわらず反転中心をもつサイトが1種類しかないこと（例えば空間群 $Fd-3m$ では16c/16dサイトだけが反転中心をもつ）、バンドが平坦になりやすいため電子構造に不安定性が現れうること、正四面体/正三角形の大きさが交替する「ブリージング転移」が起こり

うることから、空間反転対称性を破る相転移を示す舞台として有望です。本公募研究では、このような観点に注目して物質開拓を行い、空間反転対称性を破る相転移を示す5d電子系物質の発見を目指します。

もう一つは、結晶全体では空間反転対称性を持ちますが、原子位置において局所的に空間反転対称性を破る「拡張ジグザグ構造」をもつ5d電子系物質の開拓です。拡張ジグザグ構造をもつ系は、結晶全体で空間反転対称性が破れる系と本質的に異なる電子物性が現れる可能性があります。例えば、奇パリティ多極子を実現しうる舞台であることや、 MgB_2 、 ZrNCl や LnFeAsO に見られるように高温超伝導が現れやすいことには、拡張ジグザグ構造の特徴が現れているのではないかと考えます。本公募研究では、拡張ジグザグ構造ならではの新奇物性の発見を目指して、5d遷移金属原子が拡張ジグザグ構造を形成する物質を新規開拓します。効率的に物質探索を行うために、拡張ジグザグ構造のもつ構造的な特徴に着目することで、あらかじめ拡張ジグザグ構造を実現しうる空間群と、各空間群において拡張ジグザグ構造を形成するサイトを絞り込んでおきます(図2)。候補となりうる空間群をもち、5d遷移金属原子が適切なサイトを占有する物質を集中的に探索することで、新しい5d拡張ジグザグ物質を開拓します。

これらの二つの方針に従って集中的に5d電子系の物質探索を行うことにより、空間反転対称性が破れることで現れる、新奇電子物性の発見を目指します。これから2年間、研究会などで皆さんと議論できることを楽しみにしております。

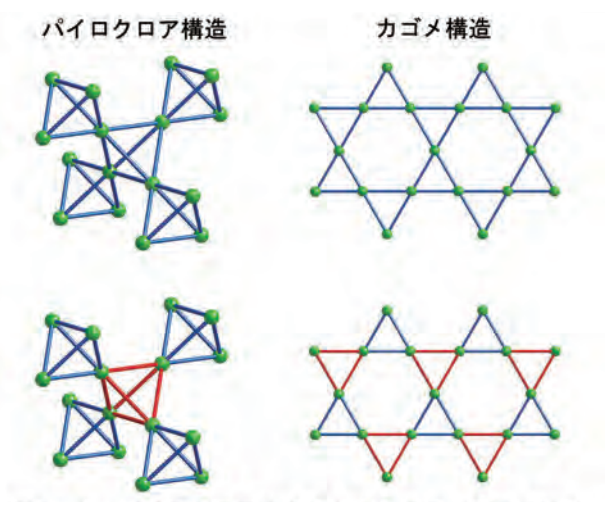


図1. 上：パイロクロア構造とカゴメ構造。空間反転対称性をもつ。下：交替（ブリージング）によって空間反転対称性が破れたパイロクロア構造とカゴメ構造。

空間群	格子点	結合中心	格子	物質数
201 Fm-3	2a 23	4b+ 4c -3	bcc	96
202 Fm-3	8c 23	24d 2/m	単純立方	56
203 Fd-3	8a/8b 23	16c/16d -3	diamond	175
222 Fm-3n	2a 432	8c -3	bcc	6
224 Fm-3m	2a -43m	4b+ 4c -3m	bcc	124
225 Fm-3m	8c -43m	24d mmm	単純立方	8816
226 Fm-3c	8a 432	24d 4/m	単純立方	295
227 Fd-3m	8a/8b -43m	16c/16d -3m	diamond	7804

図2. 立方晶のうち、拡張ジグザグ構造を実現しうる空間群。分類を目的としたものではないため不正確な表であることに注意。格子点の左列に記載されたワイコフ位置が拡張ジグザグ構造を形成しうる。物質数はICSDによる値。



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

中島 正道

分子研UVSOR

熊井 玲児

KEK物構研

この公募研究では、「電子相関」を本質的に内包している遷移金属 d 電子系を対象に、本新学術領域J-Physicsで注目している「スピン軌道相互作用」に由来する特異な電子相の制御と、それによる新規物性を開拓することを目的としています。具体的には、スピン軌道相互作用によりtype-II Dirac電子状態が生じている層状 CdI_2 構造を取る MTe_2 ($M = Ni, Pd, Pt$) と、層状 $PdSe_2$ 構造-3次元pyrite構造間の構造相転移近傍で超伝導が出現すると期待される $PdSe_2$ の元素置換系を研究しています。

研究対象としている第10族遷移金属二硫化物 MX_2 は様々な結晶構造を持ち、同時にそれと不可分な電子状態を示します。よく知られているのは、Te化物で出現する CdI_2 構造で、この構造ではTe-M-Teが積層した構造を取り、隣接するTe層間はファンデルワールス力により弱く結合しています。一方、 NiS_2 や $NiSe_2$ は3次元的なpyrite構造を取り、これらの固溶系では古くからモット転移が研究されています。 PdS_2 や $PdSe_2$ は、このpyrite構造を一軸方向に引き延ばした層状構造を取ります。(図1)

これらの物質系の内、層状 MTe_2 はtype-II Dirac電子系であることが近年判明し、磁気輸送現象や角度分解光電子分光 (ARPES) の研究が行われています。 $PtTe_2$ や $PdTe_2$ では、ARPESの研究によりDirac点が波数空間の $(0,0,k_z)$ の位置に存在しており、そのエネルギーはフェルミレベルよりも0.5eVから1.0eV程度低いことが判明しています。私たちのグループでは、

$NiTe_2$ のARPESによる研究を行っており、他のTe化物と同様にDirac点が $(0,0,k_z)$ の位置に存在しているものの、そのエネルギー準位はフェルミレベル近傍にあることを明らかにしました。(図2) そこで、本研究では、これらのTe化物におけるDirac点をフェルミ準位に近接させる、Dirac電子状態を制御することを目指しています。例えば、 $NiTe_2$ と $PdTe_2$ の固溶により、Dirac点のエネルギー準位の制御を行うを試みます。また、 $NiTe_2$ のTe層間に、Tiなどの陽イオンをインターカレーションすることで、 $NiTe_2$ に電子ドーピングを行い、Dirac点のエネルギー準位の制御を行っていきます。これらの制御されたDirac電子状態を持つ物質系を対象に、type-II Dirac電子系特有の磁気輸送現象、超伝導などの新規物性の開拓を行っていきます。

もう一つの研究としては、 $PdSe_2$ の元素置換系における新規な超伝導の開拓を目指します。 $PdSe_2$ は物理的な圧力効果により、層状 $PdSe_2$ 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 Se_2 のダイマーの不安定性を伴うことがわかっており、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。周期表上、Pdに近い元素を内包したpyrite構造のSe化物としては、先に挙げた $NiSe_2$ や $RhSe_2$ などがあります。そこで、本研究では、 $Pd_{1-x}M'_xS_2$ ($M' = Ni, Rh$) の

固溶系の作成により、物理圧力を使用せず、化学的
元素置換効果により構造相転移を誘起し、その近傍
における新規な超伝導を探索していきます。

また、 PdSe_2 のSeをAsなどのニクトゲン元素Pnに
変えた PdSePn は、SeとPnの周期配列により空間反
転対称性が破れたullmannite構造を取ることが知ら
れています。この構造はpyrite構造に類似した構造
です。本研究では、 $\text{PdSe}_{2-x}\text{Pn}_x$ の固溶系の研究によ
り、構造相転移近傍の超伝導や、Se-Pn非秩序-秩序
状態変化に伴い発生する、空間反転対称性の破れに
より生じる新規な超伝導状態の変化を探索してい
きます。

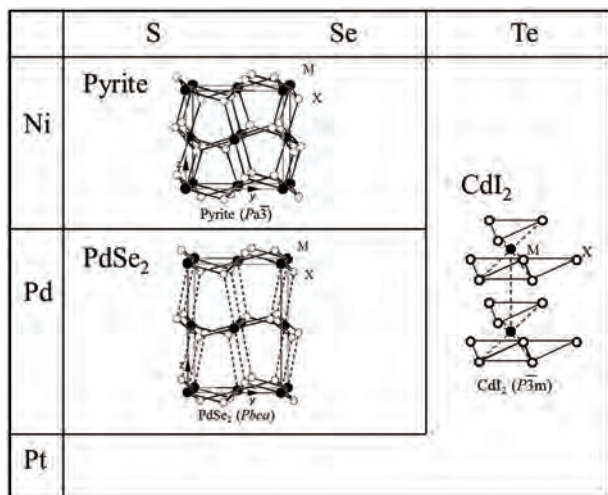


図 1 : MX_2 ($M = \text{Ni, Pd, Pt}$, $X = \text{S, Se, Te}$) の結晶構造。

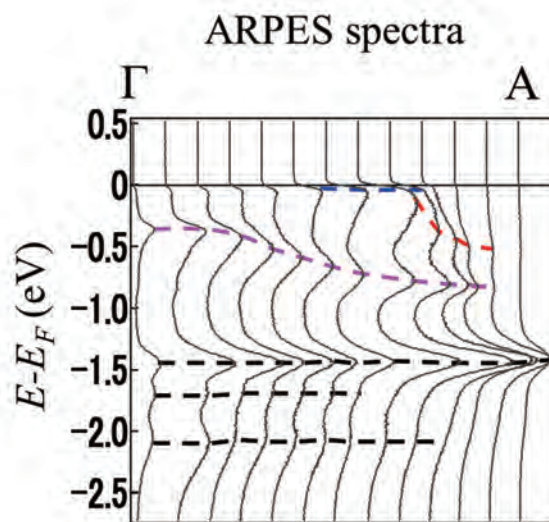


図 2 : NiTe_2 の Γ 点 (0,0,0) から A 点 (0,0,0.5 c^*) 間の ARPES スペクトル。青と赤の破線で示したバンドの交差点が Dirac 点だと予想される。

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



ワイル磁性体 Co_2MnGa における 室温巨大異常ネルンスト効果

酒井 明人

東京大学物性研究所 助教

水田耀 ピエール 大阪大学	A. A. Nugroho バンドゥン工科大学	R. Sihombing バンドゥン工科大学	是常 隆 理研CEMS
鈴木 通人 理研CEMS	竹森 那由多 理研CEMS	石井 梨恵子 東大物性研	浜根 大輔 東大物性研
有田 亮太郎 理研CEMS	P. Goswami メリーランド大学	中辻 知 東大物性研	

近年、トポロジカル絶縁体をはじめ、トポロジが物性に重要な役割を果たすことが理解されつつある。これらの物質は、次世代メモリ等、新たなデバイス応用につながる可能性も秘めているため注目を集めている。本稿では、ワイル磁性体 Co_2MnGa で見つかった室温巨大異常ネルンスト効果についてご紹介する[1]。

これまで研究されてきた熱電変換（ゼーベック効果）は熱流と平行方向に発電するのに対し、磁性体の異常ネルンスト効果は磁化と熱流に垂直方向に起電力を示す（図1 a）。この幾何学的違いが発電デバイスに大きな違いをもたらす。例えば、ゼーベック効果ではp型n型の柱を並べた立体構造が必要であるのに対し、異常ネルンスト効果では立体構造不要で、テープ化などにより熱源に巻き付けるだけで排熱回収ができる。さらにネルンスト効果ではペルチエ熱による効率の低下がないため、ゼーベック効果と同じ性能指数 ZT でより大きな変換効率が得られると考えられている[2]。

これらの利点があるものの、異常ネルンスト効果は通常ゼーベック効果の1%未満であり、熱電応用からは非常に遠いと考えられてきた。しかし、近年ワイ

ル磁性体と呼ばれる物質群[3,4]において、磁化の大きさから経験的に期待される値より数十倍大きな異常ネルンスト効果が観測された[5]。したがって、さらなる物質開拓により、異常ネルンスト効果が大幅に増大する可能性が期待されていた。

今回我々が注目した物質は立方晶ホイスラー化合物 Co_2MnGa である（図1 c挿入図）。ホイスラー系はハーフメタルの候補として主にスピントロニクス分野などで古くから研究が進められてきたが、近年トポロジカルな電子構造を持つ物質として再注目されている[6]。キュリー温度は $T_c \sim 694\text{ K}$ であり室温以上の広い温度範囲で強磁性体である。図1 bに Co_2MnGa の室温での異常ネルンスト効果の磁場依存性を示す。約 $6\text{ }\mu\text{V/K}$ という巨大な値を示すが、これは室温での過去最高値の10倍以上に匹敵する。温度を上げるとさらに上昇し、 100°C では約 $7\text{ }\mu\text{V/K}$ と、室温以上の広い温度範囲で利用可能である（図1 c）。また製造コストが安く無毒、耐久性・耐熱性にも優れている。

この大きな異常ネルンスト効果の起源は何であろうか？低温ではモットの式と呼ばれる関係式が成り立つことが知られている。

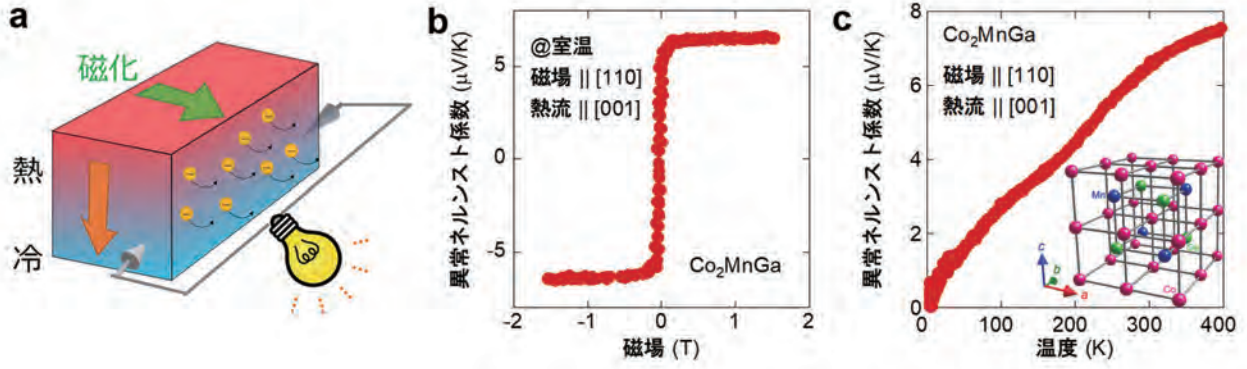


図1. (a)ネルンスト効果、Co₂MnGaの異常ネルンスト係数の(b)室温磁場依存性、(c)温度依存性

$$\alpha_{yx} = -\frac{\pi^2}{3} \frac{k_B^2 T}{e} \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial E} \Big|_{E=E_F} \quad (1)$$

ここで α_{yx} は異常ネルンスト効果の本質的な部分(熱電テンソルの横成分)、 k_B はボルツマン定数、 T は温度、 e は電気素量、 $\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial E} \Big|_{E=E_F}$ はホール伝導率のフェルミエネルギーでのエネルギー微分を表す。この式から、低温では温度に比例して α_{yx} の絶対値が大きくなり、ホール伝導率の E_F でのエネルギー微分が大きいほどその傾きは大きくなることがわかる。

最近の研究で、ホール伝導率を大きくするにはベリー曲率と呼ばれる波数空間の「仮想磁場」が重要であるとがわかっている[7,8]。すなわち、

$$\sigma_{yx}(E_F) = -\frac{e^2}{h} \sum_{n,\vec{k}} \Omega_{n,z}(\vec{k}) \theta(E_F - \epsilon_{n,\vec{k}}) \quad (2)$$

$\Omega_{n,z}(\vec{k})$ はベリー曲率、 $\theta(x)$ は階段関数である。

ベリー曲率はワイル点と呼ばれる縮退のないディラックコーン(線形バンド交差)があると大きくなる。実際にCo₂MnGaのバンド構造を第一原理計算により調べてみると、確かにワイル点が存在することがわかった(図2a)。また実験的にもワイル磁性体の特徴であるカイラル異常(負の磁気抵抗効果)が観測された。

式(1)に戻ると、大きな異常ネルンスト効果にはホール伝導率そのものではなく、微分係数を大きくする必要があることがわかる。式(2)を微分すると、

$$\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial E} \Big|_{E=E_F} = -\frac{e^2}{h} \sum_{n,\vec{k}} \Omega_{n,z}(\vec{k}) \delta(E_F - \epsilon_{n,\vec{k}}) \quad (3)$$

$\delta(x)$ はデルタ関数であり、ベリー曲率だけでなく状態密度も同時に大きくすることが重要であることがわかる。ワイル点にはI型(ディラックコーンの傾きが小さく、価電子バンドもしくは伝導バンドの一方のみがフェルミポケットを形成、図2bを参照)とII型(ディラックコーンの傾きが大きく、価電子バンドと伝導バンドの両方がフェルミポケットを形成、図2cを参照)の2種類があることが知られている[9-11]。状態密度が最も大きくなるのはちょうどI型からII型に移り変わるときであり、図2aのCo₂MnGaのワイル点はまさにそのような状況にある。

「ワイル点がI型からII型に移り変わる点」は物理的にはリフシッツ量子臨界点と呼ばれる特異点であり、その近くでは様々な物理量に対数発散が表れることがモデル計算から明らかになった。実際にCo₂MnGaのは実験・第一原理計算ともに対数発散を示す。この増幅機構により異常ネルンスト効果が大きくなっていると考えられる。

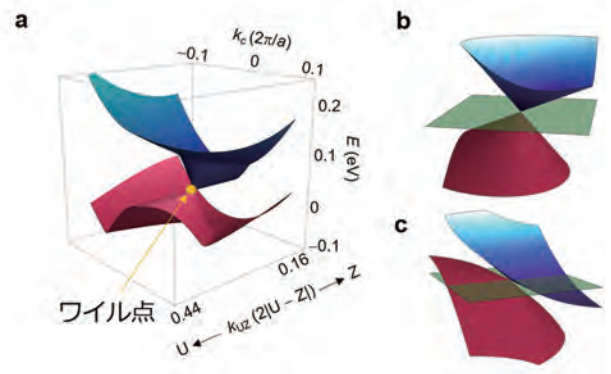


図2(a)Co₂MnGaのワイル点、(b)I型のワイル点、(c)II型のワイル点

未利用熱から電気を作る試みは長い間世界中で行われてきたが、材料の毒性やコストの高さなど様々な問題点のため未だ広く普及するには至っていない。本研究は異常ネルンスト効果という全く新しい原理に基づく熱電変換を可能とするもので、無毒・廉価・耐久性など既存技術にはなかった特性がある。この未開拓の新技术が本研究を礎に今後さらなる研究により発展することで実用につながる事が期待される。

本研究は、科学技術振興機構(JST) 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究(CREST)「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」研究領域(研究総括：谷口研二、研究副総括：秋永広幸)における研究課題「トポロジカルな電子構造を利用した革新的エネルギーハーヴェスティングの基盤技術創製」、文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域「J-Physics：多極子伝導系の物理」(研究代表：播磨尚朝)における研究計画班「A01:局在多極子と伝導電子の相関効果」の一環として行われたものである。関係者各位に深く御礼申し上げます。

-
- [1] A. Sakai *et al.*, Nature Physics **14**, 1119 (2018).
 - [2] T. C. Harman and J. M. Honig, "Thermoelectric and Thermomagnetic Effects and applications" McGraw-Hill, New York, p.337 (1967).
 - [3] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature **527**, 212 (2015).
 - [4] K. Kuroda, T. Tomita *et al.*, Nature materials **16**, 1090 (2017).
 - [5] M. Ikhlas, *et al.*, Nature Physics **13**, 1085 (2017).
 - [6] J. Kübler and C. Felser, Europhys. Lett. **114**, 47005 (2016).
 - [7] N. Nagaosa *et al.*, Rev. Mod. Phys. **82**, 1539 (2010).
 - [8] D. Xiao, M.-C. Chang, and Q. Niu, Rev. Mod. Phys. **82**, 1959 (2010).
 - [9] X. Wan *et al.*, Phys. Rev. B **83**, 205101 (2011).
 - [10] A. A. Burkov and L. Balents, Phys. Rev. Lett. **107**, 127205 (2011).
 - [11] A. A. Soluyanov *et al.*, Nature **527**, 495 (2015).



軌道磁気四極子と電気磁気効果

下出 敦夫

理化学研究所 創発物性科学研究センター 基礎科学特別研究員

渡邊 光

京都大学
大学院理学研究科

柳瀬 陽一

京都大学
大学院理学研究科

多極子とはもともと、物質中の電磁気学において電荷密度や電流密度の異方性を特徴づける物理量であった。これまでは f 電子系を中心として、ひとつの原子における多極子が研究されてきた。そして本領域ではこれを拡張し、複数の原子からなるクラスタにおける拡張多極子を提案している。ところが固体物理で相手にするべきは周期的な結晶における量子力学的な電子であり、ここで多極子を定義しようとすると、位置演算子がよく定義されていないという困難に直面する。

実はこの困難には解決法が知られている。まず電気分極は、Hamiltonianを断熱的に変形し、流れる電流密度を積分することで定義され、Bloch波動関数のBerry接続と呼ばれる幾何学的な量で表される[1]。軌道磁化は、磁場中で熱力学ポテンシャルを計算することで得られる熱力学的な物理量であり、やはりBloch波動関数を用いて表すことができる[2]。

本研究では、軌道磁気四極子の結晶における量子力学的な公式を導出した[3]。副産物として、磁気四極子と電気磁気感受率の間の直接的な関係を証明した。得られた公式をBaMn₂As₂とCeMn₂Ge_{2-x}Si_xの有効模型[4]に適用し、電気磁気感受率への軌道の寄与がスピンの比べて大きくなりうることを示した。

磁気四極子 M_k^l の定義および電気磁気感受率 α_k^l との関係から始めよう。以下の議論は軌道、スピンを問わず成り立つものであり、本研究に先立ってスピンについて議論されている[5]。 l, k については必ずしも対称ではなく、磁気トロイダル双極子とスピン磁気単極子を含んでいるが、後述するように軌道磁気単極子は含まない。必要なのは熱力学と電磁気学の短い数式だけなので、この場で証明しようと思う。熱力学ポテンシャル Ω は

$$d\Omega = -SdT - M_k dB^k - Nd\mu$$

を満たす。 S, M_k, N はエントロピー、磁化、粒子数であり、 T, B^k, μ は温度、磁場、化学ポテンシャルである。磁場が格子定数に比べて十分緩やかに変化しているとすると、局所的な関係式

$$d\Omega = -SdT - (M_k - \partial_l M_k^l) dB^k - Nd\mu$$

に拡張することができるであろう。ここから直ちに

$$M_k^l \equiv -\partial\Omega/\partial(\partial_l B^k)$$

と、 $S = -\partial\Omega/\partial T$ と $N = -\partial\Omega/\partial\mu$ が得られる。 $T=0$ で絶縁体であれば、電荷は分極電荷しかないので、 $qN = -\partial_l P^l$ と表される。ここで q は電子の素電荷、 P^l は電気

[1] R. D. King-Smith and D. Vanderbilt, Phys. Rev. B **47**, 1651 (1993).

[2] J. Shi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 197202 (2007).

[3] A. Shitade *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 020407 (2018).

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

分極である。すると熱力学のMaxwellの関係式から

$$-q \frac{\partial M_k^l}{\partial \mu} = -q \frac{\partial N}{\partial (\partial_l B^k)} = \frac{\partial (\partial_l P^l)}{\partial (\partial_l B^k)} = \alpha_k^l$$

が従う。このように局所熱力学というたったひとつの仮定から、短い数式をいくつか並べるだけで、磁気四極子と電気磁気効果の関係を証明することができる。

定義はできたので、次は計算である。もちろんこの場でそれを行うつもりはない。問題となるのはどのように磁場を導入するかであり、対称ゲージやLandauゲージは位置演算子が現れるので使えない。そこで本研究ではゲージ不変な勾配展開を用いた。これはKeldysh Green関数をゲージ不変な電磁場やその微分について摂動展開する方法であり、いま必要なのは磁場の微分 $\partial_l B^k$ なので都合がよい。方法は重要ではなく、波数 $\mathbf{Q}$ に依存するベクトルポテンシャル $\mathbf{A}(\mathbf{Q})$ を導入し、 $\mathbf{A}$ について1次、 $\mathbf{Q}$ について2次まで展開しても同じ結果が得られる [6]。ひたすら手を動かすと、Bloch波動関数を用いて軌道磁気四極子 M_k^l を表すことができる。

得られた公式を化学ポテンシャルで微分すると、軌道電気磁気感受率 α_k^l が得られる。 α_k^l はトポロジカル絶縁体の文脈で既に導出されており、アクシオン電磁気学と呼ばれる $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$ 項とそれ以外に分けられる [7]。局所熱力学から得られるのは後者のみである。磁場は $\partial_k B^k=0$ を満たすので、軌道磁気単極子とそれに対応する $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$ 項は得られない。

例として、局所的に空間反転対称性が破れた反強磁性体BaMn₂As₂とCeMn₂Ge_{2-x}Si_xを考える。これらは反転中心がMnサイト上になく、反強磁性秩序に伴って空間反転対称性が破れる物質であり、共同研究者である渡邊と柳瀬によって磁気十六極子と磁気四極子の強制的秩序であることが指摘されている [4]。本研

究では、彼らが導出した有効模型を用いて軌道磁気四極子と軌道磁気電気感受率を計算した。

BaMn₂As₂では磁化がc軸方向を向いており、対称性から $M_x=-M_y$ のみが許される。公式を導出する際に対称性を仮定していないが、 $M_x=-M_y$ 以外の成分は計算すれば消える。電気磁気感受率への軌道の寄与は 1.3×10^{-4} ps/mであり、スピンの寄与 -1.5×10^{-3} ps/m [4]に比べて無視できるものではない。

CeMn₂Ge_{2-x}Si_xでは磁化がab面内にあり、対称性から M_x, M_z が許される。特に前者については、電気磁気感受率への軌道の寄与は -3.3×10^{-5} ps/mであり、絶対値は小さいものの、スピンの寄与 1.9×10^{-6} ps/mに比べて10倍以上大きい。

結晶における多極子は、単なる定義の問題ではなく、電気磁気効果をはじめとする交差相関応答と微視的に関係していることが明らかになった。最後にもうひとつ、多極子の重要な側面を述べておきたい。温度勾配と垂直方向に電流や熱流が流れるNernst効果や熱Hall効果では、Kubo公式で伝導度を計算すると $T=0$ で発散することが知られている。これらに軌道磁化や熱磁化を加えることで、 $T=0$ で消える物理的に正しい結果が得られ、Mottの関係式やWiedeman-Franzの法則を示すことができる [8]。ここで熱磁化とは回転する熱流密度を特徴づける、軌道磁化をエネルギーの方向に拡張したものである。より一般に、温度勾配に対するいくつかの応答は、多極子がいなければ物理的に正しい結果を得ることができないと筆者は考えている。最近そのひとつの例として、温度勾配によって磁化が誘起される現象におけるスピン磁気四極子の重要性を議論したので、あわせてご覧いただきたい [9]。

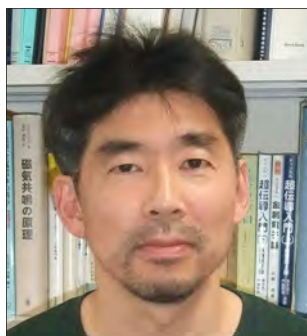
[5] Y. Gao *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 134423 (2018).

[6] Y. Gao and D. Xiao, Phys. Rev. B **98**, 060402 (2018).

[7] A. M. Essin *et al.*, Phys. Rev. B **81**, 205104 (2010).

[8] L. Smrcka and P. Streda, J. Phys. C **10**, 2153 (1977).

[9] A. Shitade *et al.*, Phys. Rev. B **99**, 024404 (2019).



重い電子系超伝導体URu₂Si₂の 隠れた秩序状態の空間群

神戸 振作

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 研究主席

URu₂Si₂は選ばれし化合物と言えるかもしれない。数々の興味深い様相を同時に示すからである。しかし、それらの性質の理解は困難で、凝縮系物理学の難問となっている。U系の重い電子系超伝導体にはこのような“鬼っ子”が幾つかある。その代表的な3姉妹がURu₂Si₂, UPt₃, UBe₁₃である。強磁性超伝導もU系でしか見つかっていない。未だにU系は魅力ある化合物群なのである。

本項では、URu₂Si₂において17Kで起きる、いわゆる“隠れた秩序”転移に関するNMR研究のさわりを述べる。詳細は原論文を参照されたい[1,2,3]。またURu₂Si₂では、転移温度1.7Kで重い電子系カイラル*d*波超伝導状態になると考えられており、その起源は隠れた秩序と密接に関連すると推測されている。超伝導状態の詳細な研究も行っているので、これも原著論文を参照されたい[4,5]。

我々は、SiとRuサイトの詳細なNMR/NQRの研究により、隠れた秩序状態でSiとRuサイトの4回対称性が保存されていることを結論した。Ruサイトの4回対称性については、初期のNQR実験ですでに確認されていたので、より高純度な試料でより精度よく再確認したにすぎない。Siサイトの4回対称性はより複雑な様相である。非常に小さいが、不純物や歪みに起因すると考えられる磁化の2回対称成分も共存するからである(図1)。しかし、もし完全な単結晶があれば、2回対称成分は消滅すると考えられる。もともと、隠れた秩序転移の比熱の飛びが同程度の試料でも、磁化率の2回対称成分の試料依存は大きく、隠れた秩序の秩序変数とは見なせないことがわかっていた。しかし、不純物や歪みに起因する弱い

2回対称成分を含む不均一な線幅は、試料依存は大きいものの隠れた秩序状態で増大することは確かであり、その機構の詳細はまだよくわかっていない。最近、低温・静水圧力下では、斜方晶になることが報告された[6]。関連があるのかもしれない。さて、UとSiは*c*軸上で連なっているので、Siサイトが4回対称ならUサイトも4回対称と結論できる。従ってU, Ru, Si全てのサイトで4回対称が保存されていると考えられる。

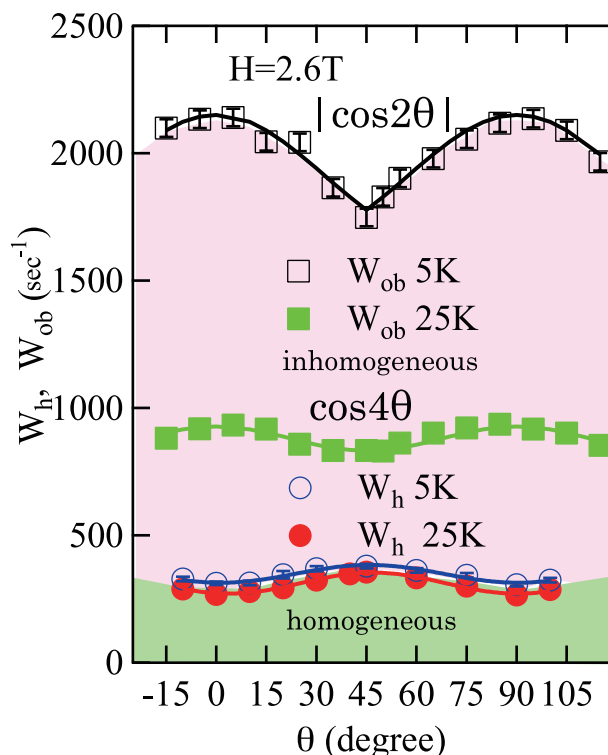


図1: *c*面内で磁場を回転させた時のSi-NMR線幅の角度依存[1]。θは[110]方向からの角度である。不純物や欠陥に起因する不均一線幅は、隠れた秩序状態(5K)で2回対称成分に特徴的な $|\cos 2\theta|$ 依存を示す。スピンエコー減衰から求めた均一線幅は、隠れた秩序相でも4回対称つまり $\cos 4\theta$ 依存を保持している。²⁹Si核は*I*=1/2なので、磁氣的相互作用しかない。従って、どちらの線幅も磁化の分布に対応するが、位相が逆であり起源が異なると思われる。

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[6]。ここで隠れた秩序状態に対して2つの仮定をする。1) 時間反転対称性は破れない。2) 秩序波数は(001)である。この2つの仮定は現時点では確定しているとは言えないが妥当なものである。

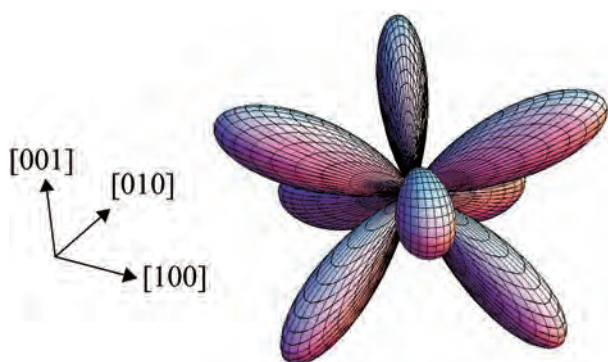


図2： $P4/nnc$ に対応するランク5電氣的奇パリティ多極子秩序の電子分布。 D_4 対称性を持つ。

URu_2Si_2 の常磁性状態の空間群は $I4/mmm$ である。その部分群で上記の仮定を満たし、かつ3サイトの4回対称性が保たれる空間群は $P4/nnc$ しかない。従って $P4/nnc$ は隠れた秩序状態の対称性の有力な候補である。2つの仮定のどれかが破れた場合、幾つかの異なった空間群が候補となるが、ここでは述べない。 $P4/nnc$ 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(図2)。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。ここでは、Uサイトの反転対称性が自発的に破れている特異な転移になっている。現在までの理論では、U5f軌道で構成される偶パリティ秩序を念頭においてきたことが隠れた秩序解決を遅らせた一因かもしれない。当然、実験的な検証も簡単ではない。 $P4/nnc$ の結晶族点群は、 $I4/mmm$ と同じ D_{4h} なので、巨視的物性の対称性からは $P4/nnc$ を同定できない。従って局所的物性から同定するしかない。表1から分かるように、そのためには反転対称や鏡映対称の有無を決定する必要がある。または、外場で誘起される、より低次の多極子秩序から判定することになる。これらは微視的測定でも困難であり、こ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。

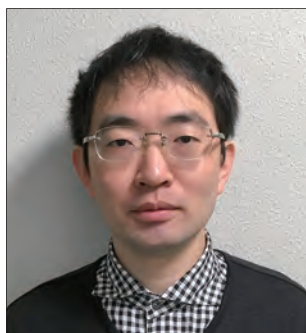
本研究は、原子力機構の服部泰佑、徳永陽、酒井宏典、比嘉野乃花、松田達磨(現首都大)、芳賀芳範；ミシガン大のR.E. Walstedt；神戸大の播磨尚朝 各氏との共同研究である。紙面を借りて深く感謝する。

	$I4/mmm$	$P4/nnc$
U	$4/mmm$	422
Ru	$\bar{4}m2$	$\bar{4}..$
Si	$4mm$	$4..$

表1：空間群 $I4/mmm$ と $P4/nnc$ での各サイトの局所対称性

[1] S. Kambe *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 235142 (2018).
 [2] S. Kambe *et al.*, Phys. Rev. B **91**, 035111 (2015).
 [3] R.E. Walstedt *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 045122 (2016).
 [4] T. Hattori *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 073711 (2016).

[5] T. Hattori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 027001 (2018).
 [6] J. Choi *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 241113(R) (2018).
 [7] H. Harima *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 033705 (2010).



キラルらせん磁性体CsCuCl₃の 磁氣的キラリティの検証

高阪 勇輔

岡山大学 異分野基礎科学研究所 特任助教

大石 一城

Neutron Science and Tehnology
Center CROSS Tokai

加倉井 和久

Neutron Science and Tehnology
Center CROSS Tokai

秋光 純

RIIS
Okayama University

Vladimir Hutanu

Institute of Crystallography
RWTH Aachen University and JCNS at MLZ

らせん磁気構造の右巻きか左巻きのみの磁気ドメインを生成することは、交換相互作用のみではエネルギー的に困難であるが、キラルな結晶構造を有するキラルらせん磁性体においては、磁気モーメントを平行・反平行に揃える交換相互作用に加えて、磁気モーメントをねじるDzyaloshinskii-Moriya (DM) 相互作用により片巻きのみの単一磁区を有するキラルらせん磁気構造が自発的に生成される。このとき、結晶構造が右手系か左手系かによって磁気モーメントをねじる方向が決定される。その結果、結晶構造とらせん磁気構造のキラリティが結合する。このキラルらせん磁性体は、磁場中でスキルミオン格子やキラル磁気ソリトン格子といった特異な磁気構造を形成することから近年多くの注目を集めている。[1-3]

しかし、キラルな結晶構造を有する殆どの無機キラル化合物において、試料内に右手系と左手系の結晶構造ドメインが混在したラセミ双晶が形成され、キラル磁性体の研究における大きな障害となっている。例えば、右手系と左手系結晶ドメインが1:1に混在しているラセミ双晶結晶で偏極中性子回折測定を実施した場合、それぞれの結晶ドメインによる磁気散乱強度が足しあわされてしまう為、右巻きと左巻きの磁気ドメイン比が1:1と観測されてしまう。つまり、DM相互作用によるキラルらせん磁気秩序形成を実験的に検証する為には右

手系もしくは左手系のみの結晶キラリティドメインで構成された単結晶を育成する必要がある。

CsCuCl₃は、図1に示すようなキラルな空間群 $P6_122$ (右手系)及び $P6_522$ (左手系)に属する結晶構造を形成する。また、10.5 K以下において磁気伝搬ベクトル $k_{mag} = (1/3 \ 1/3 \ \delta)$ ($\delta \sim 0.09$)を有するらせん磁気構造を形成することが中性子回折によって観測されている。[4] 本物質の空間群から、DMベクトルは c 軸に平行もしくは反平行のどちらかとなり、右手系と左手系結晶のDMベクトルは逆方向の関係となる。よって、結晶構造のキラリティが反転することにより、磁気モーメントをねじる方向も反転する。しかし、通常の手法で単結晶を育成した場合、ラセミ双晶結晶しか得られないことが実験検証における問題となる。[5]

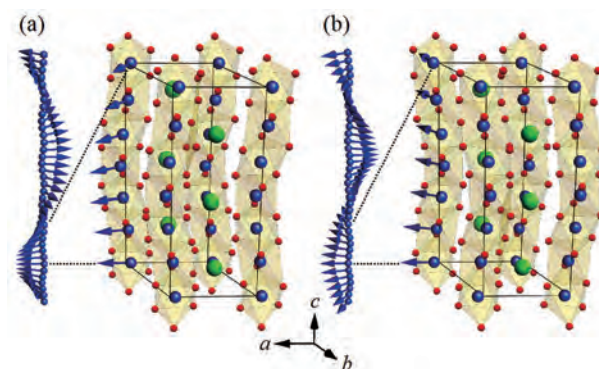


図1 CsCuCl₃の (a) 右手系 (空間群 $P6_122$) 及び (b) 左手系 (空間群 $P6_522$) の結晶構造。青丸のCuサイトに記された矢印は、(a) 右巻き及び (b) 左巻きキラルらせん磁気構造を示す。[6]

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

[2] Y. Togawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 107202 (2012).

[3] Y. Togawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 112001 (2016).

[4] K. Adachi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **49**, 545 (1980).

本稿では、らせん磁性体CsCuCl₃の片手系の結晶キラリティで構成された単結晶育成手法と偏極中性子回折測定によるらせん磁気構造のヘリシティの評価手法を紹介する。[6]

我々は、水溶液を攪拌しながら結晶成長させる攪拌法によりCsCuCl₃の単結晶育成を行った。水溶液から結晶成長を行う場合、一般的には水溶液を振動などの外的要因を可能な限り排除した環境に静置して行うが、攪拌法においては、攪拌子を100~120 rpmで回転させることでビーカー内の水溶液を激しく攪拌させながら結晶成長を行う。これにより、最大3mm程度の単一の結晶キラリティで構成された単結晶を得ることに成功した。結晶キラリティドメインを単一に保持したまま、より大型の単結晶を育成する為、攪拌法で得られた結晶を種結晶として飽和水溶液中に静置させて結晶成長を行った。1ヶ月程度の育成により10~15 mm程度まで単結晶を大型化することに成功した。[6-7]

偏極中性子回折測定は、J-PARC MLFに設置された中性子小角・広角散乱装置 TAIKAN (BL15) 及び、Maier-Leibnitz Zentrum (MLZ) に設置されたPOLIにて実施した。3次元偏極解析測定を行う為にCRYOPADを用い、右手系及び左手系のみのドメインで構成された計2つの単結晶試料を磁気転移温度以下である4 Kで測定した。

らせん磁気構造の右巻きか左巻きの磁気ドメイン比を決定する為には、c軸に平行に近い散乱ベクトルにおいて、スピン反転過程である $I_{+x,-x}$ や $I_{-x,+x}$ を観測する必要がある。(なお、xは中性子スピンの量子化軸であり、散乱ベクトルQと平行な方向を示す。)しかし、CsCuCl₃は、磁気伝搬ベクトルが $(1/3, 1/3, \delta)$ である為、磁気伝搬ベクトルとc軸はほぼ垂直の関係にある。そこで、散乱ベクトルをc軸に近づける為に、 $(1/3, 1/3, 6 \pm \delta)$ といった散乱面の磁気衛星反射を測定し

た。図2に右手系及び左手系結晶で観測した磁気衛星反射プロファイルを示す。図4 (a)に示す右手系結晶の $(1/3, 1/3, 6-\delta)$ 面では、 $I_{+x,-x}$ ではピークが観測されたが、 $I_{-x,+x}$ では有意なピーク強度が観測されなかった。一方、図2 (b)に示す $(1/3, 1/3, 6+\delta)$ においては、逆に $I_{-x,+x}$ でのみピークが観測された。さらに結晶構造キラリティが逆の左手系結晶で測定すると、さらにこの関係が反転した。例えば、図2 (c)に示す $(1/3, 1/3, 6-\delta)$ 面において、 $I_{-x,+x}$ でのみピークが観測された。これらの実験結果は、右手系結晶は右巻きキラルらせん磁気構造、左手系結晶は左巻きキラルらせん磁気構造を形成していることを意味し、CsCuCl₃の結晶構造キラリティとらせん磁気構造のキラリティがDM相互作用によって1対1に対応していることが実験的に示されたと言える。

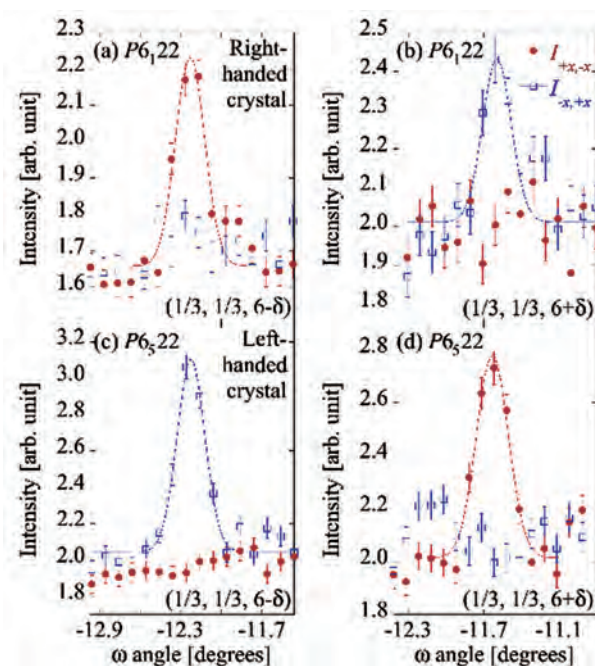


図4 三次元偏極解析測定による右手系結晶(空間群 $P6_122$) の (a) $(1/3, 1/3, 6-\delta)$ 面及び (b) $(1/3, 1/3, 6+\delta)$ 面の ω 走査プロファイル及び左手系結晶(空間群 $P6_522$) の (c) $(1/3, 1/3, 6-\delta)$ 面及び (d) $(1/3, 1/3, 6+\delta)$ 面の ω 走査プロファイル。[6]

[5] H. Ohsumi *et al.*, Angew. Chem. Int. Ed. **52**, 8718 (2013).

[6] Y. Kousaka *et al.*, Phys. Rev. Materials **1**, 071402(R) (2017).

[7] Y. Kousaka *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **502**, 012019 (2014).



近藤半導体 $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$ ($\text{T}=\text{Ru}, \text{Os}$)の特異な相転移はどこまで理解されたか？

高畠 敏郎

広島大学大学院 先端物質科学研究科

中国の浙江大学でこの原稿を書いている。F. SteglichとH. Yuan (袁輝球教授, SCES2016共同主催者)の相関物質研究センターに2018年10月から3か月間食客として滞在している。文献は何も携えて来なかったのも、主観的な話になることをお許しいただきたい。 $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$ ($\text{T}=\text{Ru}, \text{Os}$)の研究では $\text{T}=\text{Ru}$ 系で先行していた西岡・谷田・世良・Mignot氏らとの競合を避けて、我々は $\text{T}=\text{Os}$ 系を対象としてきた。本稿では主に我々の研究について述べるので、彼らの重要な研究成果については、関連する論文をご覧いただきたい。

1. 27 Kでの相転移の発見

発端は2009年のStrydomの論文である[1]。彼は $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ が半導体的な電気抵抗を示しながらも27 Kで2次相転移を示すことを見出した。比熱/温度(C/T)と磁化率 χ がピークを示し、格子熱伝導率も跳び上がることから、何らかの構造相転移が起こって、それが磁気秩序を伴っていると提案した。そのために、転移温度を T^* と記載した。これとは独立に、東京理科大学の元屋研に所属していた室裕司氏は同型化合物の $\text{CeFe}_2\text{Al}_{10}$ が近藤半導体であることを発表した[2]。実は、 $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ の相転移も見つけていたのであるが、物理学会とICM2009での発表に留まっていた[3]。そこに現れたのが西岡氏らのFe, Ru, Os系の単結晶を用いた系統的研究の大論文であった[4]。直方晶のa軸方向への磁気異方性が強いことに加えて、c-f混成強度がRu, Os, Fe系の順番で強くなり、Ru系を加圧するとその電気抵抗率の温度変化は、常圧下でのOs系からFe系のものへと順次遷移して行く

ことを見出した。重要な指摘は、転移温度の27 KがGd系よりも高いことである。この異常に高い転移温度はde Gennes scalingから予想されるよりも二桁も高いので、磁気転移ではなくCDW転移であると解釈し、転移温度を T_0 と記載した。(この論文は、その後に展開した研究の起爆剤となったことで、2018年日本物理学会論文賞を授けられた。) 引き続いて高知大の松村らはRu系の ^{27}Al のNQR信号が5個のAlサイトの1個を除いて、 T_0 以下で2本に割れることを観測し、相転移は結晶構造相転移であると結論した[5]。そこで、我々は単結晶 $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$ の論文原稿で、28.5 Kでの反強磁性秩序という表現を急遽削除し、電子線回折で15 Kにおいて観測された $q = (0, -2/3, 2/3)$ の超格子反射を根拠として、何らかの超格子が28.5 Kで形成されるとした[6]。

2. 反強磁性秩序の観測

磁気秩序の有無を観測する直接的な方法は、 μSR と中性子回折である。そこで、我々は英国のISISにAdroja氏と共同でビームタイムを申請して、多結晶試料を送っていた。その間に安岡先生のバックアップを受けた神戸氏が、いち早く $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ の μSR で内部磁場の発生を観測した[7]。

我々の $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ 試料を用いて反強磁性秩序とその磁気構造 (Fig. 1) を決めたのはKhalyavin氏らである[8]。近藤効果によって $0.34 \mu_B$ まで縮んだCeの磁気モーメントは磁気困難軸のc軸方向を向き、その磁気構造は波数ベクトル $\mathbf{k} = (1, 0, 0)$ で特徴付けられる。Mignot氏らも同様の信号を観測していたが、磁気秩序とは結論しなかった[9]。Os系においても μSR

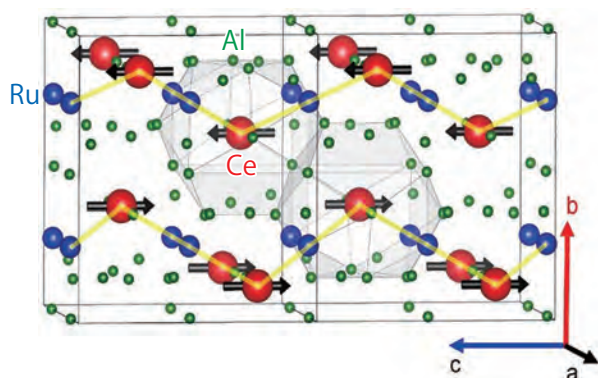


Fig. 1. $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ の反強磁性秩序構造 [8]。

で内部磁場が観測されて、相転移は反強磁性秩序であることが確立した[10]。これ以来、転移温度を我々は T_N と記述することにした。

3. どうして T_N がそんなに高いのか？

次に答えるべき問題は、「 $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$ ($T=\text{Ru, Os}$)の T_N がどうしてGd化合物よりも高いか？」となった。磁気転移温度が20 Kを超えるCe化合物は、この他に7例ほど知られているが、Gd系よりも転移温度が高いのは CeRh_3B_2 だけである。その115 Kでの強磁性転移にはc-f混成が関与しているらしいが、その機構はまだ理解されたとは言い難いようである。

さて、本系の高い T_N の原因を調べるために、私はICM2009で同席した木村真一氏に、光学伝導度の測定を依頼した。直ちに彼は、 $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$ の混成ギャップ幅には異方性が無いが、 $E//b$ の光学伝導度が T_N よりも10 Kも高い39 K付近から20 meVに顕著なピークを形成するのを観測した(Fig. 2)[11]。この結果から、同氏は異方的なCDW形成が反強磁性秩序を誘起すると提案した。その後、中性子非弾性散乱における11 meVのスピンギャップも約39 K以下で発達することが確認された[12]。一方、梅尾氏は圧力下での測定から、電気抵抗の熱活性的挙動が失われても T_N は高いまま残るが、比熱の跳びに対応する $d(\chi T)/dT$ が加圧とともに減少してゼロになると同時に、転移が急に消失するという、相分離を思わせる現象を見出した[13]。

半澤氏は、この結晶構造のCeサイトではb軸方向

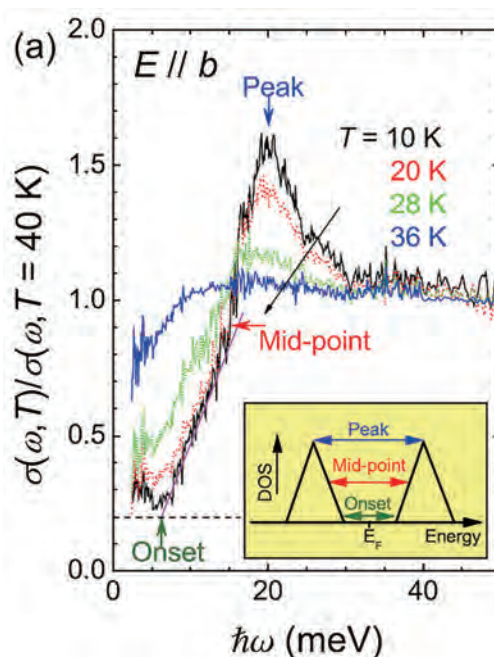


Fig. 2. $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$ の $E//b$ の規格した光学伝導度[11]。

に反転対称性を持たないことに注目した[14]。この奇パリティの結晶場下で、Ceの4f電子は同じサイトの5d電子と混成できるので、それが交換相互作用を強めるというモデルを立てた。Fig. 3に示すように、結晶場基底状態の4f電子と5d電子の波動関数はどちらもb軸方向に伸びていることに注目してほしい。

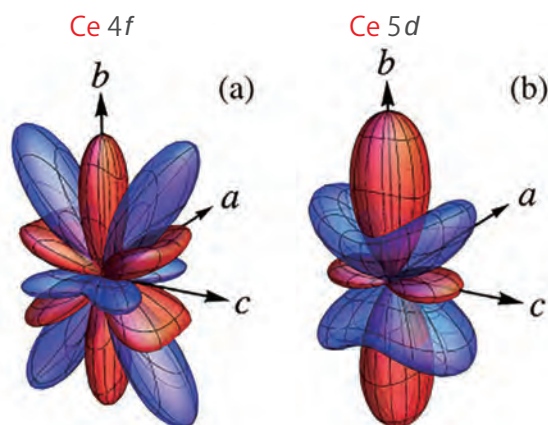


Fig. 3. $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ の結晶場基底状態におけるCeの4fと5d電子の電荷分布 [14]。

4. 何が高い T_N の反強磁性秩序の必要条件か？

これまでの実験事実から、三つの条件について考察した。

- (1) c-f 混成ギャップの存在は必要か？
- (2) CDW的電荷ギャップ($E//b$)は必要か？
- (3) Ceオンサイトでの4f-5d混成は必要か？

まず(1)については、 c - f 混成強度を調節するために $T=Os$ 系に正孔と電子をドーピングした[15]。OsをReとIrで置換するとそれぞれ5d正孔と5d電子がドーピングされる。前者では価数揺動が強まるのに対して、後者では局在性が強まる。電気抵抗の熱活性エネルギーと T_N は、どちらも相関して低下するが、ドーピング依存性は正孔・電子ドーピングに対して非対称で、正孔の方が急激に低下する。電子ドーピングでは T_N は緩やかに低下するが、Ce当たりの磁気モーメントは $0.92 \mu_B$ まで伸びて、その向きを c 軸方向から a 軸方向に変える。一方、電子比熱係数 γ は、 T_N と逆相関でドーピングに伴って増大する。高ドーピング領域では、ギャップ内状態が発達し、電気抵抗の熱活性的挙動が失われるとともに、反強磁性秩序は消失する。フェルミエネルギー E_F でのギャップ内状態密度に依存する電気抵抗率からは、 E_F の上下にギャップ構造が残っているかどうかは判断できない。

そこで、浴野氏の支援を受けて川端君が破断接合トンネル分光で電子状態密度の温度変化を測定した[16]。その結果、 T_N が残っている高ドーピング領域でも混成ギャップ構造は残っており、その大きさは T_N と良く相関していることが判明した (Fig. 4)。この結果は、ドーピング系の光学伝導度から導かれた結論[17]とは矛盾している。しかし、光学伝導度スペクトルを多成分に分解して混成ギャップ成分を抽出するよりも、ギャップ構造を直接観測している破断接合トンネル分光の方を私は信じる。とすれば、 c - f 混成ギャップの存在は高い T_N に必要である。この問題は、横谷氏らが進めている角度分解光電子分光実験によって決着するであろう。

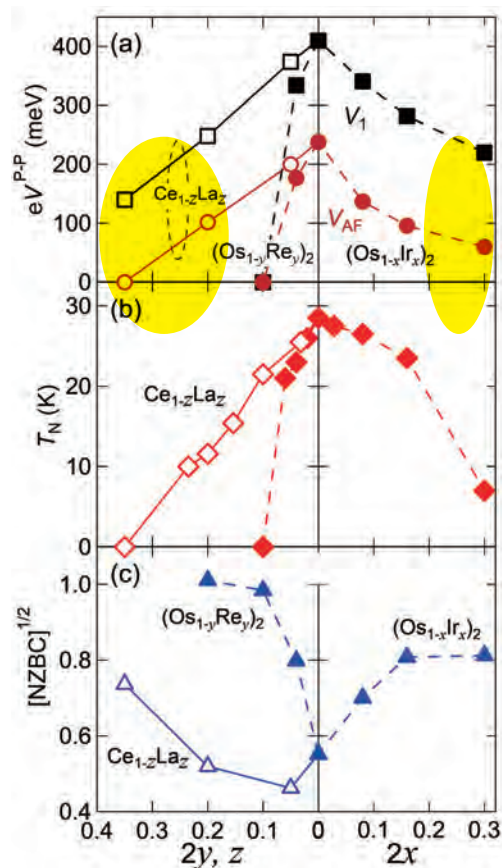


Fig. 4. $CeOs_2Al_{10}$ のドーピング系の破断接合トンネル分光で観測した (a) c - f 混成ギャップ V_1 , 反強磁性ギャップ V_{AF} , (b) T_N , (c) 規格化したゼロバイアス伝導度NZBCのドーピング依存性[16]。

次に(2)の「 T_N 以上の温度でのCDW的電荷ギャップ($E \parallel b$)は必要か?」である。これについては、電荷ギャップを観ている光学伝導度の結果を信頼する[17]。つまり、 T_N の高い反強磁性転移には事前に電荷ギャップが開いていることが必要である。この点を確かめるために、我々は電気抵抗よりも広いエネルギー窓をもつ熱電能を測定した[18]。 $T=Os$ 系の熱電能は b 軸方向においてのみ、降温とともに36 K付近から急減する。この特徴は、ドーピング系でも T_N が存在する領域では残る。従って、この b 軸方向の熱電能の異常は電荷励起ギャップ形成を反映している。

(3)の「Ceオンサイトでの4f-5d混成は必要か?」については直接的な実験証拠は無い。ただし、 b 軸方向の電気伝導が高い T_N をもたらし機構と関係していることが、一軸圧下の磁化測定から推測された[19]。梅尾氏が開発した圧力セルを用いて林君が測定した T_N の圧力変化を、 a , b , c 軸長に対してFig. 5に示す。

T=RuとT=Os系の T_N は b 軸長の関数として連続に繋がりが、 b 軸長が縮むほど上昇する。この時、 c - f 混成強度の目安となる $\chi(B//a)$ と $\chi(B//c)$ のピーク温度は変化しない。この結果は、 c - f 混成強度ではなく b 軸方向の電気伝導が反強磁性交換相互作用を制御していることを示唆する。この点を確認するには、一軸圧下での電気抵抗、光学伝導度、さらにNQR・NMRの測定が強く望まれる。

5. まとめと展望

以上の考察から、(1), (2), (3)は独立ではなく、協力しあって特異な反強磁性を実現していると私は考えている。遍歴的4 f 電子間の磁氣的交換相互作用を高め

ている機構としては、次のようなモデルを考えている。異方的な混成ギャップが形成されると、ギャップ端の電子状態密度は増強されるので、これを用いて交換相互作用も増強される。 b 軸方向にCDW的ギャップが形成されると、フェルミ面が再構築されて交換相互作用がさらに増強される。その際、 b 軸方向に伸びた4 f 波動関数(Fig. 3)と伝導電子とはカップルしやすい。この妄想的モデルに興味を持っていただいた方がいれば、どうかきちんと解明して頂きたい。

最後に、室裕司氏をはじめとする共同研究者の方々と、緊張感を持たせてくれた世良氏、議論して頂いた倉本氏に感謝する。

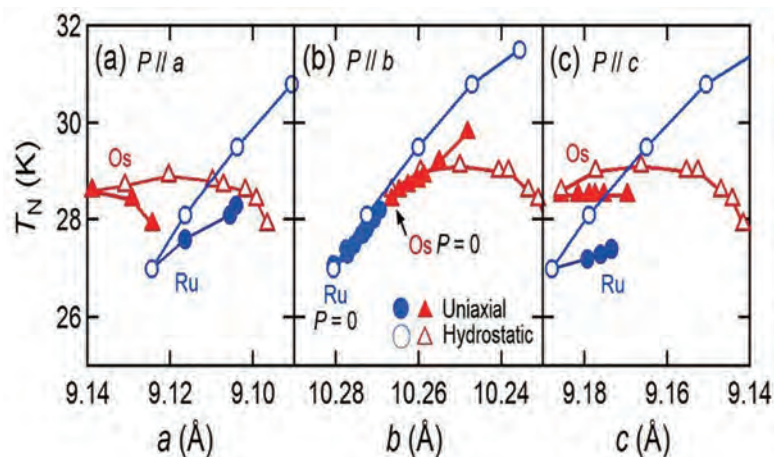


Fig. 5. 一軸圧と静水圧下における $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$ ($T = \text{Ru}, \text{Os}$)の T_N の格子主軸長依存性[19]。

[1] A. M. Strydom, *Physica B* **404**, 2981 (2009).
 [2] Y. Muro *et al.*, *JPSJ* **78**, 083707 (2009).
 [3] Y. Muro *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **200**, 012136 (2010).
 [4] T. Nishioka *et al.*, *JPSJ* **78**, 123705 (2009).
 [5] M. Matsumura *et al.*, *JPSJ* **78**, 123713 (2009).
 [6] Y. Muro *et al.*, *PRB* **81**, 214401 (2010).
 [7] S. Kambe *et al.*, *JPSJ* **78**, 123713 (2009).
 [8] D. D. Khalyavin *et al.*, *PRB* **82**, 100405(R) (2010).
 [9] J. Robert *et al.*, *PRB* **82**, 100404 (2010).
 [10] D. T. Adroja *et al.*, *PRB* **82**, 10445 (2010).

[11] S. Kimura *et al.*, *PRL* **106**, 056404 (2011).
 [12] D. T. Adroja *et al.*, *Phys. Scr.* **88**, 068505 (2013).
 [13] K. Umeo *et al.*, *JPSJ* **80**, 064709 (2011).
 [14] K. Hanzawa *et al.*, *JPSJ* **80**, 023707 (2011).
 [15] J. Kawabata *et al.*, *PRB* **89**, 094404 (2014).
 [16] J. Kawabata *et al.*, *PRB* **95**, 005100 (2017).
 [17] S. Kimura *et al.*, *JPSJ* **85**, 123705 (2016).
 [18] Y. Yamada *et al.*, *JPSJ* **84**, 084705 (2015).
 [19] K. Hayashi *et al.*, *PRB* **96**, 245130 (2017).



空間反転対称性の破れた金属の「軌道交差」とスピン反転

木村 憲彰

東北大学大学院理学研究科 准教授

落合 明

東北大学大学院理学研究科
教授

船島 洋紀

神戸大学大学院理学研究科
特命講師

播磨 尚朝

神戸大学大学院理学研究科
教授

空間反転対称性の破れた金属では、反対称スピン軌道相互作用によってスピンによる縮退が解けてフェルミ面は分裂する。この対称性の破れに起因した電子状態のスピン自由度による分裂は、たとえば図1(a)のように、大きさの異なる二つのフェルミ面をもたらす。このとき、スピンの向きは逆格子空間の $\mathbf{k}$ 方向に依存するようになるが(図1(b))、スピンの $\mathbf{k}$ 依存性(スピントクスチャー)を実験的にとらえるのは難しい。

結晶の対称性を考慮すると、このフェルミ面の分裂は特定の $\mathbf{k}$ 方向で再び縮退する場合がある(図1(a)の黒点)。このとき、フェルミ面に沿って運動するキャリアの軌道は図1(c), (d)のように縮退点で交差する。最近、我々は空間反転対称性の破れた価数揺動物質 Yb_4Sb_3 において、ドハース・ファンアルフェン(dHvA)効果を用いてこの「軌道交差」を観測し、スピントクスチャーに関する興味深い現象を見出したので[1]、本稿で紹介したい。

Yb_4Sb_3 は立方晶anti- Th_3P_4 型結晶構造を取り、空間群 $I-43d$ 、点群 T_d に属している。スピン自由度によって分裂したフェルミ面は3組あり、いずれも Γ 点を中心とした、球状に近い閉じたホール面である。図1(a)は3組のうちの1組を示した。

磁化の量子振動であるdHvA効果の周波数は、フェルミ面の極値断面積に比例する。フェルミ面が2つに分裂した今の場合、分裂してできた大きいフェルミ面と小さいフェルミ面に応じて、2つの周波数の

振動が観測される。ところが、分裂したフェルミ面に縮退した点があると、キャリアはその縮退点で小さいフェルミ面(内側の軌道)から大きいフェルミ面(外側の軌道)へ、あるいはその逆の軌道を通ることがあり得る。このときキャリアの描く軌道で囲まれた極値断面積は2つのフェルミ面の間を取ることであり、3つ以上の量子振動が観測される。例えば、縮退点が4つの場合は5つの振動が観測される。実際、 Yb_4Sb_3 では図2の $\beta_1 - \beta_5$ や $\gamma_1 - \gamma_5$ のように、磁場を $\langle 100 \rangle$ 方向に印加した時に5つのdHvA振動が観測された。

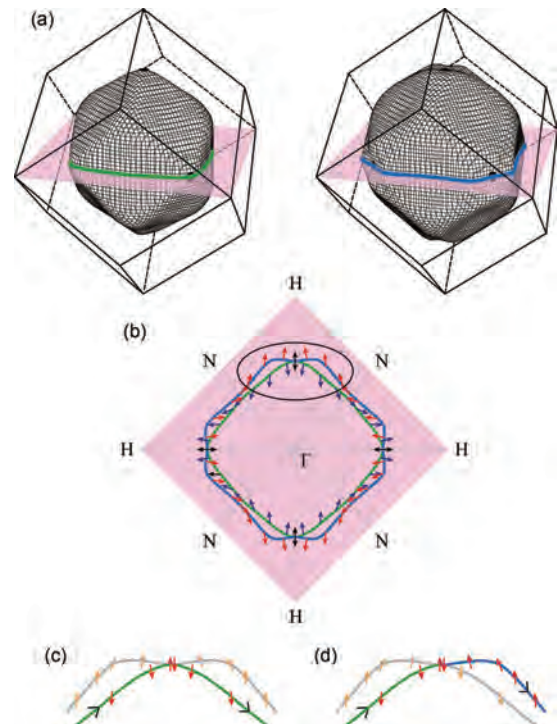


図1 (a) Yb_4Sb_3 のフェルミ面(一部)。(b) $H // \langle 100 \rangle$ の時の軌道とスピントクスチャー。(c)と(d)は(b)の丸で囲んだ部分の拡大図で、(c)が通過軌道、(d)が交差軌道をカラーで表している。

軌道の縮退点でキャリアが元の軌道を通る（通過する）か、それとも他方のフェルミ面の軌道に移る（交差する）かの確率は、磁気破壊(Magnetic Breakdown)で知られた半古典的な解析手法[2]を用いて評価することができ[3]、ある交差（通過）確率 P をもった場合のdHvAスペクトルを予想することができる。例えば交差が起きにくい（ $P \approx 0$ ）場合は、内側と外側の軌道のみ、つまり一番小さい周波数と一番大きい周波数の信号が強くなる（図3左）。一方交差が頻繁に起こる（ $P \approx 1$ ）場合は、中間の周波数の信号が強くなる（図3右）。本研究では、この予想と実験結果を比較することによって、交差確率を特定することができた。

軌道交差は「スピン反転」の有無を伴う点で磁気破壊とは本質的に異なる。図1(c)ではスピン反転は起きないが、図1(d)の軌道では縮退点でスピンの反

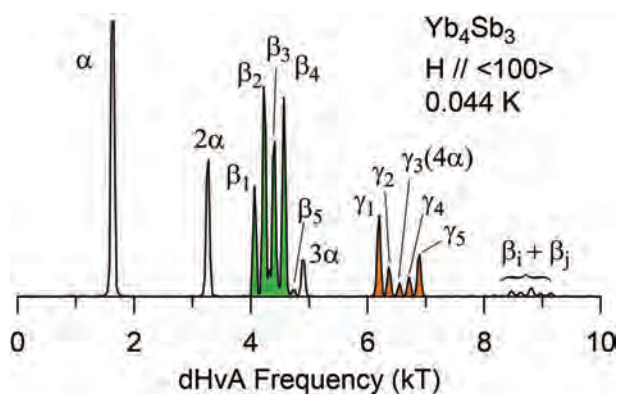


図2 dHvA振動のFFTスペクトル。

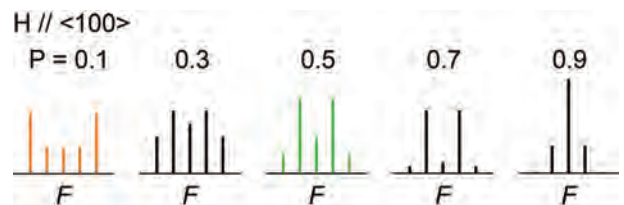


図3 交差確率によって変化するdHvAスペクトル（シミュレーション結果）。オレンジで示したスペクトルが実験で得られた $\gamma_1 - \gamma_5$ を、緑が $\beta_1 - \beta_5$ をよく再現している。

転する。したがって、交差確率を特定することによって、縮退点でスピン反転が起きやすいのかどうかはわかることになる。Yb₄Sb₃では、フェルミ面、あるいは磁場方向によってスピン反転の起きやすさが異なることが分かった。例えば、図2と図3を比較すると、 $H // \langle 100 \rangle$ では $\gamma_1 - \gamma_5$ の軌道は $P = 0.1$ で、交差はほとんど起きておらず、したがって図1(c)に相当するため、スピン反転がほとんど起きていないことがわかる。一方、 $\beta_1 - \beta_5$ の軌道は $P = 0.5$ で、図1(d)のスピン反転を伴う軌道交差が半分の確率で起きていることがわかる。

以上の結果は、dHvA効果が伝導電子のスピンの性質を観測する新しいプローブとして有効であることと同時に、単純な球状フェルミ面で構成されるYb₄Sb₃がこのようなスピントクスチャーを研究するのに適した物質であることを示している。今後はこの手法を使って、例えば重い電子系の質量増強のスピン依存性の起源を調べたり、あるいはYb₄Sb₃を用いて反対称スピン軌道相互作用に起因した新しい現象を探索したりと、様々な展開が期待される。

[1] N. Kimura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 114708 (2018).

[2] D. Shoenberg, Magnetic Oscillations in Metals (Cambridge Univ. Press, 1984).

[3] L. M. Roth, Phys. Rev. **173**, 755 (1968).



4f²希薄系Y(Pr)Ir₂Zn₂₀における 単サイトの非フェルミ液体的挙動

山根 悠

広島大学大学院 先端物質科学研究科 博士課程後期2年

鬼丸 孝博

広島大学 大学院
先端物質科学研究科 教授

脇倉 和平

横浜国立大学
大学院工学研究院 助教

松本 圭介

愛媛大学大学院
理工学研究科 助教

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

高畠 敏郎

広島大学大学院先端物質
科学研究科 特任教授

4f 電子の電気四極子が活性となるPr希薄系Y(Pr)Ir₂Zn₂₀において、低温での比熱と電気抵抗率が単サイトの非フェルミ液体的挙動を示すことを初めて明らかにした。本稿では、その研究の背景と成果について紹介する。

重い電子系金属の低温における電気抵抗率や比熱の温度変化は、ランダウのフェルミ液体論によって説明できる[1]。一方で、電子相関の強いf電子を含むいくつかの系は、「非フェルミ液体(NFL)」的な振る舞いを示す[2]。このNFL的挙動の原因として、主に二つがある。まず、磁気モーメントが伝導電子に遮蔽される近藤効果(図1(a))とRKKY相互作用の競合による量子臨界現象が挙げられる。量子臨界点の近傍では、非従来型の超伝導などの興味深い現象が発現するので、盛んに研究されている。他方、図1(b)のように、f電子の局在モーメントが複数の伝導バンドによって過剰に遮蔽される「2チャンネル近藤効果」がある[3]。理論計算から、磁気比熱を温度で割ったC_m/Tが $-\ln T$ 、電気抵抗率ρが $\sqrt{T}$ に比例し、絶対零度で(1/2)Rln2のエントロピーが残ると予想された[4, 5]。それが実現する系として提案されたf²配位系の電気四極子による近藤効果を確認するために、5f²配位のU希薄系で実験的検証が試みられ

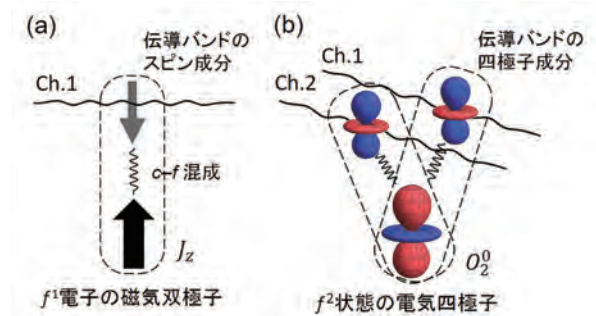


図1 (a) 通常の磁気的な近藤効果と(b) 四極子近藤効果の概念図。四極子近藤効果では、f²電子の電気四極子が等価な2つの伝導バンドの四極子成分によって過剰に遮蔽され、NFL状態が発現する[3]。

た[6]。しかし、金属間化合物中のUイオンの価数は非整数であるだけでなく5f電子は遍歴性が強いので、その結晶場基底状態は同定できなかった。そのため、四極子近藤効果の実験的確認には至っていなかった。

そこで私達は、図2のように、非磁性である立方晶YIr₂Zn₂₀のYを少量のPrで置換したPr希薄系Y(Pr)Ir₂Zn₂₀に着目した。Pr格子系PrIr₂Zn₂₀におけるPr³⁺イオンの結晶場基底状態は、電気四極子が活性となる非磁性Γ₃二重項であり、反強四極子秩序をT_Q = 0.11 Kで示す[7]。また、比熱と電気抵抗率はT_Q < T < 2 Kの範囲でNFL的挙動を示し、四極子近藤格子の可能性が指摘された[8]。私達は、Pr間の相互作用

[1] G. R. Stewart, Rev. Mod. Phys. **56**, 755 (1984).

[2] G. R. Stewart, Rev. Mod. Phys. **73**, 797 (2001).

[3] P. Nozières and A. Brandin, J. Phys. (Paris) **41**, 193 (1980).

[4] P. D. Sacramento and P. Schlottmann, Phys. Rev. B **43**, 13 294 (1991).

[5] I. Affleck and A.W.W. Ludwig, Phys. Rev. B **48**, 7297 (1993).

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

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

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

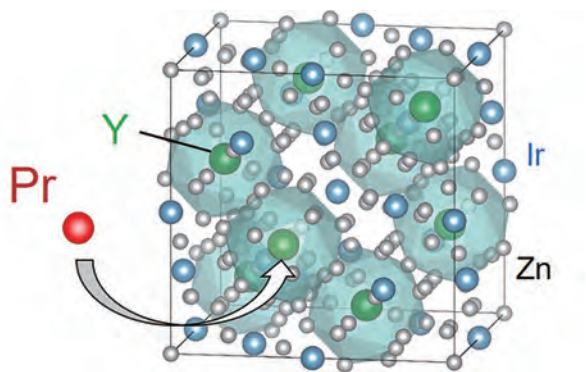


図2 非磁性 $\text{YIr}_2\text{Zn}_{20}$ のYを少量のPrで置換したPr希薄系 $\text{Y(P_r)Ir}_2\text{Zn}_{20}$

を抑制した希薄系に着目し、単サイトの四極子近藤効果の発現を期待した。具体的には、Zn自己フラックス法により作製した $\text{Y(P_r)Ir}_2\text{Zn}_{20}$ 単結晶の比熱と電気抵抗率を0.08 Kまで測定し、単サイトのNFL的挙動が発現するかを調べた[9-11]。

図3(a)に、 $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ir}_2\text{Zn}_{20}$ ($x \leq 0.44$)の ρ の変化量 $\Delta\rho$ の温度変化を示す。ここで、NFL的挙動の特性温度 T_0 を磁気エントロピー S_m が $R\ln 2$ の75%に達する温度とし[4]、横軸は温度 T を T_0 で割った値とした。また、縦軸の値は T_0 での絶対値で規格化している。 $x \leq 0.44$ の値は、 $0.5 < T/T_0 < 3$ の範囲で x に依らず一つの曲線にのる。これは、黒丸で示した $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ ($x = 1$)の振る舞いとは大きく異なる。図3(b)に、 C_m/T を T_0 での値で割ったものを示す。 $\Delta\rho$ と同様に、 $0.5 < T/T_0 < 3$ の範囲ですべてのデータが一つの曲線にのる。 $\Delta\rho$ と C_m/T の温度変化が組成に依らず一つの特性温度でスケールされることは、両者の振る舞いが

Pr単サイトの効果であり、しかも同じ起源によることを示している[10]。さらに、赤の実線で示すとおり、 C_m/T は $-\ln T$ 、 $\Delta\rho$ は $\sqrt{T}$ に比例する。これらの温度依存性は、上に述べた単サイトの四極子近藤効果の理論予測[3]と一致する。

図4に、 $x = 0.044$ の[100]方向の磁場 $B \leq 12$ Tにおける S_m の温度変化を示す。磁場 $B \geq 4$ Tでの $S_m(T)$ は、いずれも $T < 1$ Kでほぼゼロとなる。この振る舞いは、実線で示すように、結晶場とゼーマン効果を

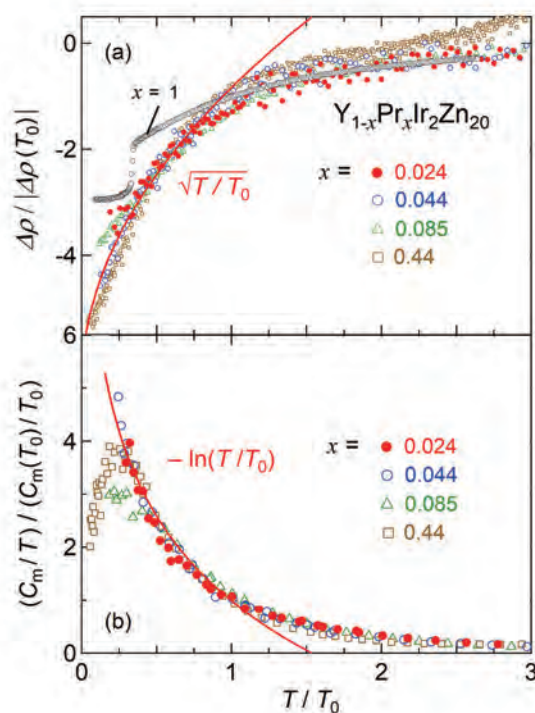


図3 $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ir}_2\text{Zn}_{20}$ の(a)電気抵抗率の変化量と(b)磁気比熱を温度で割った C_m/T の温度変化[10]。いずれも特性温度 T_0 における値で割った量であり、横軸は規格化された温度 T/T_0 である。赤線は、四極子近藤効果の理論による温度変化[3]。

[9] Y. Yamane *et al.*, Physica B **536**, 40 (2018).

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

[11] Y. Yamane *et al.*, AIP Advances **8**, 101338 (2018).

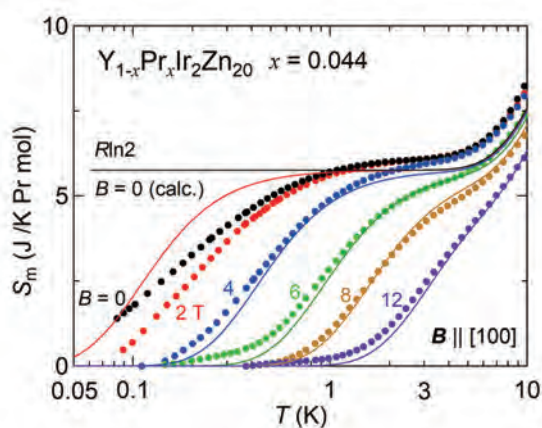


図4 Pr希薄系($x = 0.044$)の磁気エントロピーの温度変化[11]。磁場は[100]方向に12 Tまで印加した。実線は、結晶場とゼーマン効果を考慮した計算結果。

考慮した計算で再現できる。一方、 $B = 0$ の $S_m(T)$ が最低温の0.08 Kでも $0.25R\ln 2$ 程度に留まっていることは、ゼロ磁場での残留エントロピーの存在を示唆する[11]。この値が四極子近藤効果から期待される $(1/2)R\ln 2$ よりも小さいことは、ランダムな元素置換による結晶場の乱れによって、残留エントロピーが部分的に消費されたためと考えられる。

本研究では、電気四極子が活性となるPr希薄系Y (Pr) $\text{Ir}_2\text{Zn}_{20}$ において単サイトのNFL的挙動を観測し、四極子近藤効果の可能性を提案した。今後、四極子感受率に対応する弾性定数の測定と、NMRや中性子散乱などの微視的プローブによる測定によって、四極子揺らぎが観測されれば、四極子近藤効果の検証が進むであろう。



共催シンポジウム (物理学会秋季大会)の報告

楠瀬 博明

明治大学理工学部 教授

同志社大学京田辺キャンパスで開催された日本物理学会秋季大会 (2018.9.9-12)にて、初日の午後に本新学術領域の共催による「拡張多極子が拓くスピン軌道物性の新展開」シンポジウムが行われたので、その様子を報告する。

従来の局在多極子の枠を超えて「拡張された多極子 (Augmented Multipole)」という新概念を構築し、その概念に基づいて様々な物性を統一的かつ包括的に理解して新しい物性現象を産み出そうとする取り組みは、本新学術領域の軸の1つである。本領域が発足して3年が経過し、このような試みに関して理論・実験の両面において重要な進展があり、分野を超えた波及効果も見られつつある。国内外からの急激な関心の高まりに応じて、これまでに得られた新しい知見を広く全国の学会員と共有し、拡張多極子の物理に関する興味と認識を深めていただくという目的で開催された本シンポジウムは、直前の北海道大地震や大型台風による学会参加者のキャンセル等があったにも関わらず、収容人数300名程度の大教室で立ち見がでるほどの盛況ぶりであり、その目的は概ね達成されたといつてよいであろう。また、拡張多極子に基づくスピン軌道物性というテーマに関する関心の高さは、主催者の予想を大きく上回るものであった。

シンポジウムは領域代表の播磨氏による全体の趣旨説明を皮切りに、まずは、速水氏が拡張多極子の概念について理論的な観点から整理を行った。多極子には時空パリティの異なる4種があり、すべての電子自由度を拡張多極子で統一的かつ包括的に表現できると、拡張多極子が微視的に発現するための条件、および、活性な多極子と種々の交差相関物性との関係など

拡張多極子が拓くスピン軌道物性の新展開

9日 B105会場 13:30~17:20

領域8, 3, 4

(共催: 新学術領域研究 J-Physics:多極子伝達の物理)

1. 趣旨説明	神戸大理 播磨尚朝
2. 多極子の拡張・一般化と交差相関物性	北大理 速水 賢
3. 反強磁性金属における電気磁気応答の観測	北大理 網塚 浩
4. 奇パリティ多極子相の分類学と電磁応答・超伝導	京大理 柳瀬陽一
5. 非対角応答の観測による拡張奇パリティ多極子伝導系の開拓	東北大 大串研也
休憩	
6. 常磁性カイラル系における電流誘起磁性の観測	東理大理 伊藤哲明
7. クラスタ多極子理論のトポロジー・マクロ物性研究への応用	東北大 金研 鈴木通人
8. 磁気八極子によるワイル磁性体の巨大電気磁気応答制御	東大物性研 中辻 知
9. 磁気八極子の観点から見たカイラル反強磁性体中の磁壁ダイナミクス	東大物性研 大谷義近
10. まとめ	明大理工 楠瀬博明

シンポジウムプログラム

(地震により、登壇者変更: 北大理 網塚 浩 → KEK 齋藤 開)

が、いくつかの典型物質の例を用いて紹介された。

続いて、拡張多極子研究の転機となった磁気秩序下のUNi₄Bにおける電流誘起磁化の観測について齋藤氏が報告した。当初、C01代表の網塚氏が講演する予定であったが地震の影響で参加が叶わず、齋藤氏の講演となった。本領域が発足する以前から5年強にわたって実験の改良で苦節を忍んだ齋藤氏の講演は迫力があつた。また、実験と理論との相互検証が進んだほか、電流誘起磁化を示す新たな物質も紹介され、今後の進展を期待させる内容であった。

柳瀬氏は、磁気秩序による自発的な空間反転の破れ概念と、群論を用いた分類方法および期待される電磁応答について紹介した。また、同様の観点から超伝導相の分類学、対称性によって保護されたノードについても議論した。周期系の運動量空間における



シンポジウム会場の様子

多極子は、近年のベリー曲率を用いたモダンな電気分極の理解の延長線上にあり、今後重要となることが強調された。

大串氏は、 BaMn_2As_2 における磁気四極子秩序の可能性を電磁応答の観点から議論するとともに、今後の研究において重要となるドメインの空間分布について、第2高調波発生の干渉効果を用いた観測例を紹介した。

休憩をはさみ、本領域と関連の深い常磁性金属Teにおける電流誘起磁化の報告が、伊藤氏からなされた。これは、バルク物質におけるEdelstein効果を観測した初めての例であり、運動量空間における多極子と密接な関係があることから、本領域の進展にとっても重要な示唆を与えてくれる典型例となろう。

次に、 Mn_3Sn で発見された自発磁化を持たない非共線の磁気構造下で生じる異常ホール効果について、磁気八極子を用いた理論的解釈が鈴木氏によって紹介された。これは、副格子自由度を用いたクラスター多極子の典型例である。異常ホール効果は運

動量空間のベリー曲率を反映した量であるが、実空間の複雑な磁気構造と運動量空間のトポロジを橋渡しする言語として、多極子が重要であることが強調された。

同物質に関して、中辻氏から異常ホール効果の他、ネルンスト効果ならびに磁気光学カー効果について報告がなされ、その制御方法について紹介があった。一様磁化を持たない反強磁性体におけるこのような物性は新たな物質機能創出の可能性を切り拓くものであり、また、応用上も重要であることが強調された。

新学術領域「ナノスピン変換科学」の領域代表である大谷氏からは、磁気デバイス応用研究の一環として進められているカイラル磁性体中のドメイン運動のダイナミクスについて紹介があった。また、中辻グループとの共同研究が、 Mn_3Sn の物性の理解を深めていることやドメイン制御に関するアイデアに貢献していることが紹介され、分野横断的な共同研究の重要性を象徴している。

以上のように、拡張多極子の概念は多くの実例を持って整備されつつあり、特異な物性の整理、理解と新しい現象の発見に今後も役立っていくものと思われる。登壇者には若手と中堅の顔ぶれが多くみられ、本新学術領域が目指す世代交代と若手育成の成果が徐々に現れてきているようだ。反省すべき点として、少し専門性が高い話題であったことや会場が広すぎたことなどもあり、質問は若干少なめであった。本領域で得られた果実をより広い分野へ十分に浸透させるためにも、非専門家へのたゆまない啓蒙活動が重要であろう。



第12回 物性科学領域横断研究会 領域合同研究会報告



石田 憲二

京都大学 大学院理学研究科 教授

2018年11月30日(金) - 12月1日(土)の二日間にわたり、奈良先端科学技術大学院大学、ミレニアムホールにて、第12回物性科学領域横断研究会 領域合同研究会が開催されました。この研究会の趣旨を少し説明いたしますと、その年に採択されている物性科学に関連した新学術領域研究が合同で開催する研究会で、各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共に、物性科学のホットな話題を2日間で概説することを目的とした研究会です。秋光先生・福山先生の御尽力の元始まった本研究会も今年度で第12回を数えています。

今年度参加の新学術領域研究を紹介すると、

➤ ナノスピン変換科学

(東京大学 大谷 義近 H26-H30年度)

➤ 高次複合光応答分子システムの開拓と学理の構築

(大阪大学 宮坂 博 H26-H30年度)

➤ 3D活性サイト科学 ードーパント 界面構造

ナノ構造体の3D原子構造と物質デザイナー

(奈良先端科学技術 大門 寛 H26-H30年度)

➤ トポロ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 H28-32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)

の8課題です。

当新学術からは播磨代表が趣旨説明、網塚さんが「拡張多極子秩序系における電流磁気応答の観測」、中辻さんが「多極子で制御するワイル磁性体の室温量子物性」で、それぞれのグループが精力的に取り組んでいる研究内容が紹介されました。講演内容については本Newsletterにも紹介記事(Vol. 2：網塚さん、Vol. 4：中辻さん)がありますので、詳細はそちらをご覧ください。福山先生の専門に近いこともあり、活発な議論が行われました。

本会議にはポスターセッションがあり、当新学術から18件の発表(全体79件)がありました。このポスター発表には、大学院生・若手研究者の研究を奨励し、人材育成を目的とした物性科学領域横断研究会ポスター賞(全6件)が授与されます。20名の審査員で審査され、当新学術領域から下記の3名が受賞しました。

◆ 猪崎優喜(電通大) 「強スピン軌道結合系における異常なゼーマン効果の理論」

◆ 星 和久(首都大) 「BiCh₂系超伝導体 LaO_{0.5}F_{0.5}BiSSeにおける電気抵抗面内異方性」

◆ 飯村翔馬(埼玉大理工) 「半金属的伝導バンド構造を持つ近藤格子の超伝導発現機構」

3名の方、おめでとうございます。当研究領域の研究内容が、他領域の審査員の先生からも高評価を受けたことは喜ばしいことです。個人的には、懇談会の冒頭に紹介のあった副賞の豪華さに驚きました。(奈良の地酒大吟醸4合瓶と、秋光先生お気に入りの写真家による仏像の写真セット) 来年度の研究会に



網塚氏

中辻氏

福山先生



秋光夫妻と水口夫妻

は、私の研究室の学生にも是非頑張ってもらいたいと思いました。

また本研究会では、第13回凝縮系科学賞の授賞式も行われ、実験部門では計画研究D01班の水口佳一さんが受賞されました。(理論部門は名古屋大の川崎猛史さん) この賞は、秋光・福山両先生が「我が国の物質科学の健全なる発展」を支える将来を担う若手を発掘すること、また物心両面から支援することを願って2006年創設されました。授賞式に先立ち審査方針の紹介がありましたが、「研究業績概要および論文の内容を専門の近い複数の委員が精査し、審査員全員で審査を行う。審査項目は研究業績の分野における位置づけ、方法論の正しさ・適確さ、研究内容の質の高さ、波及効果、などで、これらの内容が論文中に客観的かつ公正に表現されていることを重視する。」であり、研究者群自らが自前で創設した賞です。(次年度申請を考えている人は審査方針を参考にして下さい。) また歴代の受賞者の中には、本新学術の

計画班代表の中辻さん、青木さんもおられます。水口さんの受賞題目は、「層状ビスマス硫化物超伝導体の発見」で、受賞理由は「ビスマスと硫黄の層を持つ臨界温度 T_c が6 Kの新超伝導体を発見したこと、そして層間に別のものを挟むことで T_c を10.6 Kに引き上げ層状ビスマス硫化物が新たな超伝導群となることを示したこと、また d 電子を持たないビスマスが超伝導の主役になったことで既存の遷移金属にはない新たな展開が見られていること」となっています。水口さん、本当におめでとうございます。

受賞の後の講演では、自身の経歴の紹介があり、超伝導物質の発見を夢見、博士課程で研究室を変えたことの紹介もなされていました。また自身がカルコゲン元素を愛するあまり、お子さんにカルコゲン元素由来の名前を付けていることを紹介されていました。「水口さん、お嬢ちゃんには金属元素の名前の方には注意した方がいいですよ。とくに鉄君とか」



受賞者の方々。左から、星さん、水口さん、1人おいて、飯村さん、猪崎さん。
真ん中は、いつになくご満悦な播磨代表。懇談会の会場にて(2018年11月30日撮影)



第13回凝縮系科学賞を受賞して

水口 佳一

首都大学東京 物理学科 准教授

J-PhysicsではBiやPbなどの重金属を含むカルコゲナイド超伝導体の探索を進めています。そのきっかけとなったのは2012年に発見したBiS₂系層状超伝導体[1,2]です。この度、「層状ビスマス硫化物超伝導体の発見」の業績に対して、第13回凝縮系科学賞を受賞させていただきました。大変栄誉ある賞を受賞させていただき、研究を支えてくださった共同研究者の皆様、また研究成果を評価してくださった選考委員の先生方に、心より感謝申し上げます。本稿では、受賞理由となったBiS₂系超伝導体発見の経緯と本物質系の面白さについて簡単に紹介させていただきます。

私は修士課程まではバナジウム酸化物の研究を行い、博士課程では鉄系超伝導体の研究を行いました。2011年に首都大の助教に着任し、これまでと全く異なる超伝導体の探索を行いたいと思い、Bi系超伝導体の探索を行いました。そのきっかけは、BiOCuSという半導体にCu欠損を導入させることで超伝導になるという報告[3]でした。私もBiOCu_{1-x}Sを合成しましたが、バルクな超伝導は観測されませんでした。思い切って4元系から一つ元素を減らし、3元系(Bi-O-S)の探索に舵を切りました。データベースでBi-O-Sの物質を探索すると、Bi₂O₂SやBi₂O₂(SO₄)など多様な層状物質の存在がわかりました。その時に「Bi-O-S系層状超伝導体がありそうだ」と感じたのを覚えています。探索の結果、新規物質であるBi₄O₄S₃超伝導体の発見に至りました[1]。結晶構造解析とバンド計算から、BiS₂層を伝導層とした層状超伝導体であることがわかりました。その後、BiS₂層と様々なブロック層(絶縁層)を交互積層させることで、La(O,F)BiS₂のような超伝導体を数多く合成することができました[2]。その後に世界中で物質開

発および機構解明に関する研究が進められており、非従来型超伝導機構を示唆する結果や超伝導と伝導層内の異常な乱れ(おそらくBiの孤立電子対に起因する構造乱れ)の相関も観測されており、BiS₂系特有の新しい物理と化学を楽しみつつ研究を進めています。さらに、BiS₂系では高い熱電性能が観測され、またスピン材料としての可能性が示唆されており、多機能性層状物質としてもさらなる展開が期待できます。最近、JPSJにてBiS₂系特集号(超伝導・熱電に関する実験と理論のレビュー論文を10報掲載予定)を企画し、私自身も物質バリエーションを網羅したレビュー論文を執筆いたしました。興味をお持ちの方はぜひご一読ください。

BiS₂系超伝導体発見に対して凝縮系科学賞をいただき、私自身もBiS₂系超伝導体発見とこれまでの研究を振り返りました。探索開始当時は単なる思い付きだったのかもしれませんが、銅や鉄などの遷移金属を含まない超伝導体の探索に踏み出したことは、大きな一歩だったと思います。博士課程にて鉄系超伝導のフィーバーを経験した直後だったため、誰も研究をしていない分野を開拓することがリスク大ということも考えましたが、誰も見たことのない新奇な超伝導体への興味が勝った結果だったと思います。新物質探索は挑戦的な研究ですが、その分、達成時の喜びと評価は大きいです。大学院生や駆け出しの若手研究者のみなさまには、ぜひ新しいことに挑戦していただきたいと思います。

[1] Y. Mizuguchi *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 220510 (2012).

[2] Y. Mizuguchi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 114725 (2012).

[3] A. Ubaldini *et al.*, Physica C **470**, S356 (2010).



International Workshop on j-fermion Physics and Materials 会議報告

井澤 公一

大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

2018年12月4日から6日までの3日間にわたりニュージーランドのダニーデンにあるオタゴ大学でInternational Workshop on j-fermion Physics and Materialsが開催されました。ニュージーランドといえば、ロード・オブ・ザ・リングに出てくるような大自然を思い描く方がおられる（少なくともうちの秘書さんはそう想像していたようです）と思いますが、開催地ダニーデンは、それとは随分異なる趣のある街でした。南島南東部に位置するダニーデンは、1860年代に巻き起こったゴールドラッシュにより急速に発展した街で、スコットランドからの入植者が中心となって開拓が進められたため、その街並みにスコットランドの面影が強く残っていることが特徴として挙げられます。その街にあるニュージーランドで最も古く歴史ある大学が、今回の会場であるオタゴ大学です。1869年に設立された同大学では、ちょうど150周年記念のイベントを控えているためか、150と記された旗がキャンパスの至る所に掲げられていました。そのキャンパス内でひときわ目立っているのがクロックタワー・ビルディングと呼ばれるダニーデンを代表

する建物です。スコットランドのグラスゴー大学の建物がモデルになっているというその建物は、黒い玄武岩と白いオアマル産の石灰岩からなるツートンのデザインが特徴で、その美しい概観が印象的でした。キャンパス内にはそのような歴史的建造物だけでなく、モダンな建物も多数あります。ワークショップで使用したOtago Business Schoolの建物は、そのモダンな部類の建物で、中央部に広大な吹き抜けの空間があり、その空間の周りに隣接してセミナー室等の部屋がいくつも並んでいます。ワークショップでは、それらのうち、セミナー室一室を会場として使い、吹き抜けの空間でコーヒブレイクおよび昼食タイムを過ごしました。

ワークショップは、日本から14名、ニュージーランドから8名、オーストラリア、台湾から各1名の参加のもと、超伝導に関する講演を中心としたプログラムにそって進められました。ここでは、そのなかから領域外の講演を中心に紹介させていただきます。

初日は、Brydon氏（University of Otago）によるオープニングにつづき、同氏による“Surprises in time-reversal symmetry-breaking multiband superconductors”と題した講演がありました。準粒子の低エネルギー励起に由来するBogoliubovフェルミ面の議論が印象的でした。解釈にも依りますが、実験との整合性が気になるところです。その後、藤本氏（大阪大）による講演“Nematicity and Chirality in odd-parity superconductors with strong spin-orbit coupling”，続いて矢野氏（NSRRC）による講演“Taiwan’s cold triple axis spectrometer in OPAL reactor, ANSTO”がありました。実験装置の詳細や



クロックタワー・ビルディング



会議の様子。セッションとセッションの間には、コーヒーを飲みながらのじっくり議論がなされていました。

それで得られたデータの説明を聞き、領域内で中性子散乱の実験をされている方々にとっての新たな共同研究先になりうるグループ・施設として可能性があるように思いました。午後の楠瀬氏（明治大）による講演“Peculiar superconductivity with orbital degrees of freedom”では、mass-imbalanced superconductivityをはじめとした軌道自由度が重要な超伝導が議論されました。続いて橘高氏（物性研）による講演“Thermodynamic study of S_2RuO_4 : Identification of the superconducting gap structure”がありました。その後、Coffee & Discussionをはさみ、谷垣氏（東北大）による講演“Itinerant antiferromagnetic BaMn_2Pn_2 showing both negative and positive large magnetoresistance”，工藤氏（岡山大）による講演“Superconductivity in hexagonal BaPtAs with an ordered honeycomb network”，秋光氏（岡山大）による講演“Trial to carrier-doping in $\text{Sr}_2\text{IrO}_4/\text{Ba}_2\text{IrO}_4$ ”という順で領域の研究者による講演が続きました。

2日目は、Rachel氏（University of Melbourne）により“Two-dimensional topological superconductivity and quantum design of Majorana fermions”と題した講演があり、2次元超伝導島に渦がある場合の島の端でのマヨラナ状態の安定性とコンダクタンスの量子化の関係が論じられました。その後、池田氏（立命館大）による講演“First-principles analysis of heavy-electron superconductors”が行われました。続くRuck氏（Victoria University of Wellington）による講演“Influence of orbital and spin states on transport properties and superconductivity in rare

earth nitrides”では、 SmN や SmN/GdN superlatticeにおける超伝導が紹介され、磁気モーメントによる対破壊効果や超伝導の起源が議論されました。午後からは、大槻氏（岡山大）による講演“Recent progress on dynamical mean-field calculations of multi pole ordering”，および小林氏（岡山大）による講演“Chemical doping and superconductivity in bismuth compounds”の若手による2件の講演がありました。その後、Coffee & Discussionをはさみ、井澤（大阪大）による講演“Low temperature quasi particle transport in U-based unconventional superconductors”，網塚氏（北海道大）による講演“Electric-current induced magnetization in augmented-multipole ordered systems”，播磨氏（神戸大）による講演“Ordered state with a combination of 5f and 6d electrons in URu_2Si_2 ”という順で領域の研究者による講演がありました。

3日目は、Powell氏（The University of Queensland）により“Spin molecular-orbital coupling”と題した講演が行われました。この講演では、(N回対称性をもつ)分子やナノ構造を扱う際、それを構成する原子のspin-orbit couplingの線形結合ではなくspin molecular orbital coupling (SMOC)を考える必要があることが述べられ、 $\text{Mo}_3\text{S}_7(\text{dmit})_3$ を例にSMOCに基づく議論がなされました。続いてSöhnel氏（University of Auckland）による講演“Perfect Frustration? – Structure and geometrically frustrated magnetism of layered oxide-cluster compounds”，野原氏（岡山大）による講演“Exploration of new materials with conducting j-fermions”，坂井氏（兵

庫県立大) による講演 "Field-induced spin nematic phases in low-dimensional quantum antiferromagnets", Jeschke氏 (岡山大) による講演 "Spin liquids in hyperkagome and pyrochlore materials" があり, 最後に播磨領域代表によるClosing remarks にてワークショップは成功裏に終わりました。



今回, ニュージーランドでのワークショップということで, これまであまり交流のなかったニュージーランドの研究者との交流の場をもつ貴重な機会を得ることができました. 加えて, 今回のワークショップでは, Tea & Discussion あるいはCoffee & Discussion と称して, セッションの間の休憩時間が十分にとられていたのが良かったように思います. 最近, ワークショップ, 研究会という, 非常に多くのテーマを非常にタイトなスケジュールで扱うことになりがちですが, このような時間的余裕が充実したワークショップにつながったのではないかと思います. 実際, 参加者の皆さんは飲み物を飲みながらじっくり議論をするなどして, 有意義な時間を過ごすことができたのではないかと思います. 今後もこのような余裕のある

会議が増えることを期待します。

番外編

ワークショップ終了直前に振り返ってみたところ, 折角ニュージーランドまで来たのに「ニュージーランド (南半球) ならではの」というのに会することがほとんどなかったことに気付きました. 真面目にワークショップに参加した揺るぎない証拠かと思いますが,, 報告記事を書く立場としては, 折角なので読者の皆さんにも「ならではの」というものをお見せできないかと思い, すべてのプログラムが終わった後にそのような素材を探してみることにしました. 結論からいうと, いろいろと検討はしたのですが, 思いつきで始めた上に時間が限られていたこともあり, 残念ながらこれという素材をみつけるにまでは至りませんでした. 「ならではの」と思えるものとして, たとえば, ニュージーランドでは「南風が冷たい」という事実があります. しかし, これはさすがに紙面上でお見せすることは出来ません. 論外です. また, 「夏なのにオリオン座が見える, そしてそれは逆さを向いている」, 「月のウサギも逆さを向いている」, 「お昼には太陽が北にある」など, (見た者にとっては) それなりにインパクトのある風景があります. これらはどれもわかりやすいのでアリかもしれませんが, 仮にそれらを写真に撮って掲載しても, 北半球で撮影した写真を逆さまにするなどして掲載したのと区別が付かないでしょう. そもそも滞在期間中は天気が悪く, 月すら見ることは出来ていないので, 残念ながらボツ. ならば「南十字星」はどうか? これはまさに「ならではの」です. しかも運よく最終日の夜にかろうじてでは

ありますが、肉眼では見ることができました!しかし、暗すぎてスマホのカメラでは写らず、ボツ。見えていたのに、残念の一言。屋外がダメなら、ということで、渦が北半球と比べ逆に回転するか、ホテルの洗面台で実験を試みました。しかし、洗面台の形状、水の量など条件が合わなかったのか、全く渦が見えず、即ボツ。個人的には、空港から市街地までの間で撮影した「広大な牧場にいる羊の群れ」というのがそれらしいと思えました。しかし、北海道大学某A教授によると「帯広の風景と何ら変わらない」とのこと。実際、同教授の講演冒頭で北海道とニュージーランドの風景を並べ、どちらがニュージーランドかというクイズを出されていましたが、地元の人でも悩んでなかなか選べないという始末。そもそも今回は車の中から牧場を見ただけで、ダニーデンの街中に

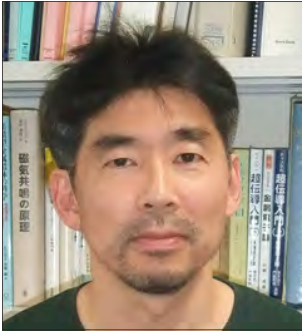
は牧場はなく、全く足を踏み入れていないので報告の素材としては適さないでしょう... そんなわけで、「ならでは」は、次の機会（あればですが）までの楽しみにしていただくとして、今回は、スマホで位置情報を表示している画面キャプチャーとWorkshop Dinnerで行った、セント・クレアからの景色を番外編報告としたいと思います。



確かに (?) 南半球です！



セント・クレアからの眺め。この先には南極大陸があるハズ・・・



J-Physics: Tropical Topical meeting 会議報告

神戸 振作

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 研究主席

はじめに

この研究会は12月13-14日に琉球大学50周年記念会館で開催され、35名の参加者がありました。琉大の與儀さんと私でオーガナイズさせていただきました。播磨代表に“TopicalではなくTropical meetingとしていいですか?”と尋ねたところ、“それでもいいけどTropical Topicalがいいのでは”となり会議名が決まりました。実際、会議中の沖縄は気温が20℃以上になり、本当にTropicalなムードのmeetingになりました。この研究会は、独立した2つの主題で構成されました。初日はKITのvon Löhneysen教授をお迎えして量子臨界現象研究の最近の発展について、2日目は琉大が発信した新しいスキルミオン系であるEuPtSiの物性について集中的に議論しました。



初日 量子臨界研究の最近の発展

7件の口頭発表がありました。重い電子系の量子臨界現象は、von LöhneysenグループのCeCu_{6-x}Au_x系の研究がいままでの発展の先駆けとなりました。その後もvon Löhneysen教授は精力的に研究を続けられており、今回はご自身の研究の発展に関する

reviewをしていただきました。

これまではLöhneysen教授の研究に代表される磁気転移の量子臨界現象が精力的に研究されていましたが、最近、価数転移の量子臨界現象も注目されています。ここでは価数転移量子臨界現象の理論（阪大 三宅）、価数揺動とその量子臨界現象の実験（阪大 竹内、琉大 大貫）、Sm系の磁場に強い重い電子系状態の理論（琉大 椎名）の発表がありました。量子臨界点に近いSm, Eu, Yb系の物性はCe系とはかなり異なったものであることが明らかになってきているようです。

一方、強磁性超伝導体URhGeやUCoGeでのIsing的なTricritical転移点付近での量子臨界現象と超伝導の関係は、新しい量子臨界現象として注目されています。その動的揺らぎに関するNMR実験（原子力機構 徳永）、巨視的物性とFermi面（東北大 青木）の2つの発表がありました。つい最近、URhGeと似た結晶構造を持つUTe₂でも超伝導が見出され、強磁性揺らぎに起因すると考えられています。今後の展開が楽しみです。

2日目 カイラル磁性体EuPtSiの電子物性

この日はさながら“今日は1日EuPtSiざんまい”となり、私のイントロを含めて11件の口頭発表がありました。物質開発（琉大 大貫）から始まり、巨視的物性（琉大 垣花）、中性子（原子力機構 金子）、共鳴X線（京大 田端）、メスバウアー（東北大 本間）、NMR・μSR（原子力機構 比嘉）、精密磁化測定（東大 榊原）と未発表の最新の成果も含めて、EuPtSiに関する実験結果をまとめて一挙に聞くことができたいに理解が深まりました。スキルミオン相があることは間違

いないようですが、詳細な同定にはまだまだ色々な実験をやる必要があるようです。今後の研究の進捗が楽しみです。

早大の望月さんには、最近のスキルミオン研究の動向について広範囲の主題を手際よくまとめていただきました。また、名工大の大原さんには、カイラル磁性体の物理の本質についての的を得た発表をしていただきました。この2つの講演のおかげで今後のEuPtSi研究指針がより明確になったと思います。最後に、播磨代表にまとめていただきました。



ポスター発表

ポスター発表は2日目の午後に行われ、14件の発表がありました。若い方の発表を中心に質の高い発表が多いセッションになり、議論も大いに盛り上がりました。今回は時間の制約上、口頭発表は招待講演だけだったので、大変良い発表もポスターになってしまったことを反省しております。

コーヒブレーク・懇親会

コーヒブレークでは與儀さんこだわりの毎回

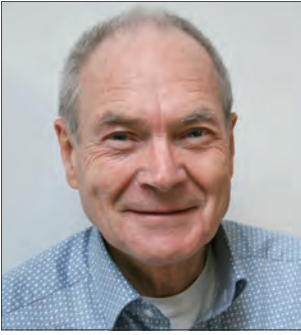
違った沖縄銘菓が並びました。サーターアンダギーも絶妙に揚がった厳選されたものでおもわず幾つも食べてしまいました。マドレーヌがあったので、“これって沖縄銘菓?”と聞いたところ與儀さんのお母様の手作りとのこと、まさに“沖縄銘菓”だと納得しました。

懇親会は、2日目夕に琉大に程近い沖縄料理店で開かれました。沖縄風の角部屋の開放的な大広間で琉球料理、泡盛を十分堪能しました。三線による沖縄民謡の演奏もあり、大いに盛り上がりました。また von Löhneysen 先生にうんちくあるディナースピーチもいただきました。私は23時頃に失礼しましたが、その後も盛り上がっていたようです。南国の夜は長いのです。

まとめ

今回の研究会では、主題を一つの化合物EuPtSiに絞って集中的に議論しました。このような形式の研究会も研究進展のある局面では有効だと思いました。また、 f 電子系の量子臨界現象も20年以上研究の歴史がありますが、まだまだ、これから新たな研究主題が現れてくると思いました。2つの主題の今後の発展が楽しみです。

今回は、琉球大の皆様大変お世話になりました。與儀、仲間、辺土さんをはじめ、学生さんにも色々とお手伝いいただきました。紙面を借りて厚くお礼申し上げます。



Multidimensional entropy landscape of quantum criticality

Hilbert v. Löhneysen

Karlsruhe Institute of Technology, 76131 Karlsruhe, Germany

It was a great privilege and pleasure for me to be invited by Prof. Hisatomo Harima, spokesperson of the program J-Physics: Physics of Conductive Multipole Systems, and Prof. Yoshichika Ōnuki, professor at the University of the Ryukyus, to participate in the Tropical Topical Meeting on “Recent topics related with quantum critical phenomena” in Okinawa on December 13-14, 2018 and give a lecture on recent advances in quantum criticality of correlated materials as briefly summarized in the following.

Application of stress to and the resultant strain in a system are important parameters to tune a heavy-fermion metal – by virtue of the competition between Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida interaction and Kondo effect which both depend on the exchange interaction J between localized $4f$ or $5f$ moments and conduction electrons – to a quantum critical point (QCP) where the transition temperature of a second-order transition between a long-range ordered antiferromagnet and a Pauli paramagnet becomes zero. Often, hydrostatic pressure is used as a tuning parameter. We recently found [1] that for the canonical quantum-critical heavy-fermion system $\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$ with $x = 0.1$, an anisotropic stress component, a so-called pure shear stress in addition to hydrostatic pressure, provides the most efficient way to tune the system to a quantum-critical point. It is important to realize that, although the entropy S has to go to zero at a quantum critical point, S can be quite large at finite albeit small temperatures and, as a matter of fact, can plunge to

zero with a vertical tangent.

The stress dependence of S along the three principal directions i ($i = a, b, c$) of the orthorhombic crystal structure (neglecting the minute monoclinic distortion which does not affect the magnetic quantum criticality, as we showed recently [2]), is directly obtained from measurements of the linear thermal-expansion coefficients:

$$\alpha_i = L_i^{-1} (\partial L_i / \partial T) = \partial \varepsilon_i / \partial T = -V^{-1} (\partial S / \partial \sigma_i) \quad (1)$$

where ε_i and σ_i are strain and stress (uniaxial pressure), respectively, along the i direction. For anisotropic systems such as $\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$, it is useful to consider, besides the hydrostatic pressure which can be written in three-dimensional stress space as $\vec{p} = p(1,1,1)$ for systems of orthorhombic or higher crystal symmetry, the so-called pure shear stresses $\vec{\sigma}_{(lm)} = \vec{\sigma}_l - \vec{\sigma}_m$ with $\vec{\sigma}_l \cdot \vec{\sigma}_m = 0$ for $l \neq m$ with $l, m \in \{a, b, c\}$. By definition, the pure shear stresses $\vec{\sigma}_{(lm)}$ are orthogonal to $\vec{p}$. In Fig. 1, the directions of $\vec{p}$ and $\vec{\sigma}_{(lm)}$ are indicated as blue arrows. Of course, the effect of pure shear stress on the entropy can be obtained from the measured σ_i and calculated from Eq. (1). Fig. 1 shows, as a result of this analysis, the steepest descent of $S(\vec{\sigma})$, i. e., $\vec{\nabla} S = (\partial S / \partial \sigma_a, \partial S / \partial \sigma_b, \partial S / \partial \sigma_c)$. While $\vec{p}$ definitely drives the system towards quantum criticality as shown experimentally in a number of studies (see [3] and references therein), it is not parallel to $\vec{\nabla} S$. Rather, the additional application of pure shear stress $\vec{\sigma}_{(ca)}$ produces the steepest gradient of $\vec{\nabla} S$.

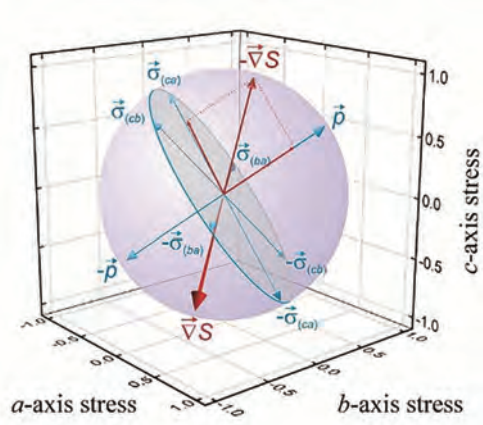


Fig. 1. Pictorial illustration of the anisotropic stress dependence of the entropy S . The red arrow represents the stress combination leading to the steepest slope of $\vec{\nabla}S$ aiming at the QCP. For all perpendicular stress directions, $\partial S/\partial \sigma$ vanishes. The blue arrow indicates the hydrostatic pressure $\vec{p}$. The blue plane perpendicular to $\vec{p}$ represents the possible pure-shear-stress combinations (thinner blue arrows for an orthorhombic Cartesian system $\vec{\sigma}_{(ij)}$). As shown by the dashed red lines, $\vec{\nabla}S$ has a hydrostatic component and one which is nearly parallel to $\vec{\sigma}_{(ca)}$. On the other hand, the pure shear stress $\vec{\sigma}_{(cb)}$ is approximately perpendicular to $\vec{\nabla}S$. Accordingly, the corresponding Grüneisen Parameter $\Gamma_{(cb)} \equiv \Gamma_c - \Gamma_b$ does not diverge at low T . “Tuning” the system along directions orthogonal to the steepest slope $\vec{\nabla}S$ will leave the distance to the QCP unchanged. This coincidence should not be misinterpreted as indicating Fermi-liquid behavior for that particular stress combination.

It is particularly noteworthy that the anisotropic pure shear stress $\vec{\sigma}_{(ca)}$ which is instrumental in driving the material to a QCP, can be related to the anisotropy of quantum-critical fluctuations observed by inelastic neutron scattering [4] which for $\text{CeCu}_{5.9}\text{Au}_{0.1}$ can be viewed as one-dimensional features in reciprocal space [Fig. 2 (left)], corresponding to planes in real space. Fig. 2 (left) depicts those planes. Although this finding constitutes one of the first examples of a direct link between macroscopic and microscopic features near quantum criticality, further work, including a derivation of the band structure of this complex strongly correlated material, is necessary to arrive at a full understanding of quantum criticality in this material.

In conclusion, taking full account of the anisotropy of

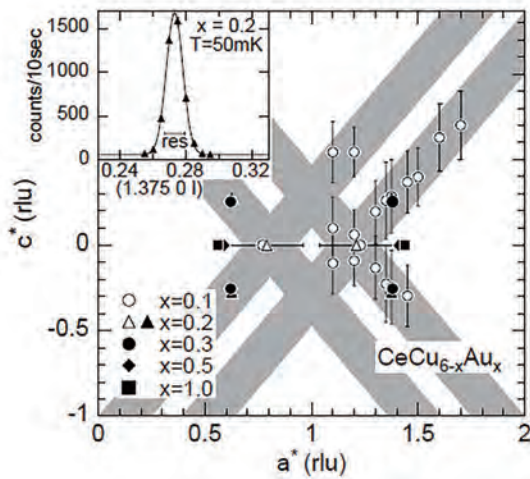


Fig. 2. Left : Dynamic correlations ($x = 0.1$, $\hbar\omega = 0.1$ meV, $T < 100$ mK, open circles) and magnetic Bragg peaks ($x = 0.2 - 1$) in the reciprocal ac plane of $\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$. The vertical and horizontal bars indicate the linewidth for $x = 0.1$. The four rods are related by the orthorhombic symmetry (space group $Pnma$). Here we ignore a small monoclinic distortion ($<1^\circ$) at low temperatures. The open triangles for $x = 0.2$ represent short-range ordering peaks. Note that the correct $a^*:c^*$ aspect ratio has been taken into account even though the axes are labeled in reciprocal-lattice units (rlu). The inset shows a resolution-limited magnetic Bragg peak for $x = 0.2$ at $T = 50$ mK [elastic scan at $(1.375 \ 0 \ 1)$].

Right : Illustration of the effect of the pure shear stress $\vec{\sigma}_{(ca)}$ in the ac plane on the two-dimensional critical spin fluctuations of $\text{CeCu}_{5.9}\text{Au}_{0.1}$. The elongation of the c axis together with the reduction of the a axis leads to a tilting of the planes of critical fluctuations against each other.

Fig. 3. Visit to Shuri Castle with Prof Ōnuki and his wife, and Prof. Miyake.



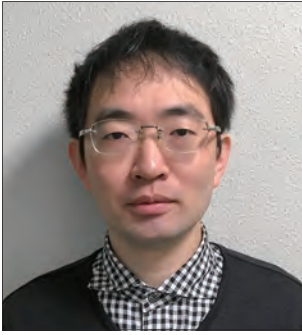
CeCu_{6-x}Au_x near quantum criticality by introducing stress along the different crystallographic directions acting as different tuning parameters to derive the entropy landscape, is just the first step towards a multidimensional entropy landscape. As a further perspective, we note that this might entail discovery of different routes to quantum criticality in the spirit of a multidimensional (or “global”) phase diagram of quantum criticality.

The talks by K. Miyake, T. Takeuchi, Y. Ōnuki, Y. Tokunaga, and D. Aoki on Thursday, December 13 reported new interesting developments in the field of quantum criticality. Of course, it was a challenge for me to follow the talks on Friday since they were all delivered in Japanese. Nonetheless, because the talks focused on the newly discovered skyrmion-lattice material EuPtSi with the same space group as the archetypal skyrmion system MnSi and the very informative viewgraphs were mostly in English, I was able to follow the presentations. As a reward, I enjoyed a superb Japanese conference banquet.

Besides the visit to the Faculty of Science of the University of the Ryukyus which included an extended lab tour of Prof. Ōnuki's group and scientific discussions with Prof. Ōnuki and Prof. Shiina, I was

intrigued by the cultural and historic aspects of my first visit to Okinawa. On Wednesday, December 12, Prof. Ōnuki and his wife took Prof. Miyake and me to Senaga Island where we met their son Toshio who is professor for German history at the University of Okayama and his wife and daughter, and had a delicious lunch together with a nice conversation (partly in German). We then visited Shuri Castle which was a true highlight. I was impressed by the reconstruction of the castle and I learned a lot about the history of Okinawa. The visit to Shuri castle included a traditional tea ceremony. In order to get more of the “island feeling” being on Okinawa, I tried to spot a beach on Saturday, December 15. I was lucky to find a beautiful beach in Nakagusuku close to Yoshinoura Park, just a one-hour walk from the university guest house. In conclusion, I wish to thank J-Physics and Prof. Harima for financial support and Prof. Ōnuki and his wife for their truly remarkable and memorable hospitality.

-
- [1] K. Grube, S. Zaum, O. Stockert, Q. Si, H. v. Löhneysen, *Multidimensional entropy landscape of quantum criticality*, Nature Phys. **13**, 742 (2017).
[2] K. Grube, L. Pintschovius, F. Weber, J. P. Castellán, S. Zaum, S. Kuntz, P. Schweiss, O. Stockert, S. Bachus, Y. Shimura, V. Fritsch, H. v. Löhneysen, *Magnetic and structural quantum phase transitions in CeCu_{6-x}Au_x are independent*, Phys. Rev. Lett. **121**, 087203 (2018).
[3] A. Hamann, O. Stockert, V. Fritsch, K. Grube, A. Schneidewind, H. v. Löhneysen, *Evolution of the magnetic structure in CeCu_{5.5}Au_{0.5} under pressure towards quantum criticality*, Phys. Rev. Lett. **110**, 096404 (2013).
[4] O. Stockert, H. v. Löhneysen, A. Rosch, N. Pyka, M. Loewenhaupt, *Two-dimensional fluctuations at the quantum-critical point of CeCu_{6-x}Au_x*, Phys. Rev. Lett. **80**, 5627 (1998).



J-Physics トピカルミーティング 「拡張多極子研究の進展と展望」に参加して

高阪 勇輔

岡山大学 異分野基礎科学研究所 特任助教

世間ではインフルエンザが猛威を振るう中、2019年1月21～22日にJ-Physics トピカルミーティング「拡張多極子研究の進展と展望」が明治大学・駿河台キャンパス・グローバルフロントで開催された。

個人的な話になるが、私は大学生時代の部活動として英語ディベートに熱中していた。当時、東日本で開催されたディベート大会は交通の便の良い明治大学・駿河台キャンパスで開催されることが多く、足繁く通った場所である。17年ぶりに御茶ノ水駅・水橋口を出て明治大学へ向かうと、当時の面影が十分に残っておりとても懐かしい感情に襲われた。トピカルミーティングの会場であるグローバルフロントは、当時、11号館と呼ばれた建物があり、数々のディベートの名勝負が繰り広げられた聖地でもあった。不本意な結果で涙した先輩の引退試合も11号館だったなあ…と全く研究と関係の無いことに思いを巡らせながら、最近、グローバルフロントとして建て替えられた会場に到着した。

トピカルミーティングは、網塚氏による研究会の主旨説明及び金属反強磁性体における電気磁気効果に関する発表から開始された。研究会はほぼプログラム通り進行したが、21日に楠瀬氏の講演が急遽キャンセルされた関係上、そのスロットで速水氏が代わりに発表した。元々、速水氏は22日に講演があったので、21日と22日に計2回、異なる内容でプレゼンテーションを行ったことになる。また、筆者(高阪)も最近得られた研究成果を発表した。大学卒業から10年以上経過して、思い出の地で再びプレゼンテーションすることになるとは夢にも思わなかった事態である。22日の昼食前に参加者による記念撮影

(図1)を行い、同日の最後に、播磨氏による URu_2Si_2 の隠れた秩序に関する発表があった後、J-Physicsの最終年度に向けての説明がありトピカルミーティングの全プログラムは終了した。

また、21日に開催された懇談会は、駿河台キャンパス内にあるリバティータワーの最上階である23階で開催された。窓からは東京タワーを含めた東京の夜景を一望することが出来、なかなか出来ない貴重な体験をすることが出来た。

このような素敵な研究会を開催することが出来たのは、楠瀬氏による会場確保といった粘り強い交渉があったからであることは間違いない。しかし、楠瀬氏が研究会当日にインフルエンザで欠席することになったのは本人にとって無念であったことは容易に想像できる。この原稿を執筆している頃には既に回復されていると私は信じているが、この場をかりて感謝申し上げ、筆を置くことにする。



図1 研究会の参加者による記念撮影



岡本佳比古さん サー・マーティン・ウッド賞受賞

野原 実

岡山大学異分野基礎科学研究所 教授

公募研究メンバーである名古屋大学の岡本佳比古さんが、ミレニアム・サイエンス・フォーラム主催の第20回サー・マーティン・ウッド賞を受賞されました。「機能性電子相の創出」の研究業績が高く評価されたものです。2018年11月9日(金)に受賞式と記念講演が東京都内のホテル椿山荘で行われ、駐日英国大使館のキノシタ公使参事官より賞状とメダルが授与されました。岡本さんには、英国各地の大学への講演旅行の機会が与えられるそうです。ころより、お祝い申し上げます。

ミレニアム・サイエンス・フォーラムは1999年3月に日英の科学技術交流のために創設されたもので、その活動のひとつにサー・マーティン・ウッド賞があります。広い意味の凝縮系科学の分野において優れた業績をあげた40歳以下の若手研究者が対象です。例年は、半蔵門にある駐日英国大使館で受賞式が行われています。サー・マーティン・ウッドは、この賞のサポーターである英国科学機器メーカー、オックスフォード・インストルメンツの創業者で、毎年、講演旅行の機会に、受賞者をご自宅にお招きしているとのこと。

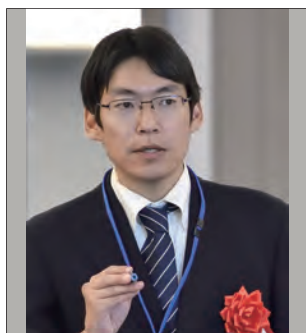
記念講演では、“Exploration of Novel Physical Properties and Functions of Transition Metal Compounds Based on the Unique Electronic and Crystal Structure”と題して、結晶構造とバンド構造のデータベースを駆使して新物質を開発するという、

岡本さんならではの研究手法が、高性能熱電材料 Ta_4SiTe_4 [1] とノーダルライン半金属 CaAgP と CaAgAs [2,3] の開発を例にして、生き活きと語られました。

岡本さんは、これまでに、スピン液体状態を示すハイパーカゴメ物質 $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ [4] やカゴメ反強磁性体 $\text{BaCu}_3\text{V}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$ [5] などの革新的な物質を次々と開発してきました。これらの物質開発は、固体化学の知見に基づいて、特異な結晶構造とスピン間の相互作用を実現したものといえます。名古屋大学では、若手の理論家たちとも協力して、電子構造の知見も取り入れた物質開発を進めたことが、新しい電気伝導相の創出につながったのだと思います。現代的な物質開発の方法論にさらに磨きをかけ、さらに新しい電子相を見出されるよう、今後のご活躍を期待します。



- [1] T. Inohara, Y. Okamoto, Y. Yamakawa, A. Yamakage, and K. Takenaka, Appl. Phys. Lett. **110**, 183901 (2017).
- [2] Y. Okamoto, T. Inohara, A. Yamakage, Y. Yamakawa, and K. Takenaka, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 123701 (2016).
- [3] A. Yamakage, Y. Yamakawa, Y. Tanaka, and Y. Okamoto, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 013708 (2016).
- [4] Y. Okamoto, M. Nohara, H. Aruga-Katori, and H. Takagi, Phys. Rev. Lett. **99**, 137207 (2007).
- [5] Y. Okamoto, Y. Yoshida, and Z. Hiroi, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 033701 (2009).



第20回サー・マーティン・ウッド賞を受賞して

岡本 佳比古

名古屋大学大学院工学研究科 准教授

このたび、第20回サー・マーティン・ウッド賞を受賞いたしましたので、謹んでご報告申し上げます。サー・マーティン・ウッド賞は、オックスフォード・インストゥルメンツ株式会社より寄せられた寄附金を基に、凝縮系科学の分野で業績を挙げた日本の研究機関に所属する40歳以下の若手研究者を表彰するもので、20年にわたる歴史のある賞です。過去の受賞者を見渡すと正に錚々たる顔ぶれであり、私がこのリストに名を連ねることは全くもって役不足ではありません。しかし、このような栄誉ある賞をいただけることになったことについては、大変嬉しく、光栄に思っております。このたびの受賞では、私が大学院生であったころから現在に至るまで、17年にわたり行ってきた物質開拓研究を評価していただきました。学位取得時の指導教員である高木英典先生、野原実先生をはじめとする、多くの方々にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

受賞の対象となった研究課題は、「特徴的な電子構造・結晶構造に着目した遷移金属化合物の物性・機能開拓」です。銅酸化物や鉄系の高温超伝導体の発見に代表されるように、新奇な電子物性や電子機能を示すd電子系物質の発見は、固体物理学の新時代を拓き続けてきたといつてよいと思います。そのような新奇物質の発見を目指して、私はこれまで一貫して遷移金属化合物の物質開拓を行ってきました。物質開拓において私が頼りとしてきたツールの一つが、結晶構造や第一原理計算などのデータベースです。各種のデータベースを駆使することで得られる結晶構造と電子構造に関する膨大な情報を固体化学の知識に基づいて整理する、それにより、

熱電変換材料、ノードルライン半金属、新超伝導体、金属絶縁体転移物質、幾何学的フラストレート磁性体といった、様々な興味深い電子物性・革新的な電子機能を示す候補物質を見出すことができました。ここでは、第一原理計算データベースと結晶構造データベースがそれぞれ役立った例として、新しい熱電変換材料の候補物質と幾何学的フラストレート系物質の開拓について紹介します。

熱電冷却（ペルチェ冷却）は固体中の電子の熱輸送を用いたヒートポンプであり、全固体の冷却技術として期待されています。しかし、既存の熱電変換材料を用いた素子の性能が他の冷却技術と比べて低く、現状では室温付近における限られた実用に留まります。我々は、第一原理計算のデータベースを用いて高性能な新材料となりうる物質をサーベイし、 Ta_4SiTe_4 に辿り着きました。この物質はこれまで熱電変換材料として研究されたことはありませんでしたが、針状試料を合成し、熱起電力と電気抵抗率を測定したところ、100-200 Kにおいて $-400 \mu\text{V K}^{-1}$ を超える大きな負の熱起電力と約 $2 \text{ m}\Omega \text{ cm}$ の低い電気抵抗率を示しました。この結果は、 Ta_4SiTe_4 が低温領域で実用水準を超える高い熱電変換性能をもつことを意味します。このような低温における高い性能は、この物質が「スピン軌道ギャップが開いた一次元ディラック電子系」といえる特徴的な電子構造をもつことに起因していると考えられており、同様の特徴をもつ物質の開拓により、さらなる高性能材料が実現すると期待されます。この研究は、私が現在所属する名古屋大学工学研究科竹中研究室の皆様と、J-Physicsにて私が代表者を務める公募研究におい

て連携研究者をされている名古屋大学理学研究科の山川洋一・山影相両氏との共同研究により行われました。

幾何学的フラストレート系の物質開拓は、大学院生だった頃から現在に至るまで途切れることなく行ってきた、私にとって長い付き合いとなった研究です。とりわけ、東京大学物性研究所廣井研究室にて助教を務めていたころ、最も集中して物質開拓に取り組みました。この研究が何から始まったかというと、ハイパーカゴメ $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ に辿りつきます。私の修士論文の課題は先ほども述べた熱電変換材料の探索だったのですが、当時一世を風靡していた熱電変換材料候補 Na_xCoO_2 の関連物質を調査する過程で、 $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ という物質において局在スピンのカゴメ格子の三次元版とも呼べる特徴的な格子を形成していることに気付きました。それ以来、結晶構造の特徴が電子物性の面白さや多彩さに直結する幾何学的フラストレート系の魅力にはまり、物質開拓を続けています。ベシニエイト $\text{BaCu}_3\text{V}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$ に代表されるカゴメ銅鉬物、J-Physicsのメンバーの皆さんにはおなじみの結晶構造をもつ $\text{YMn}_2\text{Zn}_{20}$ やブリージングパイロクロア $\text{LiInCr}_4\text{O}_8$ など、これまで物性が報告されていないまっさらな物質をいくつも研究する機会に恵まれました。特に、物性が未報告のフラストレート物質を合成し、初めて物性測定するときの楽しさは、なかなか得難いものです。

最後に、このように大変栄誉ある賞をいただくことができたが、改めて自分の研究を振り返ると、「候補」でない、真に面白い電子物性を示す新物質や革新的な電子機能を示す新材料を私が見出して

こられたかということ、まだまだ不十分と思います。今後の研究で、何とかそのような物質を確立したいと考えておりますので、今後ともご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。



海外派遣制度による チューリッヒ滞在の報告

角田 峻太郎

京都大学大学院理学研究科 博士後期課程2年

国際活動支援班「J-Physics : 多極子伝導系の物理の国際展開」からの援助を頂き、2018年5月31日から6月21日までの約3週間、スイス連邦工科大学チューリッヒ校(ETH Zürich)のProf. Manfred Sigristの研究室に滞在しました。向こうのグループの方々と議論させて頂いたことをはじめ、現地での生活等についても報告します。

滞在先の研究室はHönggerbergという、丘の上に建っているキャンパスにありました。ガラス張りの建物で、居室もガラスの壁に囲まれていました。廊下から丸見えなので最初は落ち着きませんでしたが、慣れると適度な開放感と緊張感で、良い研究環境だなと思いました。私の居室は建物の角にあったのでベランダからの眺めも良く、またコーヒーマーカーが徒歩5秒のところであり(1スイスフラン≒120円でいつでもコーヒーが飲める)、行き詰まったときも気分転換がしやすかったです。

現地では、まず最初に自分の研究紹介を兼ねてセミナーをさせて頂きました。参加者はさほど多くありませんでしたが、発表を皆さん熱心に聞いてくれたように思います(発表の後でSigristさんに「ムズカシイ～」と言われたのでどこまで伝わっていたか分かり

ませんが…。Sigristさんは毎日かなりお忙しい様子でしたが、それでも3回ほど、現在私が興味を持っている多極子揺らぎに媒介される超伝導について議論に付き合ってくださいました。スピン揺らぎ媒介超伝導に造詣が深い方なので、非常に参考になるコメントをいくつか頂けたと思います。ちなみに、Sigristさんは物理の議論をするときは英語でしたが、それ以外の日常会話は日本語で話してくださいました。だいぶ忘れていたとはおっしゃっていましたが、かなり流暢な日本語で驚きました。

Sigristさんの他には、ポスドクのDr. Fischerとも議論させて頂きました。彼とは主に超伝導ギャップ構造の群論的・トポロジカル的分類についての話をしました。私が興味ある候補物質の1つとして考えていたSrPtAsという超伝導体についての研究を彼も以前行っていたためです。フランクな方で、私の拙い英会話にも笑顔で根気よく付き合ってくださいあってありがたかったです。私の提案を「面白い」と言ってくれて、「もっと知りたいから君の論文教えてや!」と言って頂けたのは(英語がちゃんと伝わったことを含めて)非常に嬉しかったです。なお、このとき議論した内容を含む新しい論文を既に投稿済みですので、興味のある方がいれば是非ご覧ください[1]。今回の海外派遣の支援により研究が進み、このように論文にすることができたことを、この場を借りて感謝申し上げます。

6月のチューリッヒは京都に比べて湿度が低く、暑すぎず大変快適でした。チューリッヒ中央駅が滞在



居室からの景色。オンボロスマホで撮ったので綺麗に見えませんが良い眺めです。

[1] S. Sumita, T. Nomoto, K. Shiozaki, and Y. Yanase, arXiv:1811.08627.



街中で撮れたスイス感満載の写真。



Uetliberg 山からの景色。チューリッヒ湖を一望。

していたアパートからトラムで10分程のところであり、付近にお店も多いためよく利用していました。交通整備が行き届いているのか、トラムもバスも混雑することがほとんどなかったです。中央駅付近は人が多かったですが、治安も良く、初めての単身海外だった私にとっても安心でした。道路を横断しようとしていると車が絶対停まってくれるところにも、現地の人たちのマナーの良さを感じました。

チューリッヒはドイツ語圏ですが、基本的に英語が通じるのでそこは安心でした。唯一困ったのは、スーパーの商品がドイツ語表記なので見た目で判断できない商品は何だか分からないことです。一度、シャンプーかなと思って買った商品がボディソープだったこともありましたが(髪が全然泡立たない…)。なお、後で調べるとシャンプーはドイツ語でもShampooなので実は迷う必要が無かったようです。

中央駅付近で気に入ったのは、Sprüngli (シュプリングリ)というチョコレートとマカロンのお店です。どちらもかなりの種類があって迷ってしまいますが、何人かにお土産で配ったチョコレートはどれも好評でした。マカロンはLuxemburgerli (ルクセンブルゲリ)というそうで、日持ちがしない上に店舗がスイスにしか無いため是非食べておきたい商品とのこと(ネット情報)。私は5種類ほど違う味を買って食べましたが非常に美味しかったです。お土産にできないのが残念。

休日には何回か観光に出かけました。気軽に行けるくらいの距離にUetliberg山があったので登ってきました。登ったと言っても頂上付近まで電車で行くことができたので、実際には電車を降りて10分程整備された道を歩くだけでした(麓からマウンテンバイク

で登っている人たちも多くいましたが私には無理です)。頂上には展望塔があって、その上からはチューリッヒ湖を一望できるのでなかなか壮観でした(右上の写真)。

別日にはそのチューリッヒ湖の北側を船で1時間程度周遊することもしました。船上で風を切るのは涼しくて気持ち良かったです。湖で泳いでいる人たちも見かけましたが、まだ寒いのでは…と思いました(周辺にプール等がないので湖で泳ぐことが多い)。その後、かねてより食べたいと思っていたチーズフォンデュに挑戦。白ワインがたっぷり入ったチーズは非常に美味しかったのですが、一人で食べるには量が多すぎました。カゴ一杯のバゲットをやっと完食したと思ったら、まだチーズが残っていたため店員さんが追加のバゲットを持ってきて死ぬかと思いました。ようやくチーズが無くなったかと思えば、今度は鍋の底に残ったチーズの「おこげ」を取って皿の上に。店員さん、もう限界です(泣)。ちなみに後でこのことをSigristさんに話すと、「チーズフォンデュは冬にみんなで食べるもんだ。君は全部間違ってるよ」と言われました。

3週間という長くはない期間でしたが、チューリッヒでは充実した時間を過ごすことができました。英会話が得意でないこともあって当初はかなり不安だったのですが、行って良かったと思っています(英語発表も少しマシになりました)。ETHは研究者・環境共にとても質の高いところだと感じたので、それを見習いつつ機会があればまた訪問したいと思っています。もし、これから海外派遣を考えておられる方がいれば、ETHも候補に入れてみることをお勧めします。



ドレスデン滞在記

藤井 拓斗

兵庫県立大院 物質理学研究科 博士後期課程1年

安岡 弘志

MPI-CPFS (Dresden)
Visiting Professor

Michael Baenitz

MPI-CPFS (Dresden)
Group Leader

水戸 毅

兵庫県立大院
物質理学研究科 教授

J-Physics 若手研究者の国際相互派遣に採用して頂き、ドイツ・ドレスデンのMax Planck Institute Chemical Physics for Solid(MPI-CPFS)の核磁気共鳴(NMR)グループに8日間滞在させて頂きました。このグループはPhysics Quantum Materialという8つのグループからなる分野のうちの一つのグループで、メンバーはProf. Michael Baenitz先生と安岡弘志先生、ポスドクの方が1人の3名で構成されています。このような機会を頂きましたので、これまでの研究とは異なる視点、技術などを学べることを期待し、挑みました。

ここでは、派遣先での日常生活や研究生活について述べ、今後、海外で研究される方などの参考になれば幸いです。

ドレスデンでの日常生活について

まず海外派遣の洗礼として、私の渡航は搭乗予定のフライトのキャンセル、機長のダブルブッキングでの遅延、度重なる不運により、フランクフルト空港で9時間ほどの足止めから始まりました。しかし、その状況下で状況を見知らぬ方々に聞いて回ったことで、海外の方とコミュニケーションを取ることのハードルが下がったように思います。

ドレスデンは、市街地には歴史的な建物が多く建ち並ぶ、情緒あふれる趣深さがある街です。博物館なども多いため、休日にはそれらを巡るなどしていました。博物館はどこの国際学生証を持っていれば、

5ユーロ(650円程度)支払えば入場できるため、学生の方々が海外に行く際は、国際学生証を発行しておくことをお勧めします。また、安岡先生ご夫妻には観光名所に連れて行って頂き、一人では見つけれなかった穴場にも行くことができました。食事に関しては、ドイツといえばソーセージにジャガイモにビールといったイメージがありましたが、他にも多くの郷土料理などがあり、日本人の口に合うものが多いように感じました。さらに、滞在していた研究所のゲストハウスには共用のキッチンがあり、平日は基本的にそこで自炊をしていました。研究所の近くにはスーパーマーケットがあり、日本に比べて非常に安価に野菜や果物を購入できます。私と同様に短期的に滞在しているPhDやポスドクの方々とキッチンで世間話や研究の話をすることで、多くの方々と交流することができました。8月初旬にJ-PhysicsのワークショップがMax Planck Instituteにて開催された際には、ゲストハウスに多くの方が滞在されていたので、より多くの交流する機会が得られました。

研究生活について

研究を進めるリズムとしては、週に2回程度、他のグループのメンバーも含めたミーティングを行い、今後どのようなデータが必要であるか、また他の実験手法を用いて調べることで明らかにできることはないかなどが話合われました。その後、実際に実験などを行い、再び議論するということを繰り返してい

ました。私もその場で測定した結果をプレゼンテーションする機会を度々頂いたため、多くの人と議論を行うことができ、英語でプレゼンテーションする練習にもなりました。私の滞在中の主な研究対象物質は、ワイル半金属物質でしたが、そのミーティングでは、様々な物質研究が取り上げられ、議論されたため、深くだけでなく、知識を広げることに役立ちました。さらに、今回の滞在期間が、週に一回程度のペースでPhDやポスドク向けのセミナーが開かれるセミナー期間であったため、主に物性理論の연구원の方々がバンド計算の手法などを基礎から説明してくださるセミナーに参加でき、有意義な時間を過ごしました。

実験の面では、安岡先生の下で物理については勿論、NMR測定技術と解析手法の指導を受けるという貴重な体験をさせて頂きました。研究グループで圧力下NMR測定の導入に関わり、圧力セル用のプローブの作成を議論しながら行いました。私が、圧力セルのセットアップの方法についてポスドクの方に拙い英語で説明しても、根気よく聞いてくださり、圧力下実験の導入ができました。高圧に関する共同研究では、他の主に圧力下実験を専門としているグループとの交流もでき、私の知っている圧力技術とは異なる部分も学ぶことができ、当初の目的であった、これまでとは異なる視点・技術を学ぶことを達成することができたように思います。

おわりに

滞在を受け入れて頂き、今回の滞在中に行った研究について今後も共同研究として進めさせて頂くため

に、再滞在にご尽力頂いた、Michael Baenitz先生、公私ともにお世話になりました安岡先生ご夫妻に感謝を申し上げます。

最後となりますが、J-Physics若手相互派遣の機会を頂き、大変貴重な体験をさせて頂いた、J-Physics播磨代表、藤教授、水戸教授、関係者の皆様、この場をお借りしてお礼申し上げます。



写真：エルベ川沿いの彫刻前での写真。左から著者、安岡先生、水戸教授



My maiden visit to Japan for collaborative research work and subsequently attending J-Physics 2018: Summer School and International Workshop

Rajib Mondal

Post-doctoral Fellow, DCMP&MS, TIFR, Mumbai, India

Prof. A. Thamizhavel

DCMP&MS, TIFR,
Mumbai, India

I was very much delighted to get support from J-Physics for my first ever visit to Japan for a collaborative research work with Prof. Dai Aoki at IMR, Tohoku University, Oarai, Japan and to present some of our current research work in the J-Physics 2018: Summer School and International Workshop on New Materials and Crystal Growth held during June 24-30, 2018. During this visit I was along with my mentor Prof. Arumugam Thamizhavel who delivered an invited talk on the various aspects of crystal growth and our current research work. The overall experience during my first visit was awesome. Since I had heard a lot about the beautiful places and soft spoken hard working people over there, I had always a dream to visit Japan and my dream came true through this program. The first part of our visit started with the collaborative research work extended by Prof. Dai Aoki. We successfully performed de Haas-van Alphen (dHvA) experiments to map the Fermi surface topology on the single crystalline WSi_2 compound grown at TIFR, Mumbai, India. We had very fruitful discussion with Prof. Dai Aoki and other lab. members on various aspects of dHvA effect. The immense help and supports extended by Dr. Nakamura-san, Dr. Honda-san, Dr. Arvind Maurya, Mr. Sato-san are gratefully acknowledged. We

Prof. Dai Aoki

IMR, Tohoku University,
Japan

would Like to thank Prof. Dai Aoki for providing us such a wonderful local hospitality at the Tohoku University guest house at Oarai, Japan. The last part of the program was to participate J-Physics 2018: Summer School and International Workshop on New Materials and Crystal Growth, held at Awaji Yumebutai International Conference Center during June 24-30, 2018. I had the opportunity to experience Shinkansen travel to reach the venue. The scenic beauty and local environment of the venue for the workshop were awesome. Both the workshop and summer school were very well organized. The seminar delivered by eminent physicists and scientists from all around the world during the summer school and workshop was very rich. It was a great opportunity for me to gather and learn very good physics about the growth of variety of single crystals and the richness and variety of their physical properties. It was a nice platform for me to interact with the experts in my research area. It was my great experience to discuss with Prof. Y. Onuki regarding our dHvA data on WSi_2 measured at IMR, Tohoku University, Japan. His expertise in that field enabled us to understand our data and he showed us various features which one should look into while explaining the dHvA data. I enjoyed the various lectures on J-physics: multipole physics,

superconductivity, dHvA in high magnetic field, Kondo effect in Ce-based compounds etc. During the summer school and workshop, I have presented our poster on the single crystal growth and various physical property studies of CeTAs_2 ($T = \text{Cu, Ag}$). The part of the work presented during the summer school and workshop has been published in Physical Review B [1]. CeTAs_2 ($T = \text{Cu, Ag}$) have drawn much attention due to their unusual structural and physical properties [2-3]. The single crystals of CeTAs_2 ($T = \text{Cu, Ag}$) were grown using self-flux method with the help of Ag-As and Cu-As binary eutectic composition as flux, respectively. The single crystalline CeCuAs_2 is found to crystallize in HfCuSi_2 type tetragonal crystal structure, with space group $P4/nmm$ (No. 129), whereas CeAgAs_2 does not crystallize in exactly HfCuSi_2 type structure, rather it crystallizes in the four-fold superstructure with a space group $Pmca$ (No. 57) which has been confirmed using TEM diffraction pattern. CeAgAs_2 orders antiferromagnetically at 4.9 K (T_{N1}) and 6 K (T_{N2}) whereas there is no indication of long range magnetic ordering in CeCuAs_2 . The strong anisotropy in the magnetic properties of CeAgAs_2 along the principal crystallographic directions could be elucidated using the crystalline electric field (CEF) model. The

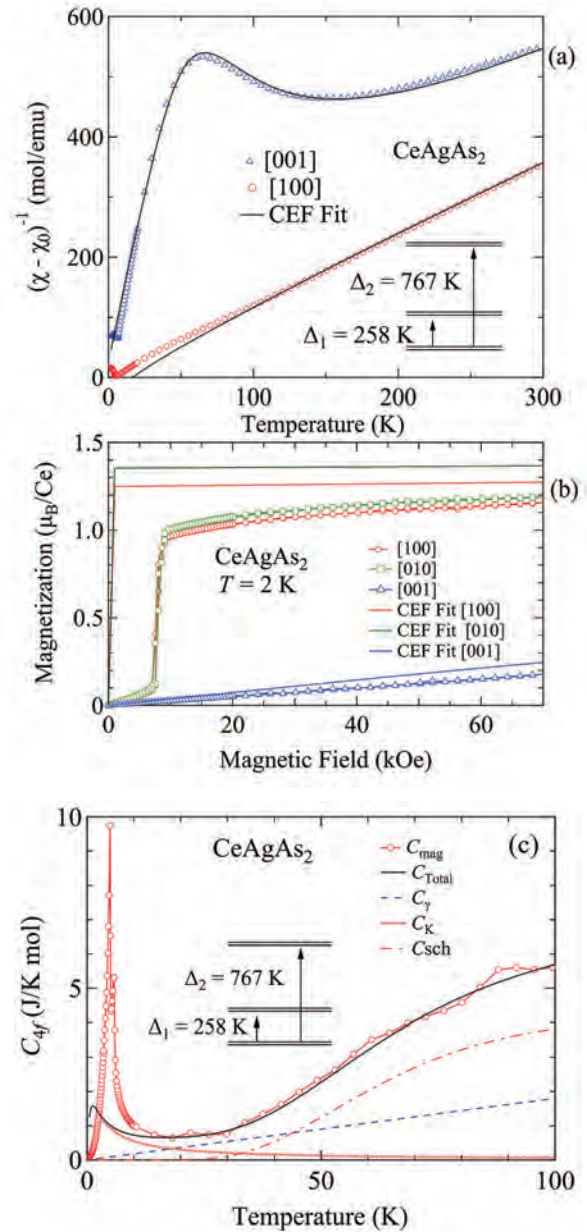


Fig. 1: (a) Temperature variation of inverse magnetic susceptibility as $[1/(\chi-\chi_0)]$ and fit to the CEF model of CeAgAs_2 . (b) Magnetization isotherm at 2 K along three principal crystallographic directions. (c) The $4f$ contribution of heat capacity of CeAgAs_2 and fit to the CEF model.

- [1] R. Mondal, R. Bapat, S. K. Dhar, and A. Thamizhavel, Phys. Rev. B **98**, 115160 (2018).
[2] R. Demchyna. *et al.*, Z. anorg. allg. Chem. **630**, 635 (2004).
[3] M. Szlowska, D. Kaczorowski, J. Alloys Compd. **451**, 464 (2008).

analyses of CEF anisotropy in CeAgAs_2 reveals the occurrence of three doublets for Ce ($J = 5/2$). The corresponding energies of the three levels could explain well the anisotropy observed in magnetic isotherms at 2 K along principal crystallographic directions and the Schottky anomaly in temperature variation of specific heat data [Fig. 1(a)-(c)]. The temperature variation of electrical resistivity of CeCuAs_2 reveals a Kondo semiconducting like behavior over all measured temperature range. The temperature dependence of electrical resistivity of CeAgAs_2 suggests that CeAgAs_2 is a Kondo lattice system with two antiferromagnetic transitions in it.

The discussion during the poster presentation with experts like Prof. Christoph Geibel, MPI CPFS,

Dresden, Prof. Dariusz Kaczorowski, Institute of Low Temperature and Structure Research, Polish Academy of Sciences, Poland, Prof. Hisatomo Harima, Kobe University, Japan, Prof. Eric D. Bauer, Los Alamos National Laboratory, U.S.A., Prof. Tatsuma D. Matsuda, Tokyo Metropolitan Univ., Japan, and so on, strengthened my understanding in various phenomena in the field.

Finally, we returned back to TIFR, Mumbai, India, on 1st July, 2018 with bagful of experience gathered during this visit. I will always cherish the moment I have enjoyed with my Japanese collaborators and surely I will visit again to this nice place to meet the nice mind over there in near future. Arigatou Gozaimasu.





内殻光電子スペクトル線二色性による 強相関Sm化合物の基底4f軌道対称性の決定

金井 惟奈

大阪大学基礎工学研究科 物質創成専攻 物性物理工学領域 関山研究室 博士3年

関山 明

大阪大学
基礎工学研究科

大貫 惇睦

琉球大学
理学部

自己紹介

皆様こんにちは。この度はJ-Physics領域全体会議にてポスター賞に選んでいただき大変光栄です。初めに簡単に自己紹介させていただきますと、私は宮崎県宮崎市出身で大学で大阪に出てきました。大阪に来たばかりの頃は周りの関西弁が恐ろしかったのですが、人生の3分の1を大阪で過ごすうちにすっかり慣れました。宮崎を出て、チキン南蛮は宮崎のもの以外認められないことを実感しました。学会等でお越しの際は是非ご賞味ください。高校時代には、物理の先生に特に世話になり、宮崎大学との流体力学の実験や物理チャレンジへの参加など貴重な経験をさせていただきました。同時に自分の不器用さを思い知ることもなりましたが、この頃の体験が今の私に繋がっています。

受賞した研究内容の紹介

我々は近年、内殻光電子スペクトル線二色性の観測によって、正方晶／立方晶化合物中の希土類イオンの4f基底状態の決定が可能であることを報告してきました[1-4]。この手法を用いることの利点の1つ、は Sm^{3+} イオンのようにその4f電子の数ゆえに4f電子電荷分布対称性が球形に近いものであっても、光電子放出方向の選択によりc軸周りの面内回転異方性を見分けられる点にあります。右図は、SPRING-8 BL19LXUにて、a軸が電子の散乱面内に存在するGeometry(Geo.)1と、a軸が電子の散乱面内に存在しないGeo.2の2つの実験配置で測定した $\text{Sm}^{3+} 3d_{5/2}$ 内殻光電子スペクトルとその線二色性(Exp.)ならびにc軸周りに面内回転異方性を持つ2つの基底状態を仮定したイオンモデル計算(Sim.)の線二色性です。実験結果の線二色性はGeo.2(橙実線)の方が

Geo.1(緑点線)に比べ全体的に低結合エネルギー側にシフトしており、 Γ_7^1 を仮定したイオンモデル計算の線二色性の実験配置依存性と傾向が一致しています。これにより、 SmCu_2Si_2 の $\text{Sm}^{3+} 4f$ 基底状態が Γ_7^1 であり、4f電荷分布が先に報告している YbCu_2Si_2 [1]と同様の方向に伸びていることが明らかになりました。

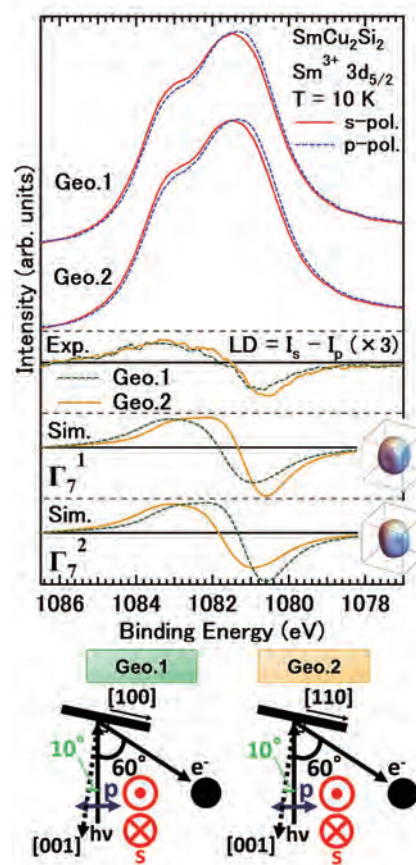


図. SPRING-8 BL19LXUにて測定した SmCu_2Si_2 の $\text{Sm}^{3+} 3d_{5/2}$ 内殻光電子スペクトルとその線二色性(Exp.)ならびに Γ_7^1 、 Γ_7^2 基底状態をそれぞれ仮定したイオンモデル計算の線二色性(Sim.).

- [1] T. Mori *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 123702 (2014).
 [2] Y. Kanai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 073705 (2015).
 [3] S. Hamamoto *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123703 (2017).

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



^{75}As -NQRによる $\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x\text{As}$ 超伝導相の研究

桑田 祥希

神戸大学大学院理学研究科

小手川 恒

神戸大学大学院
理学研究科

武田 圭生

室蘭工大

藤 秀樹

神戸大学大学院
理学研究科

菅原 仁

神戸大学大学院
理学研究科

神戸大学の藤さんと小手川さんの研究室で、試料作製と高圧実験とNMR/NQRを修行中の桑田祥希M2です。今回は後半キックオフミーティングで発表したポスターの内容紹介と軽い自己紹介をさせていただきます。

研究内容

私は $\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x\text{As}$ という物質の単結晶試料を作製し、超伝導相を含む電子状態をNQRで調べました。この超伝導は、母物質のRuAsが持つ金属絶縁体相転移との関係に興味を持たれています[1]。RuAsは、 $T_{M11} = 250\text{ K}$ と $T_{M12} = 200\text{ K}$ でそれぞれ二次転移と一次転移を持ちます。絶縁相である T_{M12} 以下では、結晶構造の低対称化（空間群： $Pnma \rightarrow P21/c$ ）と共に超格子構造の形成が確認されており、非共型の縮退をバンドヤーンテラー的に解くことで絶縁体転移が起きると考えられています[2,3]。また基底状態は非磁性であるため、二次転移である T_{M11} における $1/T_1$ の臨界発散は電気的な揺らぎを起源に持つと考えられます[3]。そのため T_{M11} の消失する付近で現れる $\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x\text{As}$ の超伝導は、非磁性の量子揺らぎによって誘起されているのではないかと想像されました。私は、「試料もできたし、後は臨界点付近にゆらぎが残っていて、さらに $1/T_1$ が変なべきで低温に落ちていったら完璧だ。磁気ゆらぎ以外のエキゾチックな超伝導の発見だ。」という淡い期待の下、測定を行いました。期待を裏切られるのが実験の面白さではありますが、測定の結果、超伝導相付近は通常金属のように振る舞い、コヒーレンスピークを示すs波超伝導であることが分かりました。この結果は論文になっているので興味のある方はぜひ読んでみてください[4]。しかし、「そもそもなぜRuAsが絶縁体にまできてしまうのか、なぜ限られたドーピング領域

のみで超伝導が出るのか全然明確に答えられない…」と思う今日このごろですが、私の理解を上回るこの物質の面白さが今回のポスター賞を与えてくれたのだと思います。聞きに来てくださった方々、研究に関わってくださったすべての方々に感謝いたします。ありがとうございました。

自己紹介

私は生まれてこのかた神戸を離れたことがなく生活圏がとてもせまいです。なぜなら神戸大学が実家から徒歩5分で通える、研究にはもってこいの環境だからです。家に帰って夕食を食べた後、研究室に戻って温度を変え、またプログラムを走らせることができます。健康的にデータが取れます。ありがたいです。趣味と呼べるようなものはありませんが、スポーツや旅行、大体なんでも好きです。普段の生活圏が狭い反動からか、ろくに準備もせず思いつきで海外旅行に行ってしまうことも多いです。またこれは余談ですが、最近、我々の低温物性研究室では筋トレが流行っており、JPhysicsのプログラムで滞在している留学生のKhusboo Ranaさんを含め、ハードな研究生活に耐えるべく肉体改造に取り組んでおります。ネパール出身のKhusbooにクリケットも教えてもらいました。辛いカレーも食べられるようになりました。交流の場を与えてくれたJPhysicsに感謝いたします。最近の研究では、面白い物質を当てるべく試料作製に励んでいます。神戸大学の博士後期課程に進学するので、これからもよろしくお願いします。

[1] D. Hirai *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 140509(R) (2012).

[2] H. Goto *et al.*, Physics Procedia **75**, 91 (2015)

[3] H. Kotegawa *et al.*, Phys. Rev. Materials **2**, 055001 (2018)

[4] Y. Kuwata *et al.*, JPSJ, **87**, 073703 (2018)



局所的に空間反転対称性の破れた反強磁性体CeRu₂Al₁₀における電流誘起磁化

高力 暁成

北海道大学大学院理学院 物性物理学専攻 博士前期課程 2年

網塚 浩

北海道大学大学院理学研究院
教授

柳澤 達也

北海道大学大学院理学研究院
准教授

日高 宏之

北海道大学大学院理学研究院
助教

北海道大学修士2年の高力暁成と申します。平成30年度の領域全体会議にてポスター賞をいただくことができ、非常に光栄に思います。ポスターはA4用紙を貼り付ける形でしたので受賞はないだろうと思っていたのですが、名前を呼ばれたときはとても驚きました。内容の新しさが評価されたのかなという嬉しさもありつつ、これからへの励ましのメッセージとして受け止めております。

自己紹介

私は名古屋生まれの岐阜育ち、北海道には大学入学を機に「ちょっと遠くに行ってみるのもアリか」と半分ノリで越してきました。家族、特に大好きな弟と会う機会がだいぶ減ったので少しさみしいですが、充実した物理ライフを送っています。親もたまにスキーや自転車旅行をしにきて満喫しているようで何よりです。父親がフランス人ですので、私は日仏のハーフです。大学に入ってからほとんどフランス語を話す機会がなくなってしまったため、会議などでフランス人の方を見かけるたびに少しうきうきしています。フランス東部のJURA地方でとれるサヴァニャンという可愛い名前のぶどうを使った白・黄ワインが絶品ですので、立ち寄った際はぜひコンテチーズとともに召し上がってみてください。À la bonne tienne!

研究内容

近藤半導体CeRu₂Al₁₀を舞台に電流誘起磁化（電気磁気効果）の検証実験を行っています。電気磁気効果は空間・時間反転対称性の双方が破れていないと発現しますが、CeRu₂Al₁₀は $T_N = 27$ Kの反強磁性転移後も空間反転対称性が破れていません[1]。しかし実験結果は電流

による一様な磁化が誘起されることを示していました。ポスターでは、系が空間反転対称性を破るような磁気点群にまで対称性を落としていると仮定し、もし磁気構造の修正でその磁気点群対称性を再現するならどのような構造をとればよいかという観点で発表しました。今では磁気構造の修正だけでなく、結晶構造の微小な歪みなど別の要因を考えなければ結果を説明できないということが分かってしまいましたが、何度も悩んで頭の中でスピンをこねくり回したのは良い経験になったと思っています。自分のアイデアを生かして実験をしている時は、特にやりがいを感じます。最近は電流誘起磁化を引き起こす原因となる多極子が磁気四極子なのか、磁気トロイダル双極子なのかを特定するために、単一の試料における電流下磁化測定を行っています。測定のつど見えてくるものもありますが、反強磁性転移を起こしていなくても誘起磁化が見られたり、定量的な議論が難しかったりと課題はまだ多いです。これからも様々な候補物質で同様の測定を行い、電流誘起磁化の結果に奇パリティの多極子がどのように関わってくるのか明らかにしていきたいと思っています。どうぞよろしくお願いいたします。

[1] D. D. Khalyavin et al., Phys. Rev. B **82**, 100405(R) (2010).



硬X線内殻光電子線二色性による 多極子秩序状態の観測

濱本 諭

大阪大学大学院 基礎工学研究科 D1

関山 明

大阪大学大学院
基礎工学研究科

この度は、J-Physics領域全体会議にてポスター賞に選出いただき大変光栄に思います。初めに簡単に自己紹介した後に、研究内容について触れさせていただきます。出身は兵庫県姫路市の秋祭りが盛んなところで、毎年祭りの時期となると遠方においても仕事を休んで帰ってくる、そんな祭り好きがたくさんいるところです。世界遺産の姫路城は数年前に保存修理が終わったところで、白鷺城の愛称に違わない美しさを誇っていますので、ぜひ一度お越しになってみてください。私は生まれてこの方、一度も兵庫県を脱出したことがありませんでしたが、2016年に兵庫県立大学理学部を卒業した後、大阪大学基礎工学研究科へ進学し、大阪の荒波に揉まれながら日々研究活動に取り組んでいます。

我々は、直線偏光を利用した硬X線内殻光電子線二色性(Linear Dichroism: LD)を用いて、希土類化合物の4f軌道対称性の観測が可能であることを示してきました[1-4]。この実験手法を未だ4f軌道対称性が分かっていない系へ適用することはもちろんのことですが、それだけでなく多極子秩序状態のように相転移が生じた系に対して適用することで秩序状態を特徴づける秩序変数の情報を引き出すことができなかと考えています。四極子や八極子などの高次多極子の秩序に適用する前に、磁気双極子の秩序である磁性でLDにどのような変化が生じるのかを調べるために、立方晶 PrB_6 [5,6]の常磁性相と非整合反強磁性相においてLDの観測を行ったところ、相転移前後にて僅かに異なるLDを見出しました(右図)。この結果は磁気双極子が内殻光電子放出に寄与することを示唆しています。現在、LDを用いて磁性による4f電子状態の変化をより明瞭に観測するために、光電子分光では変則的なことと思いますが、磁場印加条件にてLD

の観測を試みています。今後はさらに高次の多極子に対して内殻LDがどのような応答をするのかを精査し、多極子秩序へのプローブとしての有用性を探っていきたいと考えています。

以上に自己紹介と現在取り組んでいる研究について述べました。浅学な身ではありますが、J-Physicsでの研究活動を通して研究者として成長していきたいと考えています。どうぞよろしくお願いいたします。

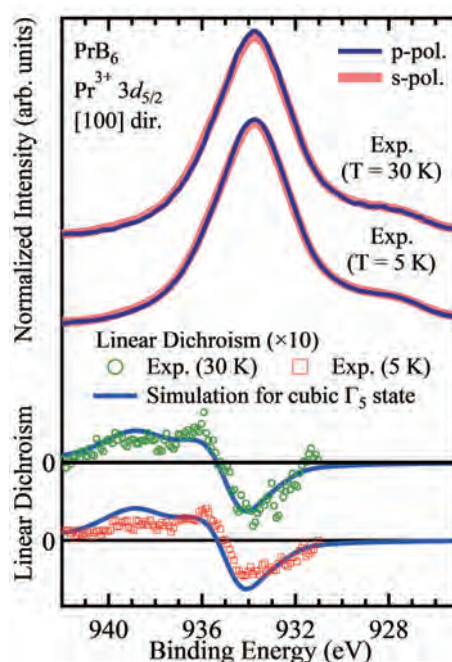


図. $T=30\text{ K}$ (常磁性相) と 5 K (非整合反強磁性相) における Pr^{3+} $3d_{5/2}$ 内殻光電子スペクトル (上部) と LD (下部)。LD は p 偏光でのスペクトル強度 I_p と s 偏光でのスペクトル強度 I_s の差 $I_s - I_p$ と定義しています。比較のために Γ_5 状態のイオン模型に対するスペクトル計算による LD を示しています。

- [1] T. Mori *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 123702 (2014).
- [2] Y. Kanai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 073705 (2015).
- [3] S. Hamamoto *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123703 (2017).

- [4] H. Aratani *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 121113(R) (2018).
- [5] S. Kobayashi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **70**, 1721 (2001).
- [6] M. Loewenhaupt and M. Prager, Z. Phys. B **62**, 195 (1986).



「ワイル反強磁性体 Mn_3Sn における 巨大な磁気光学カー効果と 拡張磁気八極子ドメインの直接観測」

肥後 友也

東京大学物性研究所 特任研究員

J-physics 平成30年度領域全体会議@東北大学 ポスター発表より

是常 隆

東北大学理学研究科
准教授

鈴木 通人

東北大学金属材料研究所
准教授

有田 亮太郎

東京大学工学系研究科
教授

Muhammad Ikhlas

東京大学物性研究所
博士課程1年

中辻 知

東京大学物性研究所
教授

はじめに

東大物性研特任研究員の肥後友也と申します。現在はCREST中辻チーム(中辻研・大谷研・有田研)に所属して、近年応用上の利点から注目を集めている反強磁性体を用いた熱電発電素子や不揮発性メモリなどのデバイス開発を目指した新奇物性開拓を行っています。この度は2018年5月24日~26日に東北大学で開催された領域全体会議において、ポスター賞をいただきました。この場をお借りして、受賞対象の研究について簡単に説明させていただきます。

背景

磁気光学カー効果は、直線偏光した光を磁性体に照射した際に反射光の偏光面が回転する現象です。この効果は、光磁気ディスク等の磁気光学素子の原理であるほか、磁気特性などの基礎物性や磁気ドメインを非破壊・非接触で測定する手段として広く用いられています。一般に、カー効果はマクロな磁化とスピン軌道相互作用により生じるとされ、強磁性体やフェリ磁性体において研究されていましたが、磁化がゼロの反強磁性体ではその検出が困難であると考えられていました。しかし、研究の進展により、カー効果は異常ホール効果と同様の対称性の議論が可能であり、つまり、時間反転対称性が巨視的に破れ、有限のベリー曲率を運動量空間に有する系では、磁化を持たない反強磁性体においても巨大な磁気光学カー効果が現れることが理論的に明らかになってきました[1]。

我々は反強磁性体において初めて異常ホール効果が観測された非共線スピンを持つ反強磁性体 Mn_3Sn [2]に着目して、巨大な磁気光学カー効果や反強磁性ドメイン

を観測することを目的に実験を行いました。

結果

Mn_3Sn の非共線スピン構造は、拡張磁気八極子が強的に秩序しており、時間反転対称性が巨視的に破れた状態であると理解されていますが[3]、反強磁性ドメインの反転に伴うカー効果の応答を調べたところ、室温で強磁性体に匹敵するほど大きなカー回転角を観測しました。また、カー回転角の波長依存性についての実験と第一原理計算との比較から、この巨大なカー効果の起源が磁気八極子秩序であることを確認するとともに、カー顕微鏡を用いた観察により、磁気八極子を持つ反強磁性ドメインの反転に伴うコントラストの変化をイメージングすることに世界で初めて成功しました[4]。今回観測した磁気八極子ドメイン由来のコントラストは、巨大な異常ホール効果や異常ネルンスト効果の起源である仮想磁場の向きにも対応していると考えられ、 Mn_3Sn 等の反強磁性体を持つ磁気八極子由来の巨大応答を用いたデバイス開発の上で、本結果は非常に有用な評価手段を示しました。

おわりに

多極子に関する最先端の物理に出会えるJ-Physicsは、多極子物理の応用を目指す私にとって欠かすことの出来ない場となっています。発表や懇親会で議論して下さった皆様にこの場をお借りして深くお礼申し上げます。また、中辻知教授をはじめとする本研究の共同研究者の皆様、私を快くこの領域へ送り出してくださった大谷義近教授に深く感謝いたします。

[1] H. Chen, Q. Niu, and A. H. MacDonald, Phys. Rev. Lett. **112**, 017205 (2014); W. Feng et al., Phys. Rev. B **92**, 144426 (2015).

[2] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature **527**, 212 (2015); 中辻知, J-Physics NEWS LETTER **4**, 12 (2017).

[3] M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, and R. Arita, Phys. Rev. B **95**, 094406 (2017); 鈴木通人, J-Physics NEWS LETTER **4**, 6 (2017).

[4] T. Higo, H. Man, D. B. Gopman, L. Wu, T. Koretsune, O. M. J. van 't Erve, Y. P. Kabanov, D. Rees, Y. Li, M.-T. Suzuki, S. Patankar, M. Ikhlas, C. L. Chien, R. Arita, R. D. Shull, J. Orenstein, and S. Nakatsuji, Nat. Photon. **12**, 73 (2018).



淡路島サマースクールと国際会議に参加して

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1年

鬼丸 孝博

広島大学大学院
先端物理学研究科 教授

山田 怜志

広島大学大学院先端物理学
研究科 博士課程前期

山根 悠

広島大学大学院先端物理学
研究科 博士課程後期

志村 恭通

広島大学大学院
先端物理学研究科 助教

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

高島 敏郎

広島大学大学院
先端物理学研究科 特任教授

2018年6月24日から30日の期間に淡路夢舞台国際会議場で開催された、国際若手サマースクールと新物質と結晶育成に関する国際会議に参加しました。この6日間は、日頃の実験や授業を離れて、多極子や超伝導、試料作製に関する基礎から最先端の研究まで、様々なことを学ぶことができました。国際会議のポスターセッションでは、「単結晶NdT₂Zn₂₀ (T = Co, Rh)における結晶場基底状態と反強磁性秩序」について発表し、最優秀ポスター賞に選出して頂きました。参加者の皆さんから多くの質問とアドバイスを頂き、自身の研究についてじっくりと考える良い機会になったと思います。

私が着目しているカゴ状構造をもつNd 1-2-20系は4f³配位のNd³⁺がその磁性を担っており、基底Γ₆二重項における磁気的な2チャンネル近藤効果が発現することが理論的に提案されています[1]。本研究の対象物質であるNdT₂Zn₂₀ (T = Co, Rh)では、物性報告のある同型の反強磁性体NdIr₂Zn₂₀[2]よりも格子定数が小さくなるため、Ndを囲むZnのカゴが収縮し、伝導電子とf電子との混成(c-f混成)が強まることが期待されます。T = Co, Rhの磁気転移は2 Kまで観測されていなかったため、単結晶試料を作製し、低温の物性について調べました[3]。磁気比熱C_mは15 K付近で山をもち、この山は結晶場基底状態をΓ₆二重項としたショットキー比熱として説明できます。また、図に示すように、C_m/TはT = Co, RhのそれぞれでT_N = 0.53, 0.94 Kでピークを示します。このピークは磁場とともに低温側へシフトすることから、反強磁性秩序を示唆します。一方、T_Nでの磁気エントロピーS_mは基底Γ₆二重項から期待されるRln2の半分程度です。また、T_N以上でS_mは消費されており、同じ温度領域で電気抵抗率ρは上凸の振る舞いを示します。この原因と

して、磁気的な短距離相関の発達や伝導バンドとΓ₆二重項によるc-f混成の効果が考えられます。今後は中性子回折による磁気構造の同定や反強磁性に対する元素置換効果を調べ、ρやS_mで観測した異常な振る舞いの起源を明らかにしたいと考えています。

今回のサマースクールと国際会議では、研究に関する議論はもちろん、研究室での面白いエピソードや研究の裏話(苦労話?)をお聞きする機会もたくさんありました。また、同年代の学生の方々が研究に励んでいる様子は、私自身の研究に対するモチベーションをさらに上げるきっかけになったと思います。このような会を運営してくださいました先生方、選考委員の方々、参加者の皆様に深く感謝いたします。また、ポスター賞を頂いたのは、広島大学の鬼丸孝博先生をはじめ、磁性物理学研究室の方々のご指導のおかげです。この場を借りてお礼申し上げます。

ちなみに、ポスター賞の記念品としていぶし瓦でできた、鬼瓦の文鎮を頂きました。現在はデスクに鎮座して、私がサボっていないか睨みを利かせています。今後も、この鬼瓦に見守られながら日々の研究に邁進してまいりたいと思います。

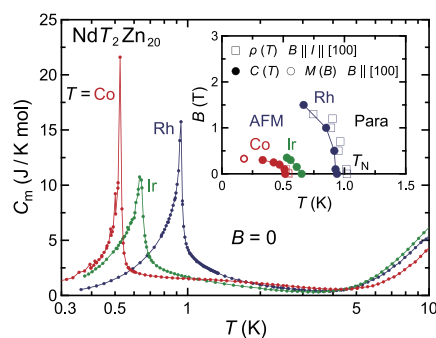


図. NdT₂Zn₂₀ (T = Co, Rh, Ir)の磁気比熱 [3]。

[1] T. Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 083704 (2017).

[2] Y. Yamane et al., J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 054708 (2017).

[3] R. Yamamoto et al., J. Phys. Soc. Jpn., in press.



Poster Award in J-Physics 2018

Magnetotransport measurement and determination of Fermi surface through quantum oscillation

Yajian Hu

Department of Physics, The Chinese University of Hong Kong, PhD student

Prof. Swee K. Goh Department of Physics, CUHK, Hong Kong	Dr. Kwing To Lai Department of Physics, CUHK, Hong Kong	Prof. Jun Yi Zhu Department of Physics, CUHK, Hong Kong	Dr. Chia Nung Kuo Department of Physics, National Cheng Kung University, Taiwan	Prof. Chin-Shan Lue Department of Physics, National Cheng Kung University, Taiwan
---	--	--	--	--

I am a PhD student in Prof. Swee K. Goh's group at The Chinese University of Hong Kong. My research mainly focuses on the transport measurements of superconductors and topological semimetals. Together with applying hydrostatic pressure, we can tune the electronic structure and explore rich phases and phenomena of the materials. In June 2018, I attended the Summer School & International Workshop on New Materials and Crystal Growth at Awaji, and presented a poster about the rare-earth monpnictide ScSb.

Rare-earth monpnictides RX (R = rare-earth, X = Sb, Bi) are one of the systems in the rapidly expanded class of topological semimetals. These materials have attracted intensive investigations because of their nontrivial electronic topology, intrinsic magnetotransport properties and potential technological applications. One of the unique features is the non-saturating and extremely large magnetoresistance (XMR). The measurement of these materials supported by a thorough electronic structure investigation can enrich the understanding of their transport properties and beyond.

Among the RX family, LaBi has been proposed to be a topologically nontrivial semimetal [1]. It exhibits several intriguing magnetotransport properties: (i) a large, non-saturating MR, (ii) a field-induced upturn in the temperature dependence of resistivity, and (iii) a resistivity plateau at high field and low temperature. In other isostructural compounds, YSb or LaSb [2,3], similar transport properties have been observed but no surface state has been detected. ScSb is the first member of the RX series, in which the Fermi surface topology is qualitatively similar to that of LaBi and YSb, but there are two important differences. First, there is an

additional hole pocket centred at the Γ point of the Brillouin zone. Second, there is a large energy gap between the band formed by Sc d states and Sb p states near the X-point of the Brillouin zone. Thus, band inversion is absent.

In the poster, I presented the MR and the Shubnikov-de Haas (SdH) oscillations of single crystalline ScSb. The XMR, field-induced upturn and resistivity plateau were clearly observed in ScSb, which can be well explained by the semi-classical two-band model. From SdH frequencies, we can extract the cross sectional area of the Fermi surface. By rotating the magnetic field, we can get the information of volume and shape. Thus, the Fermi surface topology can be determined with the support from density functional theory (DFT) calculations. Figure1 shows the FFT spectrums of SdH oscillations, the angular dependence of frequencies and corresponding Fermi surfaces.

Despite the key differences in the band structure, MR curves of ScSb are remarkably similar to the cases where nontrivial topological states have been asserted. Furthermore, our SdH oscillations detect all Fermi surface pockets predicted by calculations. Therefore, ScSb serves as a useful reference compound in which the bulk Fermi surface topology is fully determined to distill the essential ingredients responsible for the interesting magnetotransport properties in rare-earth monoantimonides [4].

The trip to Awaji is the first time for me to attend activities organised by J-Physics. During the week, I listened to a lot of inspiring lectures and talks. Topics about electronic ground states in semimetals and high magnetic field experiments were also discussed, which

are closely related to my current work. In the poster session, I had great discussion with other researchers and received some advises, which deepen my understanding and broaden my horizons.

Besides academic activities, the excursion in Awaji was also enjoyable. We visited the beautiful park on the island and the impressive Uzushio Vortex. In the banquet of the workshop, we watched the Japanese Traditional Puppet Show, which is a special experience of Japanese culture.

I'd like to thank the J-Physics committee for giving me the opportunity to attend the event and recognising this work with the poster award.

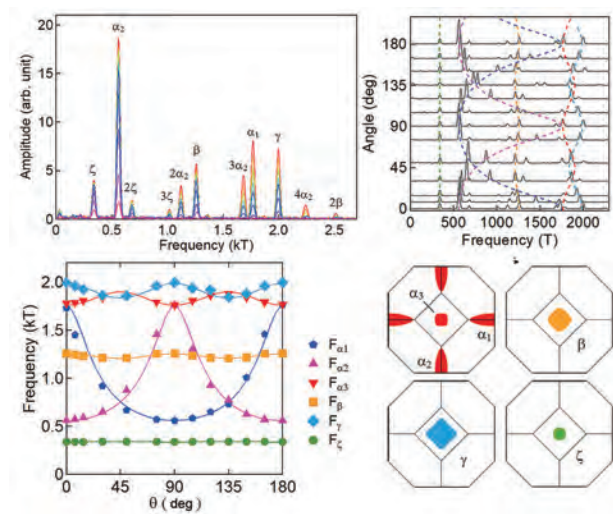


Figure1: Quantum Oscillation of ScSb. (Up) The FFT spectrum at B//c direction and shifted FFT spectrums at different angle. (Down) Angular dependence of frequencies and the corresponding Fermi surfaces from DFT calculation.

- [1] F. Fallah. Tafti *et al*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **113**, E3475 (2016).
- [2] J. He *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 267201 (2016).
- [3] L.-K. Zeng *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 127204 (2016).
- [4] Y. J. Hu *et al*, *Phys. Rev. B* **98**, 035133 (2018).



立方晶キラル化合物EuPtSiの特異な磁気構造と電子状態

垣花 将司

琉球大学大学院 理工学研究科 博士後期課程3年

青木 大

東北大学
金属材料研究所 教授

榊原 俊郎

東京大学
物性研究所 教授

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

大貫 惇睦

琉球大学 理学部
客員教授

この度はトピカルミーティング「物質探索最前線」にてポスター賞に選んでいただき、誠に光栄です。本稿では、ポスター発表した内容の一部を紹介させていただきます。

EuPtSiはウルマナイト(NiSbS)型の結晶構造で立方晶キラル構造を持つ化合物であり、スキルミオンの磁気構造を有するMnSiと同じ $P2_13$ の空間群に属しています。EuPtSiのEuは2価であり、図1(a)に示すように4.0 Kにネール点が存在します [1]。

図1(b)に示すように、 $H // [111]$ での磁化曲線では H_{A1} , H_{A2} で2つのメタ磁性転移が見られますが、この H_{A1} , H_{A2} は0.5 K以下では観測されず、閉じた磁気相を形成していることが明らかになりました [2]。この閉じた磁気相は、MnSiの磁場-温度の反強磁性相の中に存在する閉じた磁気相であるスキルミオン相 (A相) を想起させるため、EuPtSiの磁気相も“A相”と名付けました [3]。スキルミオン相が存在すると、その相内では創発磁場が生じ、特異なホール抵抗が出現します。そのため、私達はEuPtSiのA相でのホール抵抗、磁気抵抗を測定し、スキルミオンとの関連を研究しました。図1(c)にEuPtSiの $[111]$ 方向でのホール抵抗と磁気抵抗の磁場依存性を示します。磁化曲線でメタ磁性転移が起こる H_{A1} , H_{A2} の間でホール抵抗、磁気抵抗共に明瞭なピークが見られ、それぞれの測定で H_{A1} , H_{A2} および H_c はよく一致していました。ホール抵抗、磁気抵抗でも0.5 K以下では H_{A1} , H_{A2} の間のピークが観測されなくなり、図1(d)に示すように、精密磁化測定から得られた青線のA相と赤丸で示したホール抵抗、磁気抵抗のピーク構造が現れる磁場-温度領域はよく一致していました。

MnSiでは $[100]$, $[111]$, $[110]$ 方向でA相が存在し、異方性はほとんどないことが報告されています。しかし、EuPtSiでは $H // [100]$, $[111]$ でA相が存在しますが、 $H // [110]$, $[112]$ 方向では見られません。現在、EuPtSiの中性子散乱、共鳴X線散乱、NMR、メスバウアーの測定が精力的に行われています。これらの実験から、磁気構造などの詳細が明らかになることを期待しています。共同研究者の方々にお礼申し上げます。

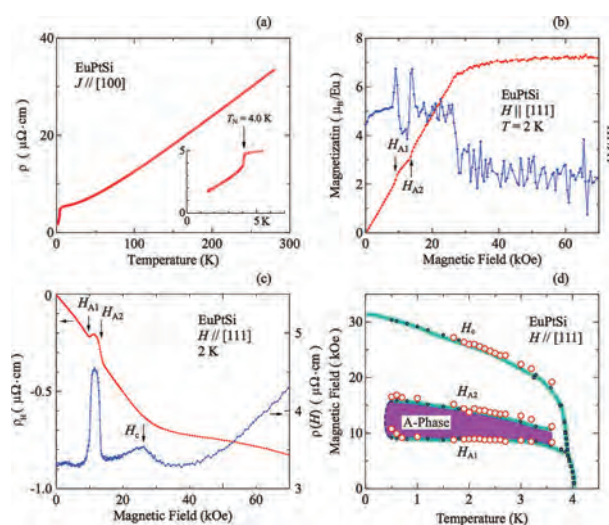


図1. EuPtSiの(a) 電気抵抗率の温度依存性、 $H // [111]$ 方向での $T = 2$ Kにおける(b) 磁化曲線と磁化の微分、(c) ホール抵抗と磁気抵抗の磁場依存性、および (d) 磁場-温度相図。

[1] M. Kakihana *et al.*, J. Elec. Mat. **46**, 3572 (2017).

[2] M. Kakihana *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 023701 (2018).

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



ダイヤモンド構造上での反強四極子秩序と電気磁気効果による秩序変数の同定

石飛 尊之

首都大学東京 大学院理工学研究科 博士前期課程2年

服部 一匡

首都大学東京 理学部
准教授

8月に行われたB01-D01合同トピカルミーティング「物質探索最前線」でポスター賞に選出していただき、大変光栄に思っております。本稿では、ポスター発表の概要を紹介させていただきます。

本研究で念頭に置いた物質は $\text{PrT}_2\text{X}_{20}$ ($T = \text{Rh, Ir, V, X} = \text{Zn, Al}$ 等)系です。この系では、Prサイトはダイヤモンド構造をとり、局所点群は T_d となります。結晶場基底状態は f^2 配置の非クラマース Γ_3 二重項であり、磁気双極子ではなく、四極子($O_{20}: 3z^2-r^2$, $O_{22}: x^2-y^2$)の自由度を持ち、低温で反強四極子秩序と思われる相転移が観測されています[1-2]。しかし、反強四極子の秩序変数の同定は困難で、現在までゼロ磁場における秩序変数はわかっていません。本研究では、反強四極子秩序が空間反転対称性を破ることに注目して、電気磁気効果によって破れた対称性を同定できることを提案しました。

電気磁気効果の有無は系の対称性により制約を受けます。絶縁体における電場に対する磁化の線形応答は、時間反転、空間反転対称性の自発的な破れを必要とします。これは、電場と磁化の時間反転、空間反転に対する偶奇が異なるためです。一方で、金属の場合には自発的な時間反転対称性の破れを必要としません。金属では電場により生じた電流が磁化と結合することができます。両者は時間反転に関してはともに奇ですが、空間反転に関する偶奇は異なるため、空間反転対称性の破れを必要とします。電流と磁化は、回転や鏡映に対する変換性も異なるため、応答の異方性にこれらの対称性の有無が反映されます[3-4]。

$\text{PrT}_2\text{X}_{20}$ 系では、反転中心はPrイオン間の中心にあり、反強秩序下で空間反転対称性が破れます。秩序変数が O_{20} と O_{22} の場合では、[110]方向の回転や鏡映対称性の

有無が異なり、これが電気磁気効果の異方性に表れます。

本研究では、四極子近藤格子模型を平均場近似で扱い、反強四極子秩序下で電流誘起軌道磁化 m を計算しました。図1に電流 j の方向に生じる m の方向依存性を示します。秩序が O_{22} 型の場合には[001]方向で絶対値が最大となり、秩序が O_{20} 型の場合にはこの方向で消えます。また、 O_{20} 型では $x=y$ 面で電流誘起軌道磁化は生じず、 O_{22} 型では xy 面内で一定となります。このように、電流誘起軌道磁化の異方性を測定することで、秩序変数を区別することができます。

このような異方性の起源は、秩序下の電荷分布を見ると明確になります。 O_{22} 反強四極子秩序下では、図2のように右回りと左回りのソレノイドが並ぶ構造になります。図内の数字は z 方向の座標を、色は電荷分布の符号を表します。 z 軸正方向に最近接で同じ符号(色)をたどると左回り(青)と右回り(赤)のソレノイドが見えてきます。伝導電子はこのようなポテンシャルを感じながら運動するため、一方のソレノイドの電子密度が大きくなり、軌道磁化が生じると考えることができます。

秩序の同定の他にも、 $\text{PrT}_2\text{X}_{20}$ 系では秩序下での超伝導についての解析など、多くの興味深い課題が残されています。今後も精力的に研究に励みたいと思います。

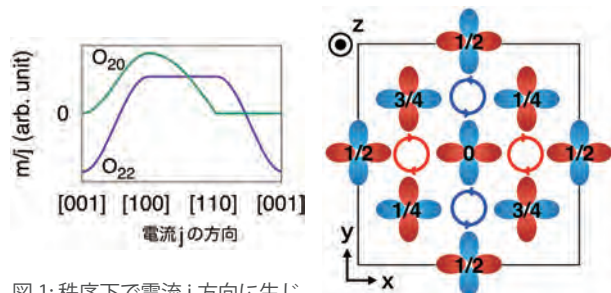


図1: 秩序下で電流 j 方向に生じる軌道磁化 m の方向依存性。

図2: 反強 O_{22} 秩序下での電荷分布。

- [1] T. Onimaru and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 082002 (2016).
[2] A. Sakai and S. Nakatsuji, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 063701 (2011).
[3] H. Watanabe and Y. Yanase, Phys. Rev. B **96**, 064432 (2017).

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

駄文

御領 潤 弘前大学大学院理工学研究科

「若手研究者へのメッセージなど」というテーマで何か書け、という鬼丸さんからの指示が下り、締め切り当日にこの拙文を書き始めております。本当に何を書いたらいいのやらという気持ちですが（そもそも私だって若手なのに…）、とりあえず大いに恥を忍び、いくらか過去を振り返ることから筆を進めてみます。

大学院重点化により私たちが修士に進んだ頃から院生の定員が大幅に増え、北大の出身研究室にも同期が5人おりました。5人とも研究者になることを夢見ておりました。若手夏の学校（物性ではなく素核宇宙）で戸隠高原まで出かけて行って、全国から集まった同年代の仲間と友達になったのが楽しい思い出の一つです。M2になって修論を書くわけですが、研究室の同期は皆優秀で修論の内容を専門誌に掲載することに成功しました（私以外は）。5人とも博士課程に進んだのですが、そんなこともあって最初の半年間くらいは何やら研究に身が入らない状態が続いておりました。今から思うとどうでも良いことで腐っていたものです。どういうきっかけがあったのか全く記憶にありませんがその後は気をとりなおし、D論はなんとか無事に3年で書き終えました。しかし安定した職を得るまでにはそれから長い紆余曲折がありました。

最初は京都に移り、当時基研におられた Sigrist さんから異方的超伝導の手ほどきを受けました。私は博士課程の後半にゲージ場の理論の応用として超伝導・超流動を議論していましたが、Sigrist さんによって凝縮系物理の研究の軌道に乗せていただきました。基研には5ヶ月ほどの短い滞在でしたが、その間にカイラルp-波超伝導に関する共同研究の結果を論文として公表出来たのはとても幸いでした。

京都の次は柏に移り、移転直後の物性研でポスドクとして雇っていただきました。研究室は甲元研でした。TKNN公式は当時すでに有名でしたが、ここ10年来のさらなる爆発的な進展は当時の私などには想像もつきませんでした。提唱者のお一人からの直伝はとても貴重でした。物性研では他の研究室の先生方やスタッフの方々にもとても良くしていただき、充実した期間を過ごせました。鬼丸さんとの交流が始まったのもこの頃です。

その後も10年間、ドレスデン→青学→名古屋→東大生産研→ETHと任期付きの職を転々しました。その間、お世話になった先生・友人・知人の方々からの力強いご助力・お励ましを頂き、おかげさまでようやく弘前に落ち着くことができました。今から6年前になります。皆様のご厚情に対し、この場を借りて深く御礼申し上げます。

転々としていた間どんな心持ちでいたか今では正直うろ覚えなのですが、基本的に楽観的だったように思います。私には少々、悲観的な未来を想像する能力が欠如しているようです。皆様に楽しんでいただけるようなストーリーは持ち合わせていませんが、自分自身は楽しんで暮らしていたように思います。研究職に就けることを切に願っていましたが、もしそうならなくても何かなるでしょう、とにかく今は研究しましょう、といった気持ちだったでしょうか。それと相反するかもしれませんが、心のどこかでは研究職に就くことを（願うだけでなく）図々しくも信じていた節があったような気がします。信じるというのは大事なのかもしれません。駄文になるだろうと信じて書き始めると、やはり駄文になるように。



2019年4月からの領域関連行事

49èmes Journées des Actinides (JdA-2019)

日 時：2019年4月14日（日）～18日（木）

場 所：Erice, Italy

U R L：https://www.jda-conf.org/

Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS 2019)

日 時：2019年6月16日（日）～21日（金）

場 所：東京大学伊藤国際学術研究センター（東京都文京区）

U R L：http://sns2019.t.u-tokyo.ac.jp

V International Workshop Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Exotic Spin Structures (DMI 2019)

日 時：2019年7月8日（月）～12日（金）

場 所：Petrozavodsk, Russia

U R L：https://oiks.pnpi.spb.ru/events/DMI-2019

J-Physics ものづくり学校

J-Physics主催

日 時：2019年8月5日（月）～9日（金）

場 所：高野山大学（和歌山県伊都郡高野町）

日本物理学会（2019年秋季大会）

日 時／場 所：2019年9月10日（火）～13日（金）／岐阜大学（岐阜市）

国際ワークショップ J-Physics 2019

J-Physics主催

日 時：2019年9月18日（水）～21日（土）

場 所：神戸大学百年記念館六甲ホール（神戸市）

SCES2019

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems

日 時：2019年9月23日（月）～28日（土）

場 所：岡山コンベンションセンター（岡山市）

U R L：http://scs2019.org/

第13回 物性科学領域横断研究会（領域合同研究会）

J-Physics共催

日 時：2019年11月27日（水）～28日（木）

場 所：東京大学小柴ホール（東京都文京区）

J-Physics 領域全体会議（まとめの会議）

J-Physics主催

日 時：2020年1月

場 所：未定

日本物理学会（第75回年次大会）

日 時／場 所：2020年3月16日（火）～19日（金）／名古屋大学東山キャンパス（名古屋市）



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)

NEWS LETTERへのご寄稿のお願い

J-Physics NEWS LETTERに記事の掲載を希望される方は各研究項目の編集委員までお知らせください。自信作の論文、参加された会議の報告、アウトリーチ活動など、まずは概要を所定のフォームに記載してお送り下さい。特集記事の企画も歓迎いたします。

連絡先 J-Physics事務局：steering@jphysics.jp

NEWS LETTER

J-Physics #07

Physics of Conductive Multipole Systems

March

編集後記

多くの皆様に質の高い記事をお寄せいただき、やりがいと刺激を感じながら編集を担当させていただきました。昨年9月の物理学会の共催シンポジウムでの反響を受け、新学術領域「ナノスピン変換科学」領域代表の大谷先生に、領域間の共同研究の成果に関する記事をお寄せいただきました。研究解説では、本学術領域が中心的な役割を担っているEuやSmの系の多彩な磁性に関する研究の総括と展望を、実験と理論の両面から紹介していただきました。公募班の紹介記事や研究成果の記事は、これからのさらなる展開を期待させる内容に溢れています。また、研究会等で受賞された大学院生や若手研究者の皆さんの記事からは、しっかりと志をもって日々研究に取り組んでいる様子が伝わってきます。本領域が広い世代間で切磋琢磨しながら発展する健全なコミュニティであることを再認識し、そこで研究できていることを嬉しく思うとともに、研究することに対する思いを新たにしました次第です。

さて、平成27年度に始まったJ-Physicsもいよいよ5年目、最終年度に突入です。これから国際会議などの関連行事も目白押しです。一つの区切りとして研究成果をしっかりとまとめつつ、ここで芽吹いた新しい研究を発展的に育てていくことが重要だと思えます。最後になりましたが、年末年始から年度末のお忙しいなか原稿を執筆してくださった方々、編集に関わってくださった方々に感謝いたします。(T.O.)



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7号

2019年3月 発行

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

領域ホームページ

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