

NEWS LETTER

J-Physics

Physics of Conductive Multipole Systems

#06

September



巻頭言

ワークショップ点描 播磨 尚朝 002

研究解説

*f*フェルミオン伝導系における物質開発 野原 実 004

多極子秩序系の群論的分類
—秩序が創発する応答への応用— 渡邊 光
柳瀬 陽一 008

公募班紹介

A01

強相関有機 π -*d*電子結合系の
電荷—スピン複合物性の解明と探索 井口 敏 013

高圧力で拓く多極子と伝導電子の
混成効果による新奇物性 松林 和幸 016

多極子が示す局在—非局在二重性と
秩序の観測 水戸 毅 017

多極子伝導物質の高品質単結晶化と
量子振動効果によるフェルミ面の研究 菅原 仁 019

電子面とホール面を持つ
相関電子系の近藤効果と超伝導 星野 晋太郎 021

B01

ウラン化合物における多重超伝導相の
解明と多極子クーパ対の動的電磁応答 藤本 聡 023

磁場角度分解比熱・エントロピー測定から
アプローチする多極子伝導系の新奇量子相 橘高 俊一郎 024

スピン軌道相互作用による
不安定性で形成される遍歴多極子秩序 平井 大悟郎 026

$\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ の高圧下における奇パリティ
多極子秩序とパリティゆらぎ超伝導 小林 達生 028

非共型ジグザグ構造における
特異な量子相の解明と探索 小手川 恒 030

C01

Magnetotransport in strongly correlated
non-centrosymmetric *f*-electron materials Robert Peters 032

熱流により誘起された反強磁性マグノン
スピン流における奇パリティ多極子効果の開拓 塩見 雄毅 034

局所的な軌道混成に由来する
トロイダル多極子をもたらす
新奇マルチフェロイクスの開拓 速水 賢 036

キラル化合物 YbNi_3Ga_5 の圧力誘起による
量子臨界現象と磁気秩序相 梅尾 和則 038

Ceジグザグ鎖構造を持つ新しい重い電子系
化合物における電流誘起磁化現象の探索 本山 岳 040

電流と格子回転・歪みによる複合共役場を
用いた拡張多極子検出の試み 柳澤 達也 042

核磁気共鳴によるスピン軌道結合系および
局在多極子系における新奇な秩序の探索 瀧川 仁 044

D01

幾何学的フラストレート系
イリジウム酸化物における新奇物性の研究 松平 和之 046

遍歴反強磁性物質
 BaMn_2Pn_2 における電気磁気 谷垣 勝己 048

研究交流のすすめ

強磁場研の歩き方: NMR編 徳永 陽 / 酒井 宏典 050

物質開発者のための
共同利用施設利用のすすめ 大貫 惇睦 054

CONTENTS

今号の研究成果

歪んだ三角格子反強磁性体の フェリ磁性の崩壊	坂井 徹	057
反強磁性スピン波励起スペクトルの 電子相関による線幅増大	森 道康	061
高精度 ^{29}Si ナイトシフト測定で明らかになった URu_2Si_2 におけるスピン磁化率の強い異方性	服部 泰佑	064
Spin-split Fermi surfaces and heavy electronic states in $\text{U}_3\text{Ni}_5\text{Sn}_4$	Arvind Maurya	066
Evidence of a New Current-Induced Magnetoelectric Effect in a Toroidal Magnetic Ordered State of UNi_4B	齋藤 開	069
相関を持つランダムネスが誘起する スピンスパイラル秩序	品岡 寛	075
層状スズニクタイト： 新しいファンデルワールズ型層状超伝導体	後藤 陽介	078
Enhanced superconducting transition temperatures in the rocksalt-type superconductors $\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x \leq 0.5$)	小林 夏野	080

研究会報告／滞在記

会議報告： J-Physics平成29年度領域全体会議	酒井 明人	082
国際ワークショップ報告 Novel Phenomena in Quantum Materials driven by Multipoles and Topology	大槻 匠	087
J-Physics平成30年度領域全体会議報告	神戸 振作	089
物性若手のためのキャリアデザイン —企業で活躍する先輩からのメッセージ	網塚 浩	092
J-Physics 2018: Summer School について	小林 夏野	093
International Conference on Magnetism (ICM2018) に参加して	橘高 俊一郎	095
トピカルミーティング ものづくりシリーズ 第3回「物質探索最前線」会議報告	松田 達磨 水口 佳一	097

海外派遣報告(ETH)と 2年間の博士研究員の報告	飛田 豊	100
------------------------------	------	-----

若手紹介

最先端の物性物理学研究に触れて	大岩 陸人	103
博士研究員の紹介	植木 輝	106
博士研究員の紹介	堀江 理恵	108

退職される方々よりメッセージ

物理学の未来に期待	吉澤 正人	110
研究室の寿命	高島 敏郎	111

コーヒーブレイク

知られざる首都大の名所 東京都を型取ったペンローズスタイル	松田 達磨	113
----------------------------------	-------	-----

事務局からのお知らせ

2018年10月からの領域関連行事	114
事務局からのお知らせ／編集後記	115



ワークショップ点描

領域代表 **播磨 尚朝**

神戸大学大学院理学研究科 教授

6月に領域主催のサマースクールと国際ワークショップを淡路島の夢舞台国際会議場で開催しました。前半の3日間は、6人の講師の方に講義形式の講演をお願いして、後半の3日間は19人の招待講演者を含む一般講演やポスター講演を含むワークショップでした。その内容については、このニュースレターで見ることが出来ると思います。この夏は、この他にも、本領域に関連した多くの国際会議やワークショップが開かれました。[1-4]一般に、大きな学術的会合は国際会議、小さな会合はワークショップと呼ぶことが多いかと思いますが、この違いは大きさだけでしょうか。

改めて辞書を引くと、ワークショップには、もともとの「作業場」や「工房」という意味から転じたものとして、「研究集会」あるいは、「参加者が自主的に体験する講習会」などの意味を見つけることができます。国際会議 (conference) と呼ばれるものに比べて、ワークショップは少人数であることはもちろん、パラレルセッションが無い、比較的1つの講演時間が長く休憩も多い、という特徴があることから、意見交換などをより重視した会合であると言えます。今回参加したプラハのワークショップ[2]では「これは会議ではなくワークショップなのだから少し位時間が延びても構わないだろう」として、質問時間を長く取るように意見する参加者がいて、改めて会議とワークショップの違いを意識しました。(この会議はワークショップではなく、コロキウムという名前がついていたのですが、参加者はワークショップという認識だったのでしょうか) ワorkshopには、多くても数十人の参加者で、パラレルセッションにしない、件数は少ないながらもポスター発表がある、講演時間は30分程度のものが大半である、休憩時間が多く取られている、などの共通点があります。これらに加えて、昼食の提供[2,3,4] (3は夕食も提供されました)、バーベキューなどの屋外のパーティ [1,2,3]、遠足[2,3,4]などの行事も組み込まれているので、参加者が研究の議論やそれ以外の会話で親しくなる仕組みが多く設けられています。宿泊施設も運営側から提供されている場合があります。[3,4]

ワークショップは一箇所に集まって共通のテーマで議論するので、食事を含めてなるべく一緒に過ごすことが出来るようになっていきます。大学や研究所の施設を使っていることが多いですが、昼食は大学のカフェテリアでの提供で、簡単なバイキング形式か3種類のメニューの中から選ぶという質素なもので、日本の大学の食堂に比べれば、恐ろしいほどに少ない選択肢しかありません。屋外のバーベキューパーティにしても、アルコールは提供されるものの食べ物は簡単なものです。(ただし、簡単な割にはベジタリアンへの対応もしっかりしています) 簡単と言ってもおいしくない訳ではありませんが、日本の様に沢山の種類の食材が用意されている訳ではありません。まあ、しかし、ワークショップの食事というのは、こういうものでいいのです。

夢舞台国際会議場でのサマースクールとワークショップでも、なるべく一緒に食事が出来るようにと心がけたつもりです。科研費での主催となると、会議参加費の徴収やアルコールの提供などに制限がありますので、海外でのワークショップと同じ様にとはいきません。それでも、出来るだけ多くの参加者に会場に併設しているホテルに泊まって貰えるような環境を整えるために多くの方にご尽力いただきました。それらの援助のおかげもあって、夕食

時にはほとんどの参加者が一堂に会することが出来てよかったと思います。

日本の良いところの1つは、食事の種類が豊富でしかも質が高いことです。海外からの参加者はそれを楽しみにして来られる方も多くいます。一方で、日本で食事を提供するとなると、すぐに高額になってしまうのが悩ましいところです。海外での質素さまでにならなくても、もう少し簡単にならないかと思うのですが、ホテルでの食事提供となると、それなりの料金になってしまいます。宿泊や食事がもう少し簡単に=安価になると、日本での国際交流ももっと進むのではないかと思っているのは私だけでしょうか。

写真は、プラハでのバーベキューパーティです。この日は、サッカーワールドカップのベルギー対ブラジル戦が行われていました。日本対ブラジル戦でなかったのが残念でなりませんが、誰が言い出したのか、試合を観戦できる処でパーティをしようということになりました。ところが、結局は、パーティをするところにテレビを持ち込んでの観戦となりました。この様な自由な発想と行動力は、研究を進める上でも大事なことはないかと思います。こんな雰囲気ワークショップを日本でもいつか開けたらいいですね。



[1] 12th PRAGUE COLLOQUIUM ON f-ELECTRON SYSTEMS, Prague, 4-7 July 2018, <http://www.kfkl.cz/pcfes>

[2] The International Workshop on Dual Nature of f-electrons (IWDN2018), Wrocław, 9-13 July 2018, <http://iwdn2018.intibs.pl>

[3] International Workshop "Frustration, Orbital Fluctuations, and Topology in Kondo Lattices and their relatives", Dresden, 23-27 July 2018, <https://www.pks.mpg.de/fotok18/>

[4] WORKSHOP "EMERGENT PHENOMENA IN STRONGLY CORRELATED QUANTUM MATTER", Natal, 27-31 August 2018, <https://www.iip.ufrn.br/eventsdetail.php?inf===QTU1EM>



j フェルミオン伝導系における物質開発

野原 実

岡山大学 異分野基礎科学研究所 教授

J-Physics : 多極子伝導系の物理の研究に加わって、これはスゴイと感じた物理のひとつに j フェルミオンがつくるフェルミ面がある。局在電子系においてスピン軌道相互作用が強い場合、スピン角運動量 s と軌道角運動量 l ではなく、全角運動量 j が良い量子数になることは、これまでに学んだ通りである。実際、オレンジ色に輝くナトリウムD線の分裂は、スピン軌道相互作用によって $3p$ 軌道が $j = 3/2$ と $j = 1/2$ へ分裂したことに起因するし、X線回折実験で用いるCu特性X線が $K\alpha 1$ と $K\alpha 2$ に分裂しているのも、 $2p$ 軌道が $j = 3/2$ と $j = 1/2$ へ分裂していることによる。希土類元素における局在した $4f$ 電子についても同様だが、そこで現れる物理は、はるかに豊かである。例えば $\text{PrTM}_2\text{Zn}_{20}$ や $\text{PrTM}_2\text{Al}_{20}$ においては、 Pr^{3+} における $4f^2$ 電子配置のもつ $J = 4$ 状態が T_d 対称性をもつ結晶場により分裂し、基底状態が非クラマース二重項 Γ_3 になる。この状態は、磁性を持たず、純粋な電気四極子をもつ。局在四極子の秩序化、四極子と伝導電子の相互作用による近藤効果、四極子揺らぎを媒介としたエキゾチック超伝導など面白い物理が続々と見出されている [1]。

さて、この f 電子は全角運動量 j を保持したまま遍歴することができるだろうか。単純には、原子核からの束縛を離れると、伝導電子はスピン角運動量 $s = 1/2$ を担って運動するように思える。スピン軌道相互作用は、このスピンをある方向にロックする役割を果たす。多軌道系で、交換相互作用が十分大きければ、フントの規則によって伝導電子は大きなスピン角運動量を保持するかもしれない。一方で、強束縛近似を思い出すと、伝導電子の波動関数は、ブロッホの定理に従うように、原子軌道の線型結合から作られるので、伝導電子が j の情報を持つ可能性もある。このような事を考えていたところ、池田さんと鈴木さんが URu_2Si_2 のフェルミ面を $j = 5/2$ の j_z 成分によって色分けし、フェルミ面が場所によって異なる j_z 成分を持つこと、さらにネスティングによって三十二極子の感受率が増大すること、すなわち URu_2Si_2 の隠れた秩序の正体が三十二極子秩序である可能性を指摘した [2]。 UPt_3 や CeCu_2Si_2 においても同様に j フェルミオンによるフェルミ面が調べられている [3,4]。このように、 j フェルミ面に基づいて秩序状態や超伝導対称性を議論できるのは、極めて強力である。

遷移金属を含む d 電子系においても、鉄系超伝導体の研究で l によるフェルミ面マッピングが行われている。実際には軌道角運動量が凍結しているので、 l_z ではなく、 d_{xy} , d_{yz} , d_{zx} 軌道成分によるマッピングである [5]。ここでは、異なる軌道間のネスティングによる軌道揺らぎ (四極子揺らぎ) や、ネマティック秩序の可能性が議論されている。

以上のように、ウラン系では多自由度をもつ j フェルミオンが、鉄系では軌道自由度を持つ d 電子が、フェルミ面のネスティングに起因して、高次の多極子秩序や高温超伝導などの多彩な物理を生みだしていることが分かつ

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

[2] H. Ikeda, M. Suzuki, R. Arita, T. Takimoto, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, Nature Physics **8**, 528 (2012).

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

[4] H. Ikeda, M. Suzuki, and R. Arita, Phys. Rev. Lett. **114**, 147003 (2015).

[5] 例えば S. Onari and H. Kontani, Phys. Rev. Lett. **109**, 137001 (2012).

た。それでは、鉄に較べてスピン軌道相互作用が大きい5d遷移金属や5p, 6p電子を持つTeやBiなどの重元素を含む化合物においても、f電子系に類似した高次の多極子秩序が現れるのだろうか。さらに、遷移元素や典型元素の化学の特徴である共有結合性を活かした物質開発を進めることで、f電子系とは異なる量子伝導や超伝導を見出すことができるだろうか。これが本研究課題の出発点の一つである。

さて、p電子系やd電子系では、どこを探せばjフェルミオンを見出すことができるだろうか。この解を見出すには、第一原理計算や、対称性による考察が必要に思われる。理論家からのアイデアをお願いしたい。その前に、物質探索のヒントとなる例を幾つか紹介したい。

第一の例は、単体Teである。2018年1月淡路夢舞台国際会議場で開催したトピカルミーティング「どう創る?:キラル磁性体と拡張多極子」での伊藤哲明さん(東京理科大)の招待講演「カイラル結晶構造のテルルにおける電流誘起磁性」、2018年3月物性研での領域全体会議での同氏の招待講演「単体Teにおける電流誘起バルク磁性」を覚えているだろうか。単体TeはTeが右巻らせんか左巻らせんの三方晶構造(空間群 $P3_121$, D_3^4 , #152又は $P3_221$, D_3^6 , #154)である。ナローギャップ半導体で、ブリルアンゾーンのH点に位置する価電子帯の上端がスピン分裂し、右巻結晶ではH点から k_z の正方向へ僅かにずれた所に $j_z = +3/2$ フェルミオンの、負の方向へ僅かにずれた所に $j_z = -3/2$ フェルミオンのホールポケットが存在している。従って、右巻結晶のc軸方向へ電流を流すと、 $j_z = +3/2$ フェルミオンのホールポケットの占有率が高まり、その結果、c軸正方向の磁化が生じたというもので、伊藤さんらはNMRを用いて電流誘起のバルク磁化を検出した[6]。もちろん、右巻と左巻が混在しない、ホモキラルである結晶育成の成功も重要な役割を果たしている。

第二の例は、ハーフホイスラー合金YPtBiの Γ 点における $j = 3/2$ フェルミオンと、その対形成による超伝導である。結晶構造は立方晶MgAgAs型(空間群 $F-43m$, T_d^2 , #216)で、PtとBiがダイヤモンド構造のC位置を交互に占有し、その間にYが挿入されている。トポロジカル半金属であり、Bi 6p軌道に由来した $j = 3/2$ の価電子帯バンドと伝導体バンドが Γ 点で接している。線型分散のバンドが接することでできるディラック点とは異なり、放物線状のバンドが接している。Quadratic band touching (QBT)とも呼ばれていて、ディラック電子系よりも電子状態密度が大きくなる。従って、電子相関の効果が期待できる。このYPtBiが $T_c = 0.8$ Kで超伝導を示した[7]。また等電子配置のYPdBiなどの一群でも超伝導が観測され、上部臨界磁場 H_{c2} の温度依存性からp波超伝導の可能性が指摘されている[8]。さらに面白いことに、理論家のPhilip Brydonらは $j = 3/2$ フェルミオンの電子対形成を指摘している[9]。ここでは、クーパー対がより大きな軌道角運動量を獲得することが可能であり、また時

[6] T. Furukawa, Y. Shimokawa, K. Kobayashi, and T. Itou, Nature Commun. **8**, 954 (2017).

[7] N. P. Butch, P. Syers, K. Kirshenbaum, A. P. Hope, and J. Paglione, Phys. Rev. B **84**, 220504 (R) (2011).

[8] Y. Nakajima *et al.*, Science Advances **1**, e1500242 (2015).

[9] P. M. R. Brydon, Limin Wang, M. Weinert, and D. F. Agterberg, Phys. Rev. Lett. **116**, 177001 (2016).

間反転対称性が破れた超伝導状態も可能である[9]。ハーフホイスラー合金は、膨大な数の物質群を形成している。これまでに熱電材料の観点から重点的に調べられてきたが、超伝導について見直す価値がある。例えば、希土類元素をアルカリ土類金属に置き換えると電子が一つ減り、同時に10族のPdやPtを11族のAuに置き換えると電子が一つ増えるので、系全体の電子数は保存する。この様な系でも $j = 3/2$ フェルミオンが現れることが期待できる。例えばCaAuBiである。

2018年6月に淡路夢舞台国際会議場で開催したJ-Physics 2018: Summer School –Multipoles and Superconductivity– ではPhilip Brydonに“Pairing of $J = 3/2$ fermions in cubic superconductor”と題する講義をお願いした。彼によると $j = 3/2$ フェルミオンによる対形成はハーフホイスラー合金に限ったものではなく、結晶点群 O , T , O_h のいずれかに属する物質における4重縮退した Γ_8 バンドでも生じる可能性があるとのことであった[9]。

第三の例は、パイロクロア構造の酸化物 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ (空間群 $Fd-3m$, O_h^7 , #227) である。ブリルアンゾーンの Γ 点においてQBTが存在し、このバンドはIr 5d軌道に由来する $j = 3/2$ バンドによるものであると考えられている[10]。この化合物はA01の中辻さんらによって精力的に研究されており、他のパイロクロア酸化物と異なって金属であること、100 mKまで磁気双極子の秩序を示さないこと、それにも関わらず50 K以下で巨大な異常ホール効果を示すこと、さらに無磁場でも有限のホール効果を示すなど、極めて面白い物質である。これらはスピンのカイラル秩序によるものであるとされている[11]。これは、J-Physicsの言葉で言い換えると、パイロクロア構造におけるall-in-all outのspin配置を多極子展開すると磁気八極子が含まれ、この磁気八極子を生じさせている反強磁性spin配列が、磁気双極子による強磁性spin配列と同じ磁気点群に属する(同じ変換性を示す)ので、強磁性状態と同様に異常ホール効果が現れるということである。多極子の言葉を用いると、どのような物性の発現が許されるのかが明確に分かる例である。さて、パイロクロア酸化物において $j = 3/2$ フェルミオンが対形成し、超伝導を示すと極めて面白いが、今のところ、そのような報告は無い。一方で、QBTに起因した誘電異常などの新しい物性が報告されている[12]。

さて、以上では、 $j = 3/2$ フェルミオンが現れる3つの物質系を概観した。Teでは $j_z = \pm 3/2$ フェルミポケットに起因して電流誘起磁性が現れ、YPtBiでは $j = 3/2$ フェルミオンのクーパー対形成が議論された。またIr酸化物においても $j = 3/2$ フェルミオンが電気伝導を担っていると考えられる。これらの物質を足がかりにして p 電子系や d 電子系における j フェルミオンを探索していきたい。先に述べた結晶点群 O , T , O_h のいずれかに属する物質における4重縮退した Γ_8 バンドを探すとというのが、最も系統的な調べ方であろう。以下に、いくつかの候補物質を示

[10] T. Kondo et al. Nature Commun. **6**, 10042 (2015).

[11] Y. Machida, S. Nakatsuji, S. Onoda, T. Tayama, and T. Sakakibara, Nature **463**, 210 (2010).

[12] B. Cheng, T. Ohtsuki, D. Chaudhuri, S. Nakatsuji, M. Lippmaa, and N. P. Armitage, Nature Commun. **8**, 2097 (2017).

[13] D. Q. Zhang, H. Q. Wang, J. W. Ruan, G. Yao, and H. J. Zhang, Phys. Rev. B **97**, 195139 (2018).

[14] A. D. Styrkas, Inorganic Materials **39**, 683 (2003).

す。図1を参照してほしい。HgTe (空間群 $F-43m$, T_d^2 , #216) と α -Sn ($Fd-3m$, O_h^7 , #227) は古典的な例である。 α -Snは立方晶ダイヤモンド構造、HgTeではダイヤモンド構造のC位置をHgとTeが交互に占有している。両物質ともブリルアンゾーンの Γ 点に4重縮退した Γ_8 バンドが存在するトポロジカル半金属で、HgTeではTe 5p軌道が、 α -SnではSn 5p軌道が $j=3/2$ バンドを作っている[13]。 α -Snは286.4 K以上の温度で β -Sn (空間群 $I4_1/amd$, D_{4h}^{19} , #141) へ構造相転移する。 β -Snから α -Snへの相転移によって体積が26.6%膨張するので、高温相 β -Snの結晶を育成しても、目的相の α -Snはボロボロに崩れてしまう。InSb (空間群 $F-43m$, T_d^2 , #216) を種結晶として、摂氏マイナス40°Cの氷中で α -Snの単結晶が育成できるとする論文がある[14]。InSbの構造の情報が、準安定相である立方晶の氷 ($Fd-3m$, O_h^7 , #227) を通してSnに伝わり、立方晶の α -Snが成長するらしい。冬になったら試みるつもりである。またInSbも候補物質である。周期表でIn, Sn, Sbと並んでいるので、予測がつくが、バンド計算を見てみるとQBTが存在する。また、先に述べたように、ハーフホイスラー合金にも多数の候補物質が存在する。CaAuBiやYAuPbのバンド計算を見るとQBTの存在が見て取れる。またCaAuBiにおいて2価のCaを一価のLi二つで置き換えた Li_2AgBi と Li_2AuBi (空間群 $F-43m$, T_d^2 , #216) もCaAuBiと等電子配置となるのでBi 6pが作る $j=3/2$ バンドが期待できる。

一方で、思いもよらない物質系において $j=3/2$ フェルミオンが創発するかもしれない。パイロクロア酸化物 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ がその例である。このような発見が物質開発の醍醐味である。ぜひとも理論家と協力して探索を進めて行きたい。

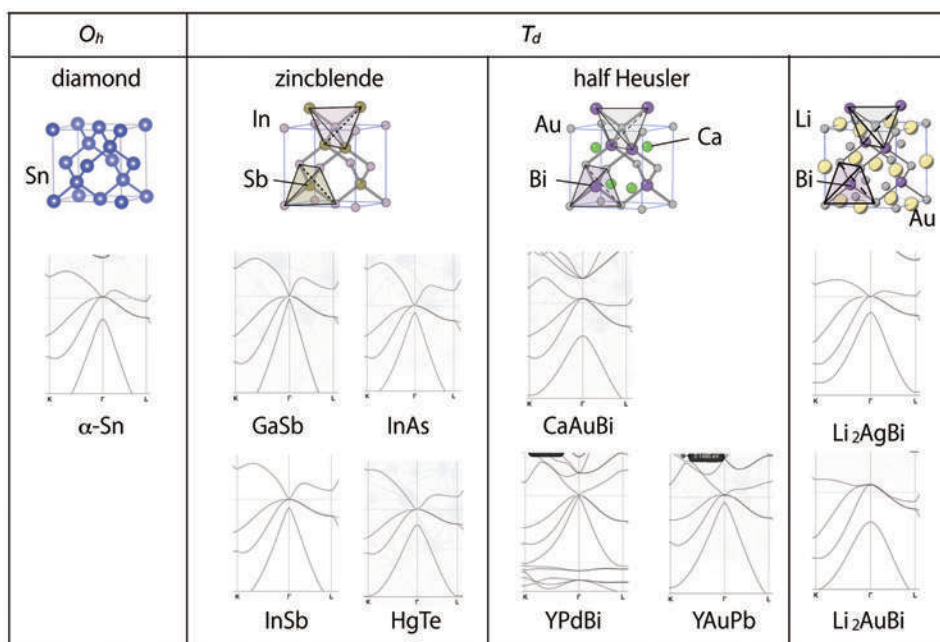


図1. $j=3/2$ フェルミオンによる量子伝導や超伝導が期待できる物質群。いずれも、ダイヤモンド構造から派生した構造である。ブリルアンゾーンの Γ 点において4重縮退したバンドが存在し、Quadratic band touching (QBT) を示している。バンド分散は、aflowlib.orgによる。



多極子秩序系の群論的分類 —秩序が創発する応答への応用—

渡邊 光 / 柳瀬 陽一

京大物理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

本稿では、我々がこれまでに行ってきた研究[1]に基づき、多極子秩序系の物性について解説します。特に奇パリティ多極子秩序に焦点を当て、秩序が誘起する応答や候補物質について触れつつ、今後の期待について述べたいと思います。

従来の強相関電子系の分野においては、4f電子系等局所的な振る舞いの顕著な系を対象として、単一サイト上の複数の電子によって形成される多極子を取り扱ってきました。ここに、電気・磁気多極子モーメントは、次のように定義されます[2]。

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{lm} &= e \sum_i r_i^l \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}} Y_{lm}^*(\hat{r}_i), \\ \hat{M}_{lm} &= \mu_B \sum_i \left(\frac{2l_i}{l+1} + 2s_i \right) \cdot \nabla_i \left(r_i^l \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}} Y_{lm}^*(\hat{r}_i) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

先行研究では、原子内の同一パリティを持った軌道により構成される、偶パリティの多極子モーメントのみが議論されてきました。一方、近年の研究により、「奇パリティ」の多極子自由度の存在やその秩序が生み出す物性に注目が集まっています[3]。

奇パリティ多極子秩序の有力な候補として、近年注目されているのが、いわゆる局所的な反転対称性が破れた系 (locally non-centrosymmetric system) です。例として図1にジグザグ鎖上における反強的秩序を示します。図1(a)に示したジグザグ鎖は結晶構造によって決められた、二つの副格子自由度を持ちます。各副格子位置は反転心となりませんが、副格子を移し替える対称性が保護されているために、系全体の反転対称性が保たれています。

このとき、副格子ごとに反強的な偶パリティ多極子秩序、例えば磁気秩序[図1(b.1)]あるいは軌道秩序[図1(c.1)]が現れた状態は、並進対称性を破らない、何かしらの「強的な(=一様な)秩序」として特徴づけられることが分かります。ここに単位胞全体でみると、磁気単極子[図1(b.2)]、あるいは電気双極子[図1(c.2)]が現れており、これが系全体で一様に秩序しています。よって、一見シンプルな偶パリティ多極子の反強的秩序は、単位胞全体にわたって奇パリティ多極子を形成します。このような、単位胞あるいは複数サイトに広がった多極子(拡張された多極子)の概念は、多極子の物理の舞台を大きく広げるものと期待されます[4]。特に従来の多極子秩序系が立方晶系などの高対称なものに限られているのに対し、奇パリティ多極子秩序に必要な局所的な反転対称性の破れは多くの結晶に存在するため、その候補物質は広範に存在するものと考えられます。

[1] H. Watanabe and Y. Yanase, arXiv:1805.10828; H. Watanabe and Y. Yanase, Phys. Rev. B **96**, 064432 (2017).

[2] Y. Kuramoto et al., J. Phys. Soc. Japan **78**, 072001 (2009); P. Santini et al., Rev. Mod. Phys. **81**, 807 (2009).

[3] 例えば、網塚浩「実験による多極子の検証の進展」(J-Physics ニュースレター, Vol. 2).

[4] 楠瀬博明「多極子の変遷とこれから」(J-Physics ニュースレター, Vol. 2).

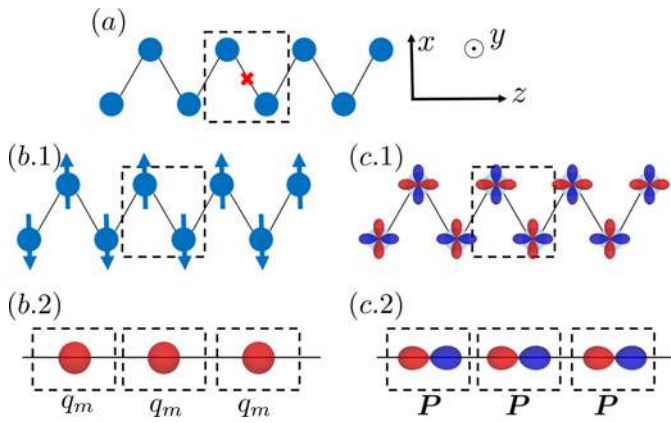


図1：ジグザグ鎖構造、「反強的な」偶パリティ多極子秩序と「強的な」奇パリティ多極子秩序

一般に、反転対称性の破れた系においては、パリティの破れによって生ずるホッピングとスピン軌道相互作用によって、反対称スピン軌道相互作用が現れることが知られています[5]。局所的な反転対称性の破れを持つ系においても同様の作用が現れますが、グローバルな反転対称性を反映して、「副格子自由度に依存した」反対称スピン軌道相互作用が存在します[6]。このような副格子自由度とスピン軌道相互作用の絡み合いは、奇パリティ多極子秩序系の特徴と合致します。実際、この副格子に依存する反対称スピン軌道相互作用は反強的多極子秩序との協奏によって、パリティの破れに起因した応答を誘起することが明らかにされており、奇パリティ多極子秩序系を特徴づける重要な性質であることが示唆されています。

我々はこのような背景を踏まえ、高対称な系に限られない様々な系に対し多極子の観点からアプローチするための手法として、群論的な分類を提案しました。先行研究では立方晶系における分類が報告されていますが[7]、本研究では六方晶や正方晶など低対称な系への適用を見据え、各結晶系を網羅した群論的な分類[8]を行っています。

多極子秩序の群論的な分類 —

表1・2に正方晶系における分類結果を示します。各既約表現において、実空間の基底は結晶中で整列した多極子の秩序状態を記述しています。重要な点として、同一の対称性を持つ(=同じ既約表現に属する)電気・磁気多極子は時間反転の偶奇(\mathcal{T})によって峻別されるべき点にあります。特に奇パリティ多極子秩序系においては、 \mathcal{T} の偶奇のために、実空間の基底である多極子秩序と波数空間の基底とは全く異なった表式を持ちます。 B_{1u} 表現の低次の基底を例にとってみると、次のような対応が得られます。

B_{1u}	r -space	k -space
\mathcal{T} -even	xyz	$k_x \hat{x} - k_y \hat{y}$
\mathcal{T} -odd	$x \hat{x} - y \hat{y}$	$k_x k_y k_z$

すなわち、xyzタイプの電気多極子秩序系には波数空間の基底としていわゆるDresselhausタイプのスピン・運動量結合が対応する一方で、 x^2-y^2 タイプの磁気多極子秩序系には波数空間における反対称な歪みが対応します。したがって、奇パリティ多極子秩序系においては、実空間の基底である多極子秩序と波数空間の基底との間に

[5] 柳瀬陽一・播磨尚朝、固体物理**46**, 283 (2011).

[6] 速水賢・楠瀬博明・求幸年、固体物理**50**, 217 (2015).

[7] R. Shiina, H. Shiba, and P. Thalmeier, JPSJ **66**, 1742 (1997).

[8] 対応する超伝導相の分類として、M. Sigrist and K. Ueda, Rev. Mod. Phys. **63**, 239 (1991).

IR	Q_{lm}	Basis in real space	Basis in momentum space
A_{1g}^+	Q_{20}	z^2	
	Q_{40}, Q_{44}^+		
A_{2g}^+	Q_{44}^-	$xy(x^2 - y^2)$	
B_{1g}^+	Q_{22}^+	$x^2 - y^2$	
	Q_{42}^+		$(\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{k})$
B_{2g}^+	Q_{22}^-	xy	
	Q_{42}^-		
E_g^+	Q_{21}^\pm	$\{yz, zx\}$	
	Q_{41}^\pm, Q_{43}^\pm		
A_{1u}^+	(Q_{54}^-)	$xyz(x^2 - y^2)$	$k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + k_z \hat{z}$ $2k_z \hat{z} - k_x \hat{x} - k_y \hat{y}$ $k_x \hat{y} - k_y \hat{x}$
A_{2u}^+	Q_{10}	z	$k_x \hat{y} - k_y \hat{x}$
	Q_{30}		
B_{1u}^+	Q_{32}^-	xyz	$k_x \hat{x} - k_y \hat{y}$
B_{2u}^+	Q_{32}^+	$z(x^2 - y^2)$	$k_x \hat{y} + k_y \hat{x}$
E_u^+	Q_{11}^\pm	$\{x, y\}$	$\{k_y \hat{z} + k_z \hat{y}, k_z \hat{x} + k_x \hat{z}\}$ $\{k_y \hat{z} - k_z \hat{y}, k_z \hat{x} - k_x \hat{z}\}$
	Q_{31}^\pm, Q_{33}^\pm		

表1：時間反転偶の多極子、実・波数空間の基底の分類結果（正方晶）。 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ は磁化（軸性ベクトル量）を表す。偶パリティの既約表現においては、実空間基底の座標ベクトル r を波数空間座標 k に置き換えることで得られる自明な対応($r \rightarrow k$)がある。

非自明な対応関係が存在し、パリティの破れを特徴づけるような遍歴応答が期待されます。

そこで次に、奇パリティ多極子秩序によって誘起される物性応答について、対称性の観点から整理してみることになります。今回、我々が着目したのはパリティの破れによって誘起される、「電気と磁気」あるいは「電気と歪み」の相関現象です（図2に概念図を示します）。

電場・電流と磁化の交差応答

Maxwell方程式から、自由空間上での電気・磁気相互作用は動的な場合にのみ現れますが、結晶あるいは秩序化に伴う対称性の制約がある場合にはその限りではありません。例えば、静的な電場 E によって磁化 M を誘起する応答、

$$M_\mu = \chi_{\mu\nu} E_\nu, \quad (2)$$

はその一つです。これは絶縁体を扱うマルチフェロイック系の物理では「電気磁気効果」として[9]、伝導系を扱うスピントロニクスでは「エーデルシュタイン効果」として知られています[10]。これら二つの応答はともにパリティの破れた系特有の現象であり、一見して同様な応答と思われそうですが、定性的なレベルで異なる物理的描像を有しています[1,12]。

前者の電気磁気効果が発現するためには、空間・時間反転対称性がともに破れた状態、すなわち奇パリティ磁気多極子秩序の発現が要請されます。実際、その候補物質は酸化クロム Cr_2O_3 のような、磁性体に限られています[11]。一方、エーデルシュタイン効果は、電界効果トランジスタや反転対称性の持たない超伝導体などで議論されているように、外部磁場や磁気秩序による時間反転対称性の破れを必要としません。エーデルシュタイン効果においては、時間反転対称性は電荷の流れに伴う散逸によって破られており、磁化は電場というよりはむしろ電流によって誘起される、というべきでしょう。そのマイクロな物理的起源はフェルミ面上のスピン運動量結合分布の変化によるもので、遍歴性を有する奇パリティ電気多極子秩序系に特有な現象と位置付けられます。

[9] 有馬孝尚「マルチフェロイクス」共立出版。

[10] V. M. Edelstein, Solid State Commun. **73**, 233 (1990).

[11] I. E. Dzyaloshinskii, Sov. Phys. JETP **10**, 628 (1960); D. N. Astrov, Sov. Phys. JETP **11**, 708 (1960).

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

IR	M_{lm}	Basis in real space	Basis in momentum space
A_{1g}^-	(M_{54}^-)	$z(x\hat{x} - y\hat{y})$	
A_{2g}	M_{10}	\hat{z}	
B_{1g}^-	M_{30}	$xy\hat{z}, z(y\hat{x} + x\hat{y})$	$(\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{k})$
B_{2g}	M_{32}^+	$(x^2 - y^2)\hat{z}, z(x\hat{x} - y\hat{y})$	
E_g^-	M_{11}^\pm M_{31}^\pm, M_{33}^\pm	$\{\hat{x}, \hat{y}\}$	
A_{1u}^-	$M_{20}, \mathbf{r} \cdot \mathbf{s}$ M_{40}, M_{44}^\pm	$2z\hat{z} - x\hat{x} - y\hat{y}, \mathbf{x} \cdot \hat{\mathbf{x}}$	$k_x k_y k_z (k_x^2 - k_y^2)$
A_{2u}^-	T_z, M_{44}^-	$x\hat{y} - y\hat{x}$	k_z
B_{1u}^-	M_{22}^+, M_{42}^+	$x\hat{x} - y\hat{y}$	$k_x k_y k_z$
B_{2u}^-	M_{22}^-, M_{42}^-	$y\hat{x} + x\hat{y}$	$k_z (k_x^2 - k_y^2)$
E_u^-	M_{21}^\pm, T_x, T_y M_{41}^\pm, M_{43}^\pm	$\{y\hat{z} - z\hat{y}, z\hat{x} - x\hat{z}\}$ $\{y\hat{z} + z\hat{y}, z\hat{x} + x\hat{z}\}$	$\{k_x, k_y\}$

表2：時間反転奇の多極子、実・波数空間の基底の分類結果（正方晶）。磁気トロイダルモーメントTおよび磁気モノポール $\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}$ も載せている。

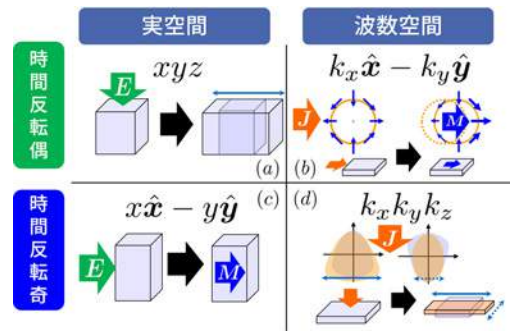


図2：奇パリティ多極子秩序系における創発応答の例：(a)圧電効果、(b)エーデルシュタイン効果、(c)電気磁気効果、(d)磁気圧電効果。

このような事情は図2に示した概念図からも直観的に理解されます。電場（電流）は偶（奇）の時間パリティを持つ極性ベクトルであり、実（波数）空間上のベクトルと同一視することが出来ます（ $\mathbf{E} \leftrightarrow \mathbf{r}, \mathbf{j} \leftrightarrow \mathbf{k}$ ）。したがって、電気磁気効果は磁化と実空間ベクトル（ \Leftrightarrow 電場）との線形結合を持つ、ランク2の磁気多極子秩序系の応答[図2(c)]として、エーデルシュタイン効果は磁化と波数ベクトル（ \Leftrightarrow 電流）との線形結合を持つ、「波数空間上のランク2の磁気多極子」を持った奇パリティ電気多極子系の応答として理解することができます[図2(b)]。

電場・電流と歪みの交差応答

パリティの破れた系においては、電場Eを印加することで格子歪みが現れる、いわゆる圧電効果（逆ピエゾ効果）が許されます：

$$\epsilon_{\mu\nu} = e_{\mu\nu\lambda} E_\lambda. \quad (3)$$

ここに、 $\epsilon_{\mu\nu}$ はストレインテンソルを表します。これは(点群Oを除いた)反転対称性を持たない点群において、常に許され、奇パリティ電気多極子系に特徴的な応答の一つといえます。例えば、xyz型の電気八極子秩序系に電場 E_z を印加して、電気分極を誘起した場合、

$$xyz \xrightarrow{E_z} xy \langle z \rangle, \quad (4)$$

より、xy面内のストレイン（xy型の電気四極子秩序）の誘起が直観的に理解されます[図2(a)]。

更に、先述した電気・磁気の交差応答から類推して、奇パリティ磁気多極子秩序系における圧電効果の対応物が自然と連想されます。すなわち、奇パリティ磁気多極子秩序系においては、「電流」によって歪みを誘起する、新しいタイプの圧電効果（磁気圧電効果）が許されます[1]。実際、xyzを波数空間座標に置き換えると、式(4)からz方向に印加した電流がフェルミ面をシフトさせ、次いでフェルミ面のネマティックな変形、および格子のネマティック秩序を誘起することが分かります[図2(d)]。このように磁気圧電効果はフェルミ面の変化に起因することから、遍歴的な奇パリティ磁気多極子秩序系に特有の現象であり、従来の圧電効果がBaTiO₃やPbTiO₃などの強誘電絶縁体で現れることと対照的といえます。

このように奇パリティを有する電気・磁気多極子秩序系は様々な交差応答を創発する可能性を秘めています。

[13] W. A. Benalcazar, B. A. Bernevig, and T. L. Hughes, Science **357**, 61 (2017).

[14] Y. Gao, D. Vanderbilt, and D. Xiao, Phys. Rev. B **97**, 134423 (2018); A. Shitade, H. Watanabe, and Y. Yanase, A. Shitade, H. Watanabe, and Y. Yanase, Phys. Rev. B **98**, 020407(R) (2018)

特に図2から分かるように、電気磁気効果や圧電効果といった絶縁体特有の現象を、エーデルシュタイン効果・磁気圧電効果など遍歴系特有の現象とたすき掛けの要領で対応付けることができます。このような対応関係は多極子伝導系の創発応答を探索するにあたり、有用な概念といえます。また我々は多極子秩序の分類と並行して、磁性表現論を用いることで、奇パリティ磁気多極子秩序の候補物質を同定しました。これより、BaMn₂As₂のような高い転移温度を持ったMnニクタイト系反強磁性体や、あるいはUCu₅Inといった遍歴性を持ち合わせたU系反強磁性体など、広範かつ高対称な結晶系に限定されない物質群が候補として明らかとなっています。

まとめ、これからの展望・期待 —

本稿では、結晶対称性による多極子秩序系の分類を紹介しました。また分類結果から直ちに、波数空間のオーダーパラメータとの対応を体系的に理解でき、次いで多極子秩序によって誘起される交差応答が理解できることに関しても紹介しました。

本稿で述べた対称性の議論はマクロな多極子秩序の性質を拾うものであり、「多極子モーメントのミクロな評価」や、「多極子とその創発応答との定量的な関係」を明らかにするには不十分かもしれません。しかし、多極子秩序の分類が具体的な多極子秩序物質の理解につながり、多極子物理の更なる発展を後押しするための一助となればと考えています。

とりわけ近年においては、強相関電子系だけでなく、他の分野で「多極子」が議論されています。例えば、2017年に提唱された理論を皮切りに注目を集めている“higher order topological phase”では、トポロジカル物性の側面から高次の電気多極子が議論されています[13]。また、マルチフェロイック系の分野では電気磁気効果と奇パリティ磁気多極子との関連が議論されてきましたが、ごく最近、熱力学的な議論に基づいた多極子モーメントと電気磁気効果との「定量的な」関係が明らかにされました[14]。このように多くの分野で注目を集めていることから、多極子が非常にベーシックな概念であり、したがって物性物理学に大きな影響を与えることが示唆されます。

最後に、J-Physicsコミュニティを通じて、多くの刺激をくださった方々、所属研究室である凝縮系理論グループの方々、共同研究の機会を頂いた下出敦夫さん（理研）をはじめとしてお世話になった方々、また、ニュースレターへの寄稿をご提案いただいた編集委員の皆さまに深く感謝申し上げます。



強相関有機 π -d電子結合系の 電荷-スピン複合物性の解明と探索

井口 敏

東北大学金属材料研究所 准教授

米山 直樹

山梨大学工学部
准教授

佐々木 孝彦

東北大学金属材料研究所
教授

本研究課題は、有機分子bis(ethylenedithio)-tetra thiafulvalene (BEDT-TTF)で構成された強相関有機分子性結晶(BEDT-TTF)₂X(Xはanion)において、BEDT-TTF分子上の π 電子とanion上の局在d電子スピンの結合によって引き起こされる電荷-スピン自由度が結合した特徴的な物性現象を解明し、 π -d電子間相互の普遍的な物理を明らかにしていこうというものです。具体的には、 α'' 相(2次元伝導電子層をなすBEDT-TTF分子配列の1つ[1])のうち、近年我々が見いだした新しいCo含有塩である α'' -(BEDT-TTF)₂Rb_{1.2}Co(SCN)₄を軸に、類似の θ -(BEDT-TTF)₂RbCo(SCN)₄、 θ -(BEDT-TTF)₂RbZn(SCN)₄[2]などにおいて、磁気誘電性や(異常)ホール効果などの交差相関効果や非対角応答を観測、解明していこうと考えています。この物質を見いだす前から、我々のグループでは有機分子性導体における誘電性を中心に研究してきました[3]。有機分子性導体においては、 π 電子スピンのため磁性よりも電荷に関する物性の方がはっきりと現れ、研究も進んでいます。我々も、BEDT-TTF分子がダイマー化を起こしたときにそのダイマー上の電荷は一箇所に留まっているのか、それぞれの分子の上で揺らぎ得るのか(分子内自由度)、またそれらはダイマー型モット絶縁体と電荷秩序絶縁体で違いはあるのか、といった疑問をもとに、誘電性や赤外光学スペクトルの観点から研究してきました。しかし、強相関系に特有のスピンとの関わりについては、はっきりとした答えを見いだすことは出来

ていませんでした。例えば、ダイマー-モット絶縁体である β' -(BEDT-TTF)₂Cl₂は22 Kで反強磁性転移し、低温磁場中ではスピントロップを起こしますが、その温度、磁場では誘電性には特に何の異常も観測できませんでした。

一方、私は有機分子性導体を扱う前はパイロクロア型モリブデン酸化物R₂Mo₂O₇を対象として強磁性的4dスピンのカイラルスピン状態が創り出す異常ホール効果やそれを説明するベリー位相理論を元にするスピнкаイラリティー機構の検証を実験的に行ってきました[4]。Nd₂Mo₂O₇の場合、強いIsing異方性を持ったNdの4f電子スピン(モーメント)によってMoの強磁性スピンの非共面的に傾くこと(f-d相互作用)が重要なのですが、これとのアナロジーがd- π 電子間に適用できるとすると、 α'' -(BEDT-TTF)₂Rb_{1.2}Co(SCN)₄はCoの異方的なd電子スピンの π 電子スピンに影響を与えるということになります。これによって、電荷-スピン自由度の結合による特徴的な物性、例えば、電気磁気効果、磁気誘電性や異常ホール効果(やトポロジカルホール効果)をより強めることが出来るのではないかと考えました。

α'' -(BEDT-TTF)₂Rb_{1.2}Co(SCN)₄は約100 Kで金属-絶縁体転移を引き起こし(図1)、その相転移は電荷秩序相転移であることが分かってきました。転移点直下ではCoも π 電子スピンもまだキュリー的な常磁性状態で、40 Kで恐らく反強磁性的になるのだと考えられます。そして、40 K以下で磁気誘電性に異

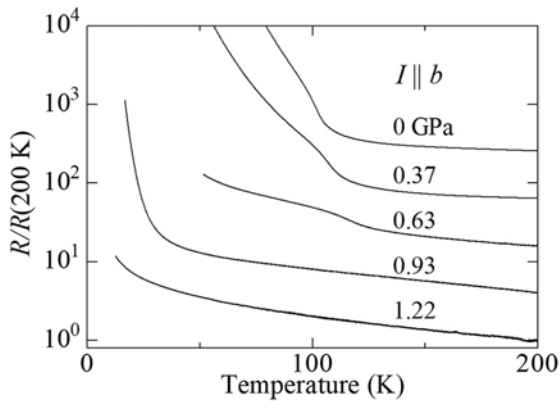


図1. α'' -RbCoの圧力下抵抗(200 Kで規格化)。

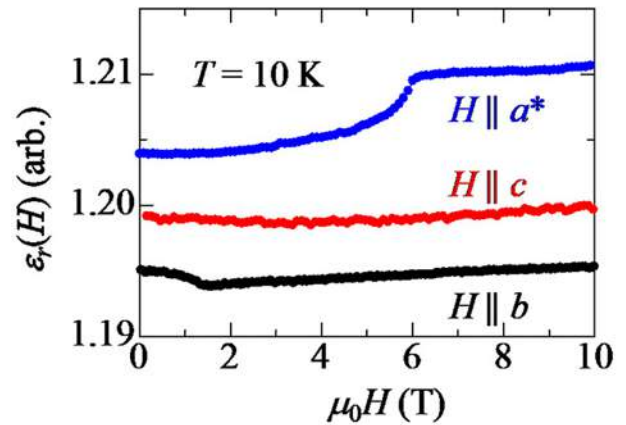


図2. α'' -RbCoの10 Kでの磁気誘電性。

常が見られます(図2)。この異常が見られる磁場中では、(Coしか見えない)磁化にはほぼ異常はなく、 π 電子スピンの何らかの変化、恐らくスピフロップ、が起こったものと考えられます。

dスピンのない β' -(BEDT-TTF)₂Cl₂ではスピフロップに伴う誘電性の異常は観測されなかったことを踏まえると、 α'' -(BEDT-TTF)₂Rb_{1.2}Co(SCN)₄におけるこの異常は、Coスピンによって電気磁気効果が増強されたと見る事が出来そうです。つまり、比較的大きなCoスピンが磁場方向に傾き、その内部磁場(+外部磁場)を感じた π 電子スピンの傾きを変え、フロップする。その際に π 電子の電荷がスピン状態に影響を受け、誘電性に異常をもたらしたのではないかと言うわけです。磁性、誘電性の観点からこれらについて詳細に明らかにしていこうと思います。

また、このような効果が現れるということは、この系の電荷とスピン自由度の結合は十分に観測可能な強度を持ち、非自明なスピン構造やその揺らぎに由来するトポロジカルホール効果や電気磁気効果など

興味深い現象を発現するという事でもあります。 α'' -(BEDT-TTF)₂Rb_{1.2}Co(SCN)₄は電荷秩序絶縁体になってしまうため、外場によって金属化できれば、より低温でのホール効果も測定可能になるでしょう。最近圧力下での抵抗率測定を行ったところ、0.93 GPaで100 Kだった転移温度が40 K程度まで低下し、さらに高圧1.22 GPaではその転移も消え低温まで金属的になるという結果が得られました。電極端子の不具合が発生し詳細な測定は出来なかったので再挑戦し、磁場中での異常伝導現象の観測を試みようと思います。

もう一つ、研究課題を通して解明したいこととしてランダムネスの効果を挙げたいと思います。有機分子性導体では分子間(ファン-デル-ワールス)力に代表される格子系の柔らかさ、anionや分子の配置、配座の自由度など、常温成長による結晶の純良さとは対照的に、低温でランダムネスを作りやすい状況があります。このようなランダムネスによってモット絶縁体でも電荷秩序絶縁体でも電荷のクラスター的

な乱れた状態が部分的に出来るということが分かってきています。同様のことはスピン系にも起こると思いますので、実空間での非自明なスピン構造や揺らぎの効果にランダムネスがどのように効いてくるのか、dスピン系[4]だけでなく π 電子系でも調査してみようと思います。

最後に、現在、SPring-8のBL-43IRにて磁場中の赤外顕微分光測定を簡単に行うことが出来るように改良中です。磁場は ± 14 T、温度は5 K程度までです。5月末のキックオフミーティングの前後で、遠赤外光のロスや測定系の振動を大きく減らすためのやや大がかりな設備変更を行い、期待通りの結果となりました。測定や調整の容易さに関しては期待以上の効果がありましたので、もし試してみたい試料がありましたら、ご連絡お待ちしております。

それでは、約2年間よろしく願いいたします。

[1] S. Hanazato, T. Morr, H. Mori, S. Tanaka, *Physica C* **316**, 243–250 (1999).

[2] H Mori, S. Tanaka, T. Mori, *Phys. Rev. B* **57**, 12023 (1998).

[3] S. Iguchi, S. Sasaki, N. Yoneyama, H. Taniguchi, T. Nishizaki, T. Sasaki, *Phys. Rev. B* **87**, 075107 (2013).

[4] K. Ueda, S. Iguchi, T. Suzuki, S. Ishiwata, Y. Taguchi, Y. Tokura, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 156601 (2012).



高圧力で拓く多極子と伝導電子の混成効果による新奇物性

松林 和幸

電気通信大学 准教授

上床 美也

東京大学物性研究所
教授

自己紹介：

出身地は長崎県ですが、学生時代は名古屋で9年間を過ごし、学位取得後に物性研究所に助教として着任してからは柏で約8年間にわたって研究生活をしてきました。西から東へと徐々に移り住んできましたので、次は海外か?と妄想しておりましたが、3年ほど前に電気通信大学へ異動し、研究室の立ち上げを開始しました。ちょうどほぼ時を同じくして新学術領域研究「J-Physics: 多極子伝導系の物理」が発足していましたが、立ち上げを始めたばかりのほとんど何もない研究室の中で、期待と不安が入り混じった気持ちで今後の研究について思いを巡らせたことを今でも覚えています。それから約3年が経過し、多くの方々のサポートと研究室に配属された学生さんの協力のおかげで、電通大で研究を行う環境が整備できてきました。そしてこの度、J-Physicsの公募研究メンバーとして参加の機会を頂いたことを大変ありがたく感じるとともに、気持ちを新たに一層の努力をしていきたいと思っています。どうぞよろしく願いいたします。

研究紹介：

これまでに私たちは、質の良い高圧力を精密に制御することによって、YbおよびPr系化合物において

価数や四極子自由度の不安定性が関与した量子相転移や圧力誘起超伝導を示すことを見出しました[1,2]。本公募研究では、四極子自由度を持つ非磁性Pr系化合物における四極子秩序と超伝導の相関に着目し、特に局在四極子が伝導電子との強い混成により遍歴性を獲得していく過程で発現する四極子自由度が関与した近藤効果や四極子秩序の量子臨界現象、高圧下で顕在化する超伝導の熱力学的な特性を複合極限環境下(高圧・高磁場・極低温)での精密物性測定によって明らかにすることを目的としています。具体的には、これまでに研究の蓄積があるPrT₂Al₂₀ (T = Ti, V)を主な研究対象としていますが[3,4]、高圧下における比熱および熱電能測定法の開発や、量子振動の観測に取り組むことで、局在四極子が遍歴的と変貌する過程におけるフェルミ面の性質や超伝導特性を実験的に明らかにしたいと考えています。また、領域内の皆様とも積極的に議論や共同研究を進めることで、高圧力を用いた広い意味での物質探索、新奇物性の開拓を行なっていきたいと思っています。よろしく願いいたします。

[1] K. Matsubayashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 086401(2015).

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

[3] A. Sakai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 083702(2012).

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



多極子が示す局在一非局在二重性と秩序の観測

水戸 毅

兵庫県立大学 大学院物質理学研究科 教授

中井 祐介

兵庫県立大学
大学院物質理学研究科 准教授

今年度より公募班として領域に参加させていただきます。よろしくお願いいたします。私は、大阪大学朝山・北岡両先生のもとで学位を取得した後、神戸大学（'01～'07）を経て、10年ほど前から現在の兵庫県立大学に所属しています。主に強相関電子系の核磁気共鳴（NMR）測定による研究を行ってきましたが、多くのNMR研究グループの中で独自性を出すために行ってきたことの 하나가、高圧下測定の推進です。その過程の中で、現在は高強度非磁性材料として普及したNi-Cr-Alからなる合金を、企業との共同によって国内で初めて開発しました。また、神戸大学時代から、Yb、Sm系を対象とした研究に着手しました。当時は、ランタノイド元素を含む重い電子系と言えばCe化合物が主流でしたが、一方でYbRh₂Si₂などが注目されるようになり、私もYb系に関わることを素直に喜んだことを覚えています。

それと、これは少し細かい内容になりますが、私達は原子核をプローブとした測定の中でも、原子核が検出する物質中の局所的な電氣的相互作用を重要視しています。原子核と周囲の格子系（電子系を含む）との相互作用（超微細相互作用）において、超伝導や磁性研究に通常重要なものは磁氣的なゼーマン相互作用です。一方、超微細相互作用にはクーロン相互作用に基づくものもあり、特に核四重極相互作用は、核電荷が持つ四極子と核を取り巻く電荷が作る電場勾配との積に比例する量として表されます。これら電氣的相互作用を利用すれば、物質

中の局所的電荷分布の変化を探查できます。これまでに、スクッテルナイト化合物SmRu₄P₁₂が示す金属絶縁体転移での微小構造変化[1]やURu₂Si₂の隠れた秩序での対称性変化/U価数に関する議論[2,3]、重い電子系YbCo₂Zn₂₀の極低温下での重い電子形成[4]、等の報告を行いました。NMR以外の実験としては、兵庫県立大学（播磨理学キャンパス）の立地条件もあり、放射光施設SPring-8を利用した研究も幾つか行ってきました。

さて、本公募課題での研究についてですが、上述のこれまでの研究をさらに領域課題に合わせて発展をさせていくつもりです。まず、最近我々がSm価数揺動物質SmB₆について行ったSm価数の温度-圧力依存性決定の研究（X線吸収分光@SPring-8 BL39XU）では、この物質が非磁性-磁性転移を示す臨界圧力（7~10 GPa）でのSm価数が、磁氣的な3価から大きくずれて2.8価にも満たないことが明らかになりました[5]。Sm系は、高圧下で局在性が増す物質が多いという点でYb系に似ています。しかし、このように強い中間価数性を示しつつ磁気秩序が生じる現象は、これまでYb系を扱ってきた私には非常に奇異に感じられました。実際、同様の手法で価数を決定したYbとCe化合物の報告を調べた限り、このように希土類イオンが3価から大きくずれた状態で非磁性-磁性転移を示す例は見つけられませんでした。一方、Sm系では、SmSを含む幾つかの物質がSmB₆と同様に3価から大きくずれた状態で磁気秩序

を示すことが知られています。こうしたSm系における特異性は、Smが持つ4f電子配置に原因がある可能性があります。

そこで、SmB₆のSm価数の温度-圧力依存性を詳しく解析した結果、「3価からのずれ」が温度依存性のない項とある項に分離できることを見出しました。前者は「ずれ」の大半の原因で、強い価数揺動性を示す項です。しかし、注目すべきは比較的低温・低圧領域で現れる温度依存項で、低圧でも室温程度の小さな熱エネルギーによってマスクされてしまうことから、低エネルギー電子相関に起因すると考えられます。また、この項の絶対値は温度依存しない項の1/10程度であるにもかかわらず、この項がゼロに近くなる高圧領域で磁気秩序相が出現し、基底状態の決定に強く関わっているようです。以上の結果は、Sm価数には二重性が隠れていることを物語っています。この機構について、CeやYb系と対比から考えると、Smイオンが5~6個の4f電子を有することが重要だと考えられます。その先には、軌道とスピンの合成角運動量を考えるLS結合の考え方が、これらSm系でどこまで有効か、という疑問も生まれてきます。ランタノイド系列では、その殆どが4f多電子系であり、その局在-非局在転移を明らかにするために、まずは幾つかのSm化合物について多角的な研究事例を増やすことが目標です。

最後に一つ付け加えさせていただきたい事柄は、核四重極相互作用を用いた研究についてです。先述の報告[1,2,4]等により、核四重極共鳴(NQR)信号は極微小な結晶変化を検出することが分かってきました。また最近、私達は反強四極子秩序を示すCeB₆の¹¹B-NQR信号の観測(ゼロ磁場)に成功しました。電子系の多極子秩序による結晶対称性変化を、NQR

信号観測を通して調べることが私達の狙いですが、その点でCeB₆は打ってつけの対象です。それは、これまでCeB₆の四極子秩序で予測されているO_{xy}という秩序構造は、磁場中でのNMRその他の実験から類推されたもので、ゼロ磁場中での秩序構造に関する実験情報は非常に乏しいからです。しかし、¹¹B-NQRの測定は共鳴周波数が1 MHzを大きく下回るために技術的に難しく、これまで誰も成功していませんでした。私達がこの研究を計画したのも5年ほど前で、昨年初めて信号観測に成功した次第です。

これまでに得たゼロ磁場下での実験結果では、O_{xy}型秩序から予想されるNQR信号の分裂が観測されていません。この説明として、ゼロ磁場下ではO_{xy}が十分に長距離秩序できていない可能性があります。この詳細を調べるために、今後少しずつ磁場を印加して行って信号の変化を調べていく予定です。実は、¹¹B-NQR信号観測に至るまでには、¹¹B-NMR測定から少しずつ磁場を弱めて行ってやっと辿り着いたという経緯があり、それを逆に戻るのは少し皮肉めいた感じもしますが、ゼロ磁場下での多極子秩序を観測する新たなツールの開発として、楽しみながら研究を進めていきたいと思えます。

-
- [1] S. Masaki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **76** 043714 (2007).
 - [2] T. Mito *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82** 123704 (2013).
 - [3] N. Emi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84** 063702 (2015).
 - [4] T. Mito *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82** 103704 (2013).
 - [5] N. Emi *et al.*, Phys. Rev. B. **97** 161116(R) (2018).



多極子伝導物質の高品質単結晶化と 量子振動効果によるフェルミ面の研究

菅原 仁

神戸大学大学院理学研究科 教授

自己紹介：

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。2年間どうぞよろしくお願いいたします。まずは自己紹介から始めさせていただきます。出身は東北の宮城県栗原市になります。同郷からは菅原文太、石ノ森章太郎、宮藤官九郎などの有名人が輩出されており、私とは全く無関係ですが、少しだけ誇らしく思います。さて、私は幼少のころから電気や機械いじりが大好きで、トランジスタラジオや時計（当時はまだ機械式が主流でした）がどのような仕組みで動いているのだろうかと思い、分解しては組み立てることを繰り返していました。さすがに親に買ってもらったばかりのブリキのおもちゃを分解した時には叱られました…。このように、どのような原理で動いているのだろうかと思う気持ちは現在の研究の原動力になっているのかもしれない。最後に趣味ですが、助手時代までは研究第一で、趣味といえる趣味はありませんでした（そんな余裕がなかったというのが正直なところ）。子供ができ、小学生くらいになると、釣り、金魚やクワガタ・カブトムシの飼育、家庭菜園と、とたんに趣味が増えました。すべて子供からの下請けですが…。最近では子供も成長し、また無趣味に戻りつつあります。

研究紹介：

本公募研究では以下の3つを柱として研究を進めてゆきたいと思います。

- (1) 非磁性二重項基底状態をもつPr系重い電子超伝導体 $\text{PrM}_2\text{Al}_{20}$ ($M=\text{Ti}, \text{V}$) の電子状態の解明
- (2) 近藤半導体的性質と異常な反強磁性転移を示す

$\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$ ($T=\text{Fe}, \text{Ru}, \text{Os}$) の電子状態の解明

(3) 空間反転対称性のない新奇磁性体の開発と超伝導探索

(1), (2) にあげた、いわゆるPr-1-2-20系とCe-1-2-10系の研究は、ここ10年間、強相関電子系の中で最も盛んに研究がなされてきた物質ではないかと思えます。前者は四極子揺らぎを媒介とした超伝導機構 [1-4]、後者はCe化合物としては異常に高い反強磁性転移温度 ($T_N=28\text{K}$) の起源に興味をもたれています [5]。これらの物質の電気伝導などの物性を理解するためにはフェルミ面等の電子状態を知ることが必須となりますが、意外なことにこれまであまり調べられてきませんでした。1つの理由は、ドハース・ファンアルフェン (dHvA) 効果やシュブニコフ・ドハース (SdH) 効果などの量子振動効果が観測できるほどの純良単結晶を得ることが難しいということがあげられます。私たちは、これらの物質が発見された当初から、純良単結晶育成に取り組み、これまでにいくつかの物質についてはフェルミ面の観測に成功しています [6, 7]。PrTi₂Al₂₀ については、これまで比熱測定や超伝導相図から $16m_0$ (m_0 は電子の静止質量) もの有効質量を持つ重い電子状態が予測されていましたが、私たちはdHvA効果測定から最大 $12m_0$ のサイクロトロン有効質量を持つフェルミ面を直接観測し、確かに重い電子状態を示すことを明らかにしました。また、CeRu₂Al₁₀ については、SdH効果測定から反強磁性秩序状態でフェルミ面を観測し、ブリルアンゾーンのわずか2%程度の小さな体積にも関わらず、 $3m_0$ の比較的重い有効質量を持つことを明らかにしました。しかしながら、これらの物質で一番知りたい

のは高圧下での電子状態です。PrTi₂Al₂₀では加圧により四極子秩序が抑制され、8.7GPaで106m₀もの重い電子状態が実現し、高圧下での超伝導転移温度(T_c=1.1K)は常圧下(T_c=0.2K)とくらべ5倍以上も上昇します[3]。一方、CeRu₂Al₁₀では4GPa以上で反強磁性転移が消失し、重い電子状態に移り変わると考えられています[5]。このように加圧下の量子臨界点近傍でどのような電子状態を示すのか極めて興味を持たれますし、これらの物質が示す異常物性を理解する上でも重要だと考えています。Pr-1-2-20系のPrV₂Al₂₀は、PrTi₂Al₂₀に比べてc-f混成が大きく、常圧下ですでに140m₀もの重い電子超伝導状態(T_c=0.05K)が実現しているのではないかと考えられています[4]。一方、Ce-1-2-10系のCeOs₂Al₁₀では、やはり2GPa以上で反強磁性転移が消失し、重い電子系的な電気抵抗の温度依存性を示しますが、CeFe₂Al₁₀では転移無しに加圧とともに半導体的温度依存性から金属的な重い電子系的温度依存性へと変化します[5]。これらの物質の常圧及び高圧下での量子振動効果を測定し、量子臨界点近傍での電子状態を明らかにしたいと思います。

Pr-1-2-20系やCe-1-2-10系の結晶構造の特徴として、希土類原子位置に局所的な空間反転対称性がないことがあげられます。このような結晶構造ではパリ

ティー混成した(偶奇の電子波動関数が混成した)多極子を持つため、強相関効果を通じて新しい量子状態や伝導現象が実現するのではないかと考えられています。本研究では(1),(2)の既知の物質の研究と平行し、(3)の局所および非局所に空間反転対称性のない結晶構造を持つ新奇磁性体の開発と超伝導探索も行います。特にパリティー混成多極子が異常物性にもたらす寄与を、フェルミ面などの電子状態研究を通じて抽出し、多極子伝導系の新概念の創出を目指したいと思います。

[1] A. Sakai and S. Nakatsuji, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 063701 (2011).

[2] A. Sakai, K. Kuga, and S. Nakatsuji, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 083702 (2012).

[3] K. Matsubayashi, T. Tanaka, A. Sakai, S. Nakatsuji, Y. Kubo, and Y. Uwatoko, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 187004 (2012).

[4] M. Tsujimoto, Y. Mtsumoto, T. Tomita, A. Sakai, and S. Nakatsuji, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 267001 (2013).

[5] T. Nishioka, Y. Kawamura, T. Takesaka, R. Kobayashi, H. Kato, M. Matsumura, K. Kodama, K. Matsubayashi, and Y. Uwatoko, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 123705 (2009).

[6] S. Nagashima, T. Nishiwaki, A. Otani, M. Sakoda, E. Matsuoka, H. Harima, and H. Sugawara, *JPS Conf. Proc.* **3**, 011019 (2014).

[7] M. Sakoda, T. Nishiwaki, E. Matsuoka, H. Harima, H. Tanida, M. Sera, and H. Sugawara, *JPS Conf. Proc.* **3**, 011043 (2014).



電子面とホール面を持つ 相関電子系の近藤効果と超伝導

星野 晋太郎

埼玉大学 大学院理工学研究科 助教

この度はJ-Physicsの領域研究に関われることを大変うれしく思います。まず簡単に経歴について自己紹介させていただきます。私は2012年3月に東北大学で倉本義夫先生の下で博士号を取得したのち、東北大学、東京大学、フリブール大学（スイス）、理化学研究所でポスドクを経験し2017年10月から埼玉大学の物性理論研究室の助教として着任しました。この過程を経て、重い電子系の経験・知識が源流にありつつ、超伝導体やカイラル磁性体の電磁的性質などにも研究対象が広がり、現在に至っています。

全国的に見ても珍しいケースだと思いますが、埼玉大学では、助教の身分でありながら独立した研究室運営を行っており、物性理論研究室では品岡寛助教と私の2人がそれぞれ独立した研究室を主宰しています。研究室セミナーは合同で開催しており、毎週研究アップデートやレビューなどを行っています。最近では新しい試みとして、実験系も巻き込んで、外部の講師の方に講演をしていただく物性コロキウムを開催しています。7月にはU系超伝導の講演をしていただきました。

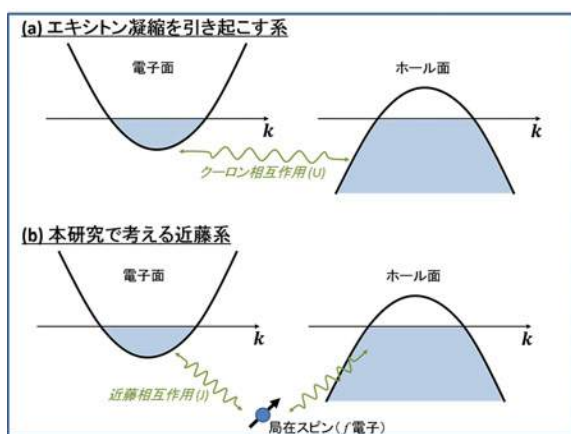
私の研究目標としては、物質中の電子集団が持つ不思議な物性の起源解明および新しい法則・現象・機能の開拓を目指しており、特に超伝導に興味を持っています。超伝導機構を理解するためには超伝導の周囲にある磁性・軌道・異常金属といったものを含めて統一的に論じる必要があり、超伝導だけに

とどまらない強相関電子系の性質を明らかにしなければなりません。それゆえ、とても奥深くチャレンジなテーマであると思います。また、これとは異なる観点として、新しいクラスの超伝導体（トポロジカル超伝導体）においてはマヨラナフェルミオンの物理も注目を集めています。これを用いた性能の良い量子コンピュータの実現も期待されており、超伝導研究のフロンティアは応用上の目標を据えて今なお広がり続けており、今後も重要なテーマであり続けると思います。

採択していただいた研究課題では、重い電子系の超伝導の発現機構に関して、新しい視点を理論的に提案したいと考えています。重い電子系は非従来型の超伝導体の宝庫であり、その中でも近年CeCu₂Si₂やUBe₁₃において、フルギャップのs波超伝導を示唆する結果が実験的に得られていることに注目しました[1,2]。強相関電子系における通常の超伝導機構では、強い電子間斥力を避けるためにd波ペアやp波ペアのように異方的な電子対が形成されます。そこで今回は、非従来型超伝導のなかでも、重い電子系特有のフルギャップs波ペアを生み出す可能性について考えました。

私はこれまで、局在f電子の多極子自由度が、2つの縮退したチャンネル自由度を持つ伝導電子と相互作用することによって生じる近藤効果（マルチチャンネル近藤効果）に注目し、その結果生じる非自明な

- [1] S. Kittaka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 067002 (2014)
 [2] Y. Shimizu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 147002 (2015)
 [3] S. Hoshino, J. Otsuki and Y. Kuramoto, Phys. Rev. Lett. **107**, 247202 (2011)
 [4] S. Hoshino and Y. Kuramoto, Phys. Rev. Lett. **112**, 167204 (2014)



秩序を理論的に明らかにしてきました[3,4]。そのときの経験から、2つのチャンネルというのは、半金属のような電子系を持つフェルミ面、すなわち電子面とホール面の自由度と解釈してもよいということを着想しました。このような電子系はエキシトン凝縮を引き起こす系としてこれまで議論されています（レビューとして文献[5]）。図（a）に示したように電子間にクーロン相互作用があると、電子面上の粒子がホール面上へと散乱されるプロセスが生じ、電子状態の再構成が起こることが知られています。これは超伝導における、引力によってフェルミ面をギャップアウトする過程に似ています。クーパー対の凝縮が超伝導であるので、そのアナロジーからエキシトン凝縮と呼ばれています。一方、f電子系で重要になるのは局在電子と伝導電子の相互作用であります。こうして図（b）に示すように、「伝導電子の電子面とホール面が局在スピと結合してマルチチャンネル近藤効果を引き起こした場合、どのような現象が起こるか？」という問いを着想するに至りました。この系では、電子面とホール面が局在スピと近藤一重項を作ろうとして競合した結果、両者を量子力学的に重ね合わせた状態が実現すると考えられます。これは電子とホールが混じったBogoliubov準粒子の形成を示唆し、それゆえ超伝導になることが予想されます。

マルチチャンネル近藤効果はNozieresとBlandinの提案[6]に端を発し、Coxの四極子近藤効果に理論[7]を契機として、U系化合物やPr化合物において当該領域においても現在に至るまで議論が続けられています。マルチチャンネル近藤効果に起因する超伝導の研究は、1990年代のEmeryとKivelsonの理論[8]にはじまり、現在に至るまでに私を含む多くの研究者によって進められてきました。この概念は格子欠陥が誘起するマルチチャンネル近藤効果や、量子ドット系における近藤効果など、f電子系の枠にとどまらない波及効果を備えています。本研究はこの概念を、電子面とホール面を持つ伝導電子系に対して拡張し、超伝導と結び付け、新しい視点からさらに深化するものと位置付けることができます。

具体的には、本研究によってギャップ関数の性質、比熱などの熱力学量、電磁応答関数、クーロン相互作用の効果、トポロジカル超伝導の可能性、乱れに対する耐性などの性質を理論的に明らかにしたいと考えています。対象とするのはs波超伝導ですが、近藤効果が誘起する超伝導であるので、通常のs波のBCS超伝導体との差異に注目して議論をしていく予定です。本研究を遂行することによって明らかになった知見は、さらなる理論的研究として磁場下の超伝導量子渦・接合系・界面・トポロジカル端状態の研究へも繋がるものと考えられます。また、当該領域においてPr1-2-20系と呼ばれる物質群でマルチチャンネル近藤効果が活発に議論されていますが、本研究はこの点においても関連があります。

以上の研究は埼玉大の飯村翔馬氏（D1）、理研CEMSの平山元昭氏と共同で進めています。これを通して、J-Physicsの領域研究に貢献していきたいと思ひます。2年間、どうぞよろしくお願ひ申し上げます。

[5] J. Kunes, J. Phys.: Condens. Matter **27**, 333201 (2015)
 [6] Ph. Nozieres and A. Blandin, J. Physique **41**, 193 (1980)
 [7] D.L. Cox, Phys. Rev. Lett. **59**, 1240 (1987)
 [8] V.J. Emery and S.A. Kivelson, Phys. Rev. B **46**, 10812 (1992)



ウラン化合物における多重超伝導相の解明と多極子クーパ対の動的電磁応答

藤本 聡

大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

水島 健

大阪大学大学院 基礎工学研究科
准教授

多田 靖啓

東京大学 物性研究所
助教

ウラン化合物の超伝導体は、 $U_{1-x}Th_xBe_{13}$ 、 UPt_3 、 URu_2S_2 、 UGe_2 、 $URhGe$ 、 $UCoGe$ 等、数多く存在し、中には数十年前から研究されている重い電子系の“古典的な”物質もあります。これらの系は、 URu_2S_2 以外はすべてスピン3重項クーパ対の可能性が強く示唆されています。(ちなみに不思議なことにf-電子系超伝導体でスピン3重項対と言われている物質は全てウラン系化合物です。このことに深い理由があるのかは分かりません。)これらの系では磁場温度相図や組成置換によって、複数の異なる超伝導相が実現することが知られています。これらの超伝導状態は、現代的な観点からはトポロジカル超伝導、ワイル超伝導、ディラック超伝導が実現している可能性が強く示唆されており、これら新規超伝導状態を特徴付ける物性現象について理論予言し、多重超伝導相を解明することが本課題の目的の一つです。中でもワイル超伝導は表面状態だけでなく、バルク応答にワイル準粒子起源の特徴的な新規物性が現れるという点で大変興味深く、 $U_{1-x}Th_xBe_{13}$ の $x\sim 0.02\sim 0.04$ における時間反転対称性の破れた低温相や、 UPt_3 の低磁場低温相、 $UCoGe$ 、 URu_2S_2 等で実現している可能性があります。この状態ではBerry曲率由来の異常熱ホール効果や、カイラル異常由来の特異な熱輸送現象(負の熱磁気抵抗)、格子変形による超伝導電

流の発生などが理論的に期待されます。[1-3]ただ、それらの現象を実験で観測するための条件はかなり厳しく、より実現可能性の高い新規物性現象を探索することが、今後の重要課題です。また、本課題のもう一つの重要なテーマとして、j-多重項クーパ対に由来する、従来のスピン1重項対・スピン3重項対とは異なる新規超伝導物性を探索することです。前述の幾つかのウラン化合物では、 $j_z=\pm 5/2, \pm 3/2, \pm 1/2$ の複数のj-3重項が共存している可能性があります。平均場レベルでは多バンド-多ギャップの超伝導と見なせて新規性がないですが、揺らぎまで考慮すると、多極子クーパ対固有の物性が発現する可能性があります。例えば、多極子クーパ対の揺らぎは、遍歴電子系の多極子モーメントと結合することがGL理論の簡単な考察からわかり、その相互作用に由来する電磁応答を検出することによって、多極子クーパ対を検証できる可能性があります。

J-Physicsには、ウラン化合物超伝導体の実験研究に関する世界的第一人者が数多くおられます。実験グループとも協力しながら本研究を推進していきたいと考えていますのでよろしくお願いします。

[1] M. Sato and S. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 072001 (2016)

[2] T. Matsushita, T. Liu, T. Mizushima, and S. Fujimoto, Phys. Rev. B **97**, 134519 (2018)

[3] T. Kobayashi, T. Matsushita, T. Mizushima, A. Tsuruta, and S. Fujimoto, arXiv:1806.00993



磁場角度分解比熱・エントロピー測定から アプローチする多極子伝導系の新奇量子相

橘高 俊一郎

東京大学 物性研究所 助教

2018年度より公募研究班に加わりました東京大学の橘高俊一郎と申します。よろしくお願ひ致します。私は、京都大学理学研究科の固体量子物性研究室（前野研）でSr₂RuO₄の超伝導研究により博士号を取得した後、2010年4月に東大物性研榊原研究室の助教に着任して現在に至ります。磁場方位精密制御下での極低温物性測定を得意とし、これまでは非従来型超伝導の研究に力を入れて参りました[1]。最近と同実験手法をフラストレート磁性体やPr1-2-20系などに応用して新境地を開拓しようと画策しています。今年度より基盤Bを採択して頂いたので、7T/3Tベクトルマグネットを新たに導入して実験装置を更に強化する予定です。本領域を通じて共同研究を積極的に行いたいと思っておりますので、皆様お気軽にお声かけください。目下の悩みは物性研助教の10年任期です。今回の公募研究期間終了と共に物性研助教の任期も満了を迎えてしまうため、期間内に新しいポストを見つけることも個人的な重要課題です。

今年は大谷選手の二刀流が注目を集めていますが（本稿執筆中にケガで離脱、残念!）、私も「二刀流の実験家」であることを常々心掛けています。私の「二刀流」の定義は、堅実な実験研究から着実に成果を出しながら、試行錯誤を要する挑戦的な研究課題にも地道に取り組むことです。後者は一筋縄にはいきませんが、最近いくつかの取り組みが花開き、開発中の測定技術が実践で使用できる段階になってきました。本公募研究では、こうした新しい実験手法

も積極的に活用していきたいと思っています。

本稿では、それら新しい実験手法について簡単に紹介したいと思います。一つは磁場角度分解エントロピー測定です[2]。超伝導ギャップ構造の研究[1]を主な舞台として発展させてきた磁場角度分解比熱測定装置をスピンアイス物質Dy₂Ti₂O₇に応用した際にそのヒントを得ました。当時、様々な磁場方位の下でDy₂Ti₂O₇の比熱測定を行っていたところ、ある条件下で磁場回転中に試料温度が上昇したり下降したりすることに気がつきました。磁場の回転方向を変えると試料温度の上下も反転したため、磁場回転に伴う磁気熱量効果であることが直ぐに分かりました。その流れで $(\delta S / \delta \Phi_H)_{T,H} = -C/T(\delta T / \delta \Phi_H)_{S,H}$ の熱力学関係式を導出し、磁場回転時の試料温度変化および比熱を精密に測定すればエントロピーの磁場角度依存性を従来よりも高速かつ高分解能に明らかにすることができると着想しました。コンピュータによる自動測定に任せきりにせず、現場で実験結果と向き合ってきたからこそその発見でした。その後、外因性の発熱が生じにくく、磁気トルクにも強いデザインの熱量計を新たに開発し、それを用いてDy₂Ti₂O₇の磁気熱量効果、比熱、エントロピーの磁場角度依存性を精密測定することに成功しました（図1）。エントロピーは比熱と同様に理論計算可能な熱力学量であり、多くの場合、相転移で敏感に変化するため、多極子伝導系の新奇量子相の研究にも強力な手法になると期待しています。本公募研究では、Pr1-2-20系

[1] T. Sakakibara, S. Kittaka, and K. Machida, Rep. Prog. Phys. **79**, 094002 (2016).

[2] S. Kittaka, S. Nakamura, H. Kadowaki, H. Takatsu, and T. Sakakibara, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 073601 (2018).

やURu₂Si₂などの研究に応用して、機構解明に繋がる実験事実を提供していきたいと思っています。

もう一つの实用段階に至りつつある実験手法が、静水圧性の良い10 GPa級の高圧下磁場角度分解比熱測定です。ここ数年、松林和幸氏（電通大）と協力して開発を進めてきました。本測定手法のポイントは試料の温度計とヒーターに小型の厚膜チップ抵抗器を採用している点です。まず、数ある市販の抵抗器（安価!）の中から低温で抵抗温度計として使用できるものを探し出し[3]、その中から圧力下でも壊れることなく使用できるものを更に選別しました。1 GPa以上の圧力下で絶縁化してしまう抵抗器が多く、落胆することも多々ありましたが、地道な探索により幸いにも圧力下で温度計・ヒーターとして使用できる抵抗器を見つけることができました。既に、それらを用いてピストンシリンダー型圧力セル中のCeCoIn₅の圧力下磁場角度分解比熱測定に成功しています。厚膜チップ抵抗器は磁場に比較的鈍感なため、比熱の温度・磁場角度依存性だけでなく磁場依存性も精度良く測定することができます。超伝導ギャップのノードの有無の検証には比熱の磁場依存性が鍵となるため、この利点は重要な意味を持ちます。また、ジュール熱を利用しているため圧力媒体への熱の逃げも評価すれば試料比熱の絶対値まで評価することも可能です。現在、10 GPa級の対向アンビル型圧力セル中でテストを進めている最中です。今後も試行錯誤を続けて測定技術の向上に努めたいと思っています

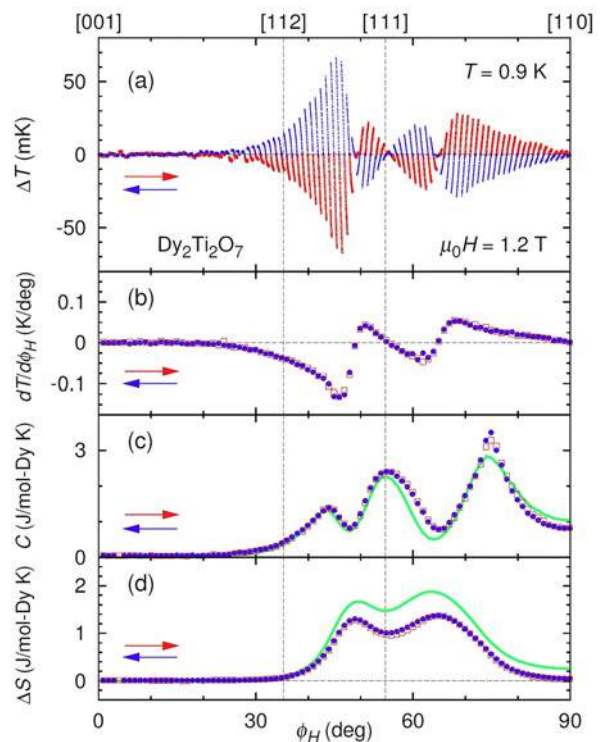


図1: (1-10)面内磁場回転下におけるDy₂Ti₂O₇の(a), (b)磁気熱量効果、(c)比熱、(d)エントロピーの角度依存性[2]。(c), (d)の実線はスピニアイス模型に基づく数値計算結果。

ます。本公募研究期間中にはCeCu₂Si₂の圧力下磁場角度分解比熱測定を行い、常圧とは異なる機構の対形成が期待される高圧超伝導相のギャップ構造を決定したいと思っています。本測定手法が確立できれば他の系にも応用可能であり、将来的には四極子自由度を持つPrTi₂Al₂₀の超伝導ギャップ構造を高圧下で調べることも計画しています。

勿論、常圧下での磁場角度分解比熱測定による超伝導ギャップ構造の研究にも引き続き力を入れていきます。最近の成果として、清水悠晴、青木大（東北大学）各氏らとの共同研究によりU_{1-x}Th_xBe₁₃が超伝導多重相内（x = 0.03の低温低磁場相）でもフルギャップ超伝導状態にある可能性を指摘しました[4]。今後も様々なエキゾチック超伝導体のギャップ対称性を明らかにして、対形成におけるスピンや軌道の役割に迫っていきたくと思っています。

皆様、どうぞよろしくお願い致します。

[3] 橋高俊一郎、物性研究・電子版**6**, 061204 (2017)

[4] Y. Shimizu, S. Kittaka, S. Nakamura, T. Sakakibara, D. Aoki, Y. Homma, A. Nakamura, and K. Machida, Phys. Rev. B **96**, 100505(R) (2017).



スピン軌道相互作用による不安定性で形成される遍歴多極子秩序

平井 大悟郎

東京大学 物性研究所 助教

廣井 善二

東京大学 物性研究所
教授

近年、重い元素を含む化合物において、トポロジカル絶縁体などのスピン軌道相互作用(SOI)に由来した新しい量子相が観測され、大きな注目を集めています。2015年にL. HuはこのSOIに由来してフェルミ面に不安定性が生じ、自発的に反転対称性が破れる可能性を指摘しました[1]。結晶構造に反転対称を持つ金属では、フェルミ面はスピンのアップとダウンが縮退しています。SOIが強く働くと、スピンと軌道角運動量を結合させようとはしますが、対称性の要請からスピン偏極したフェルミ面を形成することはできません。このことは逆に、SOIによるエネルギー利得が十分に大きければ、自発的に反転対称性を破り、スピン偏極したフェルミ面を形成するような相転移が起こることを示唆しています。そして、そのような特異な相転移を示す現実の物質として注目が集まっているのが5dパイロクロア酸化物 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ です。 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ は2001年に超伝導転移($T_c = 1\text{ K}$)を示すことが明らかになり、パイロクロア酸化物で初めて発見された超伝導体として注目を集めました。この物質の変わっているところは、その結晶構造にあります。室温付近では通常のパイロクロア構造である立方晶の構造ですが、 $T_{s1} = 200\text{ K}$ において反転対称性の破れを伴い正方晶へと構造相転移を起こします。

さらに、 $T_{s2} = 120\text{ K}$ において反転対称性が破れたまま、異なる空間群の正方晶の構造へと一次転移で構造が変化します。 T_{s1} においては、抵抗率の温度依存性が急激に変化し磁化率は大きく減少するにも関わ

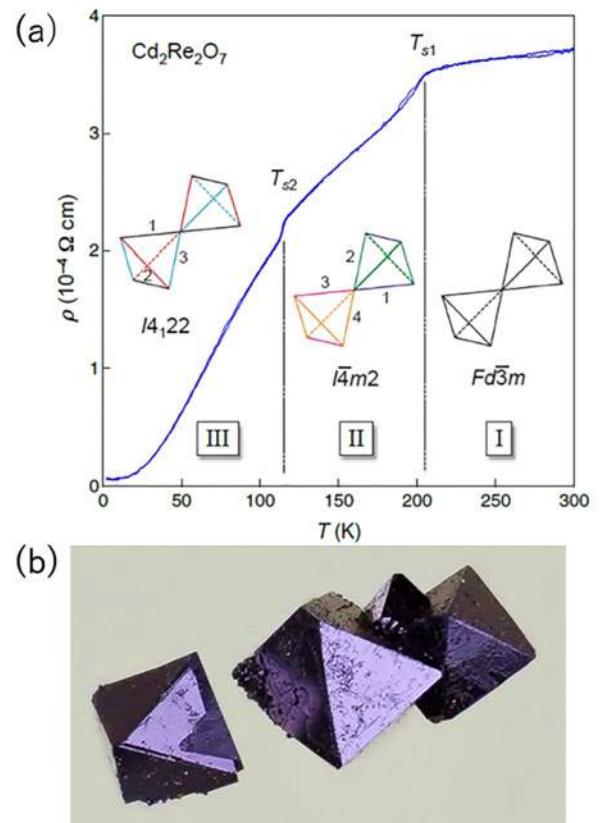


図 (a) $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ の抵抗率の温度依存性。 $T_{s1} = 200\text{ K}$ において反転対称性が破れ、 $T_{s2} = 120\text{ K}$ においてさらに構造相転移が起こる[2]。(b) 純良化した $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ の単結晶

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

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

[3] J. Harter *et al.*, Science **356**, 295 (2017)

[4] Y. Matsubayashi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 053702 (2018)

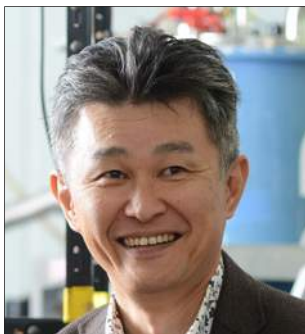
らず、格子変形が非常に小さいことから、この構造変形は電子系により駆動されたものであると考えられてきました。しかし、その起源については明らかではありませんでした[2]。最近、L. Huの理論に触発されて、反転対称性の破れに敏感な第二次高調波発生の実験が行われました。この結果、 k 空間における多極子秩序形成が T_{s1} での相転移の起源である可能性が指摘されています[3]。

これら理論及び実験の進展を受けて、私たちはスピン分裂したフェルミ面の直接観測を目指し、 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ の量子振動の観測に取り組みました。量子振動の観測のために単結晶の純良化を行った結果、先行研究では30程度だった残留抵抗比が1桁ほど向上し最高で300程度の結晶が得られるようになりました。そして純良化した単結晶を用いた磁気トルク測定によって、この物質で初めて明瞭な量子振動を観測しました[4]。量子振動の角度依存性を解析すると、SOIと反転対称性の破れによってフェルミ面がスピン分裂していることが明らかになりました。

$\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ では T_{s1} において自発的に反転対称性が破れ、スピン偏極したフェルミ面が形成されます。この転移は k 空間における遍歴多極子秩序の形成と捉えることができます。結晶の空間群から、 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ の遍歴多極子秩序相ではフェルミ面は特異なスピン構造を有することが予想されます。予想されるスピン構造からは電流磁気効果が発現すると考えられるため、私たちは逆に、電流磁気効果を観測することで、 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ におけるフェルミ面のスピン構造を明らかにします。そして、 k 空間における多極子秩序の性質に迫りたいと考えています。

自己紹介

私は5d遷移金属化合物が示す、SOIに由来した物性に興味をもち、5d化合物の物質合成を軸に物性研究を行っています。生まれ育ったのは奈良県で、大阪との県境の山がちな街です。大学入学以降は地元の関西を離れ、もう15年以上が経ちますが、いまだに関西弁が抜けません。学部4年生から博士課程を修了するまで、東京大学の高木英典先生のもとで物性の基礎から教わりました。高圧合成による新物質の探索やニクタイトの新超伝導体の探索を通して、ものづくりの難しさと楽しさを学びました。その後、プリンストン大R. Cava先生のもとで2年ポスドクをし、東大理物に移られた高木英典先生のもとで2年間薄膜の研究を行った後、現在の物性研の廣井先生の研究室で助教として研究を行っています。これまでd電子系の化合物ばかりを扱ってきたので、これを機にf電子系化合物についても勉強したいと思います。また、大幅な純良化に成功した $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ の単結晶を通じて、皆さまと共同研究をさせていただければと思います。二年間精一杯頑張ります。どうぞよろしく願いいたします。



Cd₂Re₂O₇の高圧下における奇パリティ多極子秩序とパリティゆらぎ超伝導

小林 達生

岡山大学大学院自然科学研究科 教授

本研究で対象とするCd₂Re₂O₇研究を始めたのは10年前の話です。[1] 結晶構造の反転対称性の有無とクーパ対の対称性の話が盛んに行われている時期で、私たちも反転対称性のない強磁性体Uirの圧力誘起超伝導の理解に苦しんでおりました。(この件は、圧力誘起構造相転移が関連していて、バルクの超伝導は実現できないということがわかって、撤退しました。[2]) そんな時に、廣井さんがCd₂Re₂O₇の超伝導の圧力効果が明らかになっていないと・・・Cd₂Re₂O₇は常圧で二つの構造相転移を示し、反転対称性を失ったIII相で超伝導が出現します。加圧すると、反転対称性を失う相転移の転移温度 T_{s1} は下がるので、高圧下で T_{s1} 転移が消滅すれば、反転対称性の有無と超伝導の関係を調べられるのではないかと、という動機でした。

さて、実際に実験を行ってみると(図1)、 T_{s1} 転移は P_c (= 4.2 GPa) 近傍で複数の圧力誘起相を示し、低温までI相を保持することができない。「こいつはパイロクロア構造がよっぽど嫌いなものね。」その後X線回折実験 [3] で、 P_c 以上のV相、VIII相では反転対

称性が存在することが明らかになったが、反転対称性の有無で(IV、VII、VIII相で)超伝導転移温度 T_c は顕著な変化を示さない。一方、臨界磁場 H_c2 は P_c 近傍で増大し、常圧の27倍に達し、パウリリミッティング磁場を超え p 波超伝導を示唆する。反転対称性がない相で H_c2 が増大するのは、パリティ混成で期待できるが、反転対称性が存在するVIII相で p 波だというのは良くわからない。ということで、この研究は中断することとなった。

そうこうしているうちに、2015年にLiang Fuらにより、これらの実験結果に関連して興味深い提案が行われた。[4] スピン軌道結合金属では、時間反転対称性を保存し空間反転対称性が破れた相が出現することが予測され、Cd₂Re₂O₇における T_{s1} 転移は奇パリティ多重極秩序との提案である。さらに、この臨界点近傍では、電子軌道のパリティを破る秩序のゆらぎ(パリティゆらぎ)が奇パリティ対チャンネルにおける引力を生み、 s 波対と競合する可能性が指摘された。Y. Wangらはこのアイデアから図2の相図を提案している。常圧での超伝導は s 波が優勢な $s+\epsilon p$ 波

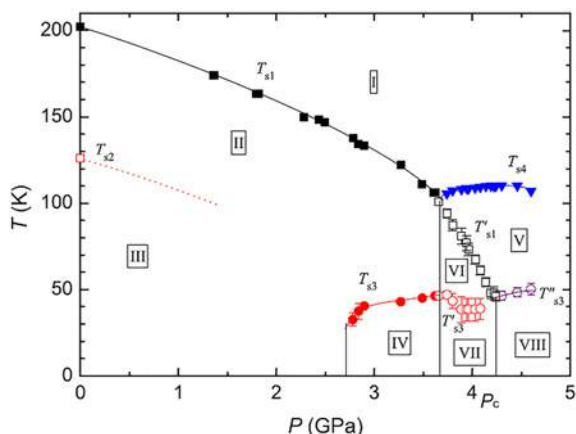


図1 Cd₂Re₂O₇の圧力-温度相図 [1]

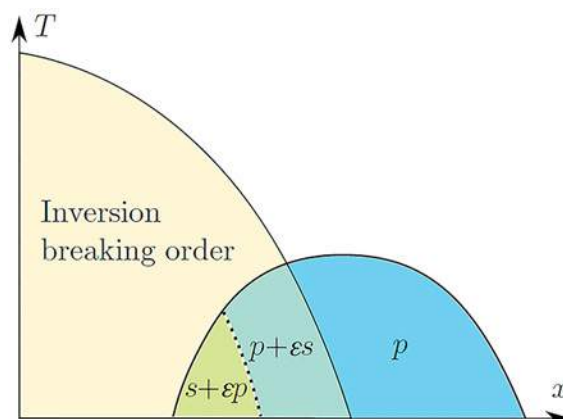


図2 空間反転対称性が破れる秩序と超伝導の相図 [5]

状態であり、臨界点に近づくとパリティゆらぎの増大により、 T_c の増大とともに p 波が優勢な $p+\epsilon s$ 波状態に移る。また、臨界点以上で空間反転対称性が復活すると、パリティゆらぎによって p 波超伝導が現れる。

5年ほどの間、人に見向きもされなかった実験結果が日の目を見た瞬間である。これがあるからこの業界はスバラシイ。実際の相図(図1)では多くの高圧相が存在し、それほど単純な話ではないが、この提案に乗っかってみることにする。

本研究では、 $Cd_2Re_2O_7$ の超伝導について以下の3点を明らかにすることを目的とします。

- ① p 波超伝導の検証：高圧・極低温下の比熱・NMR測定により、 p 波超伝導の検証を行う。
- ② パリティゆらぎ効果の探索：キャリア数の量子ゆらぎ効果としてホール抵抗の温度変化に顕著に現われることを期待している。
- ③ $P-T$ 相図の確立：純良単結晶を用いて、 P_c 近傍での相分離を再検討する。さらに、より高圧までの測定を行い、パリティゆらぎがあればその抑制にもなう超伝導特性の変化を調べる。

あらためてタイトルを見直してみると、「パリティゆらぎ」がすでに存在する感じになってますが、何の証拠もありません。奇パリティ多極子秩序とパリティゆらぎ超伝導は、本領域で推進している「多極子に起因する特異な量子伝導現象」や「新機軸の超伝導研究」そのものだと思うので、なんとか尻尾をつかめる

ことを期待しています。

当研究室では高圧・極低温・強磁場下での物性実験を行っており、主に強相関電子系における高圧下での磁性-非磁性転移と超伝導の探索や固体酸素の磁場誘起構造相転移の研究を行ってきました。研究スタイルとしては、人ができない(やらない?)オリジナルな実験をやろう、ということに尽きると思います。研究室のメンバーとしては、荒木新吾准教授と秋葉和人助教が在籍しており、数名の大学院生と協力して、研究を推進していきます。

新学術領域研究では領域内での共同研究が重要なんだと思います。久しぶりに本領域の研究会に参加して思うことは、話についていけないことも多いですが、いろんな意味で気付かされることが多いということです。二年はちょっと短いですが、その後の発展につながるような共同研究を見つけないと思っています。

小林達生(略歴)

1985年神戸大学理学部物理学科卒業、1988年大阪大学大学院基礎工学研究科前期博士課程修了後、神戸大学教養部助手、大阪大学大学院基礎工学研究科助手、同極限科学研究センター助教授を経て、2003年より現職

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

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

[3] J. Yamaura *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 020102 (2017).

[4] L. Fu, Phys. Rev. Lett. **115**, 026401 (2015); V. Kozii and L. Fu, Phys. Rev. Lett. **115**, 207002 (2015).

[5] Y. Wang *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 134512 (2016)



非共型ジグザグ構造における 特異な量子相の解明と探索

小手川 恒

神戸大学 理学研究科 准教授

武田 圭生

室蘭工業大学
准教授

菅原 仁

神戸大学 理学研究科
教授

この度は公募班に採択して頂きましてありがとうございます。残り2年間、どうぞよろしくお願い致します。私の専門はNMR、圧力下実験になりますが、最近は試料作製の方にも力を入れ始めています。もともとは大阪大学の北岡研究室で学位を取ったのですが、当時はひたすら超伝導体のNMR測定という研究スタイルでした。新しい超伝導体が次々と見つかった時代でしたから、NMR測定に明け暮れて、忙しくも楽しく過ごしていたように思います。その後、助手で岡山大学の小林達生さんのところに移りました。ここで一旦NMRから離れて圧力下の物性探索などを初めたことが今の研究スタイルにつながっています。ここで4年半過ぎた後、2008年に神戸大学に移りました。神戸では藤さんと一緒にNMRをやりながら、最近は菅原さんを師匠と仰いで試料作製にも取り組んでいます。

さて、タイトルにある非共型ジグザグ構造とは図に示すような物質の構造です。図の物質は直方晶の非共型空間群 $Pnma$ に属していますから、非共型の対称性によってジグザグ構造が作られています。上の結晶構造はCrAs、RuAsで、MnP型構造として知られており、下の構造はURhGe、UCoGeで、TiNiSi型構造と呼ばれています。一見して2つの構造が非常

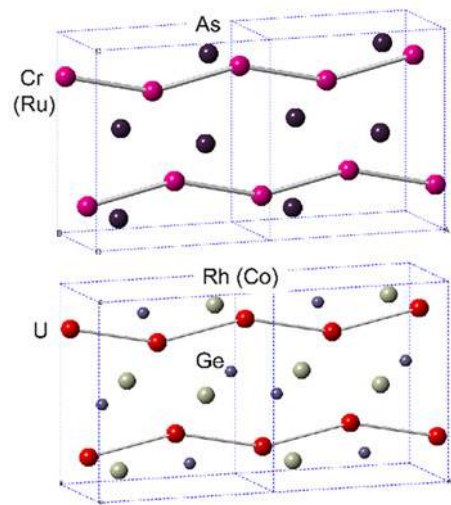


図1 : CrAs、RuAs、URhGe、UCoGeの結晶構造。非共型空間群 $Pnma$ に属し、ジグザグ構造を持つ。

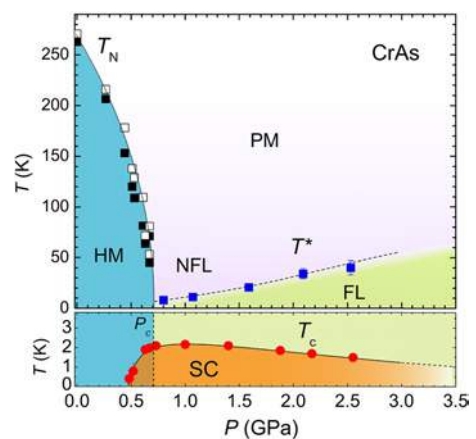


図2 : CrAsの温度-圧力相図。磁気揺らぎが活発となる領域で超伝導が現れる。

[1] W. Wu *et al.*, Nat. Commun. **5**, 5508 (2014).

[2] H. Kotegawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 093702 (2014); Phys. Rev. Lett. **114**, 117002 (2015).

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

[4] J.-G. Cheng *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 117001 (2015).

に似通っていることが分かります。原子位置は全てWyckoff letterが4cです。結晶としては反転対称性を保っていますが、原子位置では局所的な反転対称性が失われています。CrAsは図2に示すような磁性相近傍の圧力誘起超伝導体、[1,2] RuAsは金属絶縁体物質 (RuPも同様な相転移を示す。)、[3] MnPも圧力誘起超伝導体、[4] URhGe、UCoGeは強磁性超伝導体[5,6]です。それぞれが非常に興味深い物性を示しますが、ジグザグ構造という同じ舞台上様々な現象が起きることが物性物理の奥深さと言えるのかもしれません。本公募研究ではこのようなジグザグ構造に特化して、物性の解明、試料作製や圧力効果を通した新奇物性の開拓を目指します。

では、このような構造が電子状態にどのような影響を与えるのでしょうか？ イオン位置の局所反転対称性が失われているために、本新学術領域のキーワードである奇パリティ多極子や反対称スピン軌道結合の寄与が考えられます。これがどのような形で物性に影響を与えているかを検討していくことも本研究の課題です。もう一つは非共型空間群の場合、その対称性によって保たれたバンドの縮退が重要な役割を果たしていると考えられます。(強磁性状態では縮退が解けるので、常磁性状態に限られますが。) この点はRuAsの金属絶縁体転移が良い例となっています。[7,8] 図3はRuAsの金属相 $Pnma$ におけるバンド分散です。[8] ちょうどフラットバンドがフェルミエネルギーにかかっており、大きな状態密度を与えています。これが金属相を不安定にし、バンド・ヤーンテラー的に金属絶縁体転移を引き起こしていると考えられます。 $\Gamma \rightarrow Y \rightarrow S$ と見ていくと分かりやすいのですが、 $\Gamma \rightarrow Y$ で分裂していたバンドが $Y \rightarrow S$ で縮退していることが分かります。(スピン縮退を考えると4重縮退) この縮退は非共型の副格子に起因する縮退

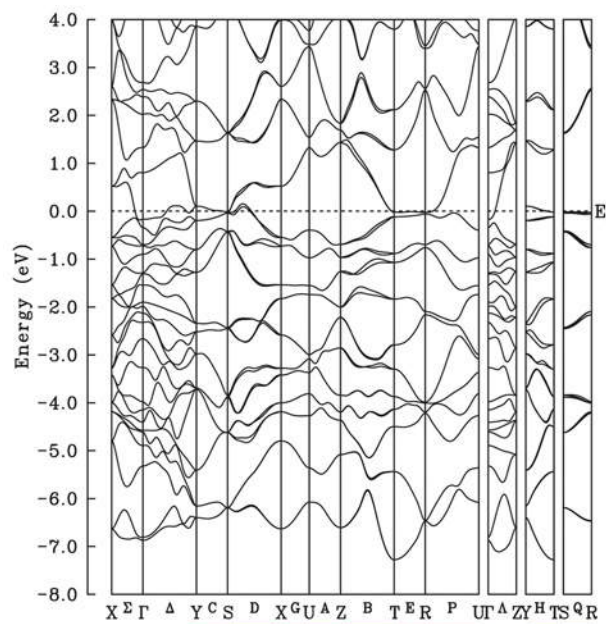


図3：RuAsの高温 ($Pnma$) におけるバンド分散

と言えます。面白いことに図の青線を引いた軸ではスピン-軌道結合でわずかに縮退が解けている様子が見られますが、赤線を引いた軸では完全に縮退が保たれています。結果的に、 $Pnma$ の空間群ではブリルアンゾーン境界でその対称性によって守られた(ほぼ)縮退したフェルミ面が実現することになります。RuAsではこの縮退したフラットバンドが大きな状態密度を与え、相転移を引き起こしているという訳です。また、CrAsでもY点周りにほぼ縮退したフェルミ面が計算から得られており、それが磁気ゆらぎや超伝導に寄与していることが予想されますし、様々な系においてこのブリルアンゾーン境界の縮退が重要な役割を演じている可能性があります。

本公募研究では3d電子系から5f電子系まで幅広く研究を展開して、上記の非共型ジグザグ構造の特徴を反映した、何かbreak through的な発見を目指したいと考えています。どうぞよろしくお願い致します。

[5] D. Aoki *et al.*, Nature **413**, 613 (2001).
 [6] N. T. Huy *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 067006 (2007).
 [7] H. Goto *et al.*, Physics Procedia **75**, 91 (2015).
 [8] H. Kotegawa *et al.*, Phys. Rev. Materials. **2**, 055001 (2018).



Magnetotransport in strongly correlated non-centrosymmetric f-electron materials

Robert Peters

京都大学 講師

Materials which combine strong correlations with strong spin-orbit interaction (SOI) are a recent subject of intensive studies [1]. Although this topic has fascinating applications in quantum computing and spintronics, it is still less explored, and certainly not well understood at all. On the one hand, strongly correlated materials exhibit some of the most intriguing phenomena in condensed matter physics, such as magnetism and unconventional superconductivity. On the other hand, SOI is a relativistic effect, which couples the orbital angular momentum and the electron spin, and is usually considered a small perturbation in solids. However, in heavy elements, SOI can become relevant and has striking qualitative effects.

Furthermore, in materials without inversion symmetry, the coupling between spin and momentum of the electrons becomes odd in the electron's momentum, and the Rashba interaction arises. Due to the Rashba interaction, unique and remarkable transport phenomena can be observed, such as the magneto-electric effect, which makes it possible to manipulate the spin-polarization by electric currents [2].

Thus, non-centrosymmetric f-electron materials, such as CeRhSi_3 , CeIrSi_3 , CeCoGe_3 , CeIrGe_3 , and

CePt_3Si , which lack inversion symmetry and are strongly correlated due to partially filled f-electron bands, are materials which make it possible to study the combination of the Rashba interaction and strong correlations. These materials are at the focus of this research project which tries to explore novel phenomena in non-centrosymmetric strongly correlated f-electron materials.

A recent example is the impact of correlations on the magneto-electric effect. It became apparent that the magneto-electric effect is small in weakly-correlated semiconductors, but might be enhanced due to strong correlations [3, 4].

In numerical calculations based on dynamical mean field theory, we have demonstrated that correlation effects can indeed strongly enhance the magneto-electric effect. Particularly, we have observed a strong enhancement of the Edelstein effect in f-electron systems close to the coherence temperature, where the f electrons change their character from localized to itinerant (Fig. 1). The reason for the enhancement is the absence of cancellation effects at this temperature. While at very low temperatures the Fermi surface exhibits spin polarizations in different directions (Fig. 2), the conduction electrons are polarized only in a single

[1] R. Schaffer et al., Rep. Prog. Phys. **79** 094504 (2016)

[2] A. Manchon et al., Nature Materials **14**, 871 (2015)

[3] S. Fujimoto, Journal of the Physical Society of Japan **76**, 034712 (2007)

[4] R. Peters and Y. Yanase, Phys. Rev. B **97**, 115128 (2018)

direction above the coherence temperature. The conduction electrons are thereby polarized by spin-scattering between localized f electrons and conduction electrons involving the Rashba spin-orbit interaction. Due to the absence of electrons with opposite spin polarization, the magneto-electric effect becomes large [4]. However, the enhancement of the magneto-electric effect due to the Kondo effect is not the only interesting effect which occurs in these materials. Due to the Rashba interaction, the spin scattering between conduction electrons and f-electrons becomes anisotropic. It is known that anisotropic exchange leads to a two-stage Kondo screening in magnetic impurities; a part of the magnetic moment remains after the first screening and might be observable down to very low temperatures, where the second stage of the Kondo effect occurs. Up to now, it is not well understood whether and how such a two-stage Kondo screening manifests itself in non-centrosymmetric f-electron systems, how it can be experimentally observed for example in transport measurements, and how it affects magnetic ordering. These are current

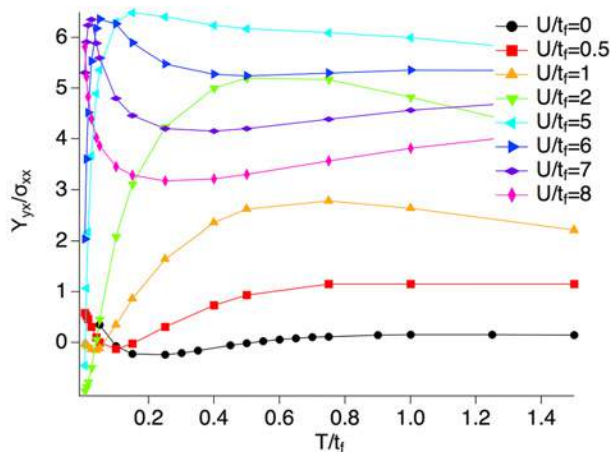


Figure 1: Enhancement of the magneto-electric effect, Y_{yx}/σ_{xx} (Induced spin polarization in y-direction by current in x-direction), due to electron correlations, U .

questions of my research.

Another interesting aspect of non-centrosymmetric f-electron systems is the magnetically ordered phase. The presence of the Rashba interaction in magnetic materials leads to the emergence of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction, an interaction which leads to a twist between the ordered magnetic moments. This can result in chiral magnetic states and the formation of magnetic skyrmion lattices.

Furthermore, the competition between magnetic order and the Kondo effect, which can be often found in f-electron materials, leads to a quantum critical point and to novel phenomena such as unconventional superconductivity close to the quantum critical point.

Very interesting in this context are compounds like CeRhSi₃. Exchanging Rh and Si by other elements, the interplay between the Kondo effect and magnetic order can be tuned. It is thus a very exciting topic to theoretically analyze the competition of the Kondo effect and magnetic order in non-centrosymmetric f-electron materials, where the Rashba interaction creates novel phenomena.

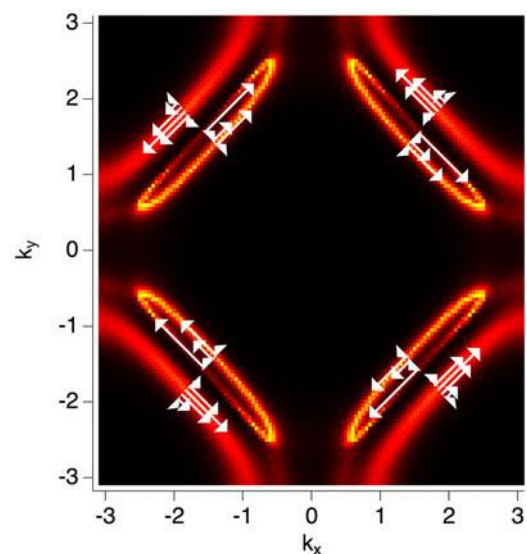


Figure 2: Spin-polarized Fermi surface at very low temperature. The arrows correspond to the direction of the spin polarization of the Fermi surface.



熱流により誘起された反強磁性マグノン スピン流における奇パリティ多極子効果の開拓

塩見 雄毅

東京大学工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター / 物理工学専攻 特任講師

東京大学で特任講師(PI)をしております塩見雄毅と申します。この度は公募研究に採択いただきありがとうございます。私は現在スピントロニクス分野で、スピン流を用いた実験研究を行っています。

私の今回の研究テーマは、反強磁性絶縁体のマグノン(スピン波)が運ぶスピン流に関して新奇な奇パリティ多極子物性の開拓を目指そうというものです。電流を用いて開拓されてきた奇パリティ多極子に関連した物理現象を、電流からスピン流へ拡張したいと考えています。スピン流は金属だけでなく絶縁体でも流れるので、奇パリティ多極子の物理を絶縁体へ展開することができます。

私は東京大学で博士の学位を得た後、東北大学の金研で助教として5.5年ほど働き、昨年(2017年)の11月に今のポストにつきました。そういう意味では、先日の仙台で行われたキックオフミーティングは、住み慣れた懐かしい場所で行われた会議となりました。金研に在職中は大洗の施設に伺う機会はありませんでしたが、金研が重い電子系の研究拠点として非常に重要であることを、恥ずかしながら金研を去ってから理解することとなりました。

学生時代は、磁性体の異常ホール効果を中心とした輸送現象の研究を主として行い、物質合成なども一生懸命行っていました。その後卒業してからは、どちらかというと応用よりの研究に興味をもったことから、スピントロニクスの研究分野に飛び込みました。当時は自分の興味で動いているだけでしたが、結果

的に物性物理とスピントロニクスのいわば境界領域において活動できたことで幾つか重要な仕事を行うことができました。現在は研究室を構える立場となり、今までやったことがない研究にも挑戦したいと思っています。そういう意味で、今回のJ-Physicsへの参画は新しい研究分野・文化に触れることで、新たな境界領域の創出につながればよいと思っています。全くの門外漢ですので応募時には良い結果を余り期待はしていませんでしたが、無事採択されてとてもうれしく思います。

一方で、実際にキックオフミーティングに参加し、皆様の研究内容を耳にすると、電子が流れない絶縁体系を扱う人は少ないのだなと多少不安を感じました。考えてみれば重い電子系という言葉のみでも、電気が流れるから電子が重いか軽いか分類できるわけですから当然です。希土類も入っていない物質を扱い、しかも物質開発や特定の物質の物性を追求する研究とは少し違う価値観のなかで研究を行っていくので不安はありますが、せっかくの機会ですので色々な方から勉強させて頂こうと思っています。

奇パリティ多極子の文脈で精力的に研究が行われている現象の一つが、磁性金属における電流誘起磁化だと思います。これは磁性絶縁体で研究されてきた電磁気効果(いわゆるマルチフェロイクス)を金属に拡張し、磁気構造によって空間の対称性を破ることで金属の電気磁気効果を開拓しようという試みだと理解しています。よく知られたとおり、これまで

- [1] H. Saito *et al.* J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033702 (2018)
 [2] Y. Shiomi *et al.* Phys. Rev. Lett. **113**, 196601 (2014)
 [3] Y. Shiomi *et al.* Phys. Rev. B **96**, 180414(R) (2017) (Editors' suggestion)

UNi₄Bなどで世界に先駆けて実験報告がなされています[1]。

一方で、スピントロニクス分野でも、低い対称性に起因した、似たような電流-スピン変換現象が知られています。エデルシュタイン効果と呼ばれるものです。有名な例として、トポロジカル絶縁体の表面状態や接合界面で現れるラッシュバースピン軌道相互作用の強い二次元電子系で、スピン-軌道ロッキングにより電気磁気効果が発現します[2]。電流誘起磁化とエデルシュタイン効果の名前の違いは、実空間のスピン構造に注目するか運動量空間のスピン構造に注目するかの違いにあるようです。

電流誘起磁化もエデルシュタイン効果も電流を用いて観測されてきました。しかし、熱流を用いても電子を駆動することができますから、同様の現象が熱伝導でも期待されます。これは電子が流れる金属系では物理的に自明であるように思われます。一方、電子が流れない絶縁体ではどうでしょうか。電流誘起磁化の状況と同じように、磁気転移に伴い磁気構造で結晶対称性を破る絶縁体物質は考えられます(ジグザグ反強磁性体[3]、ハニカム反強磁性体[4]など)。しかし絶縁体であるので、熱流を運ぶのはフォノンかマグノンです。フォノンは磁化とは直接関係しないので、重要なのはマグノンでしょう。マグノンによる「熱流誘起磁化」が観測できるかというのが本研究の一つの課題です。しかしながら金属系での電流誘起磁化でも大変小さな効果ですから、それを絶

縁体で熱流を使って観測するのはかなり難しい挑戦になると思います。

本研究課題では他にも反強磁性マグノン系の奇パリティ多極子効果が観測できないか検討しています。マグノン(スピン)流の非相反応答が、その一つです。非相反応答とはどちらか一方にキャリアが流れやすい性質のことですが、pn接合ダイオードを思い浮かべると状況を理解しやすいでしょう。非相反応答も対称性の低い結晶において期待される効果であり、奇パリティ多極子と関係しています。本研究課題では、電子系で研究されてきた非相反応答をマグノン系に拡張することも目標としています。既に、上記のコンセプトを理論的に示した論文[5]を発表しています。論文の中で行った簡単な見積もりによるとマグノン流の非相反応答は大変小さく、こちらも実験的観測は大変難しい挑戦となりそうです。なかなか私一人の力では達成は難しい部分もあるかもしれませんが、J-Physicsの皆様のご協力・アドバイスも頂戴しながら、うまく研究活動していければ良いと思っています。これから2年間どうぞよろしくお願いいたします。

[4] Y. Shiomi *et al.* Phys. Rev. B **96**, 134425 (2017)

[5] R. Takashima, Y. Shiomi, and Y. Motome, Phys. Rev. B **98**, 020401(R) (2018)



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

速水 賢

北海道大学 理学研究院 助教

自己紹介

北海道大学理学研究院の速水賢と申します。今年度から新学術領域研究「J-Physics：多極子伝導系の物理」の公募研究でお世話になります。二年間、どうぞよろしくお願いいたします。出身地は兵庫県宝塚市です。平成22年に大阪大学基礎工学部を卒業し、平成26年に東京大学大学院工学系研究科の求研究室で博士号を取得しました。その後、ロスアラモス国立研究所のポスドクを経て、平成28年の2月から北海道大学理学研究院統計物理学研究室にて助教を務めております。研究テーマは、多極子、遍歴磁性体、マルチフェロイクス、フラストレート磁性体などにおいてしばしば現れる、変わった(トロイダルやスキルミオンなどの)磁気構造やそれに伴う交差相関現象を理論的に開拓し、制御することです。一方で、学部生の時に一生懸命勉強した超伝導の研究には、まだ携わったことがなく、何かしてみたいなと考える今日この頃です。

趣味はプロ野球観戦で、特に広島東洋カープの試合はほぼ毎日のようにチェックしています。広島にゆかりがあるわけではなく、何故かは自分でもよくわかりませんが、物心ついたときにはすでにファンでしたので、25年以上の付き合いになります(ちなみに家族は巨人ファンです)。こちらも熱い議論? をして下さる方がいらっしゃいましたらぜひよろしくお願いいたします。

研究紹介

本新学術領域研究の主題である“多極子”は、固体中での電子のミクロな自由度を表現し、多彩な物性現象を理解する上での基礎的枠組みを与える、有用な概念です。特に物性物理学においては、1原子上の異方的な電荷分布や電流分布を表すのに、電気多極子や磁気多極子が用いられており、電子が強く局在化しているf電子系を中心にして研究が進められてきました。一方で近年、こうした電気多極子や磁気多極子に加えて、電気トロイダル多極子や磁気トロイダル多極子といった非従来型多極子の定式化も明らかになりました(図1)[1]。本新学術領域の研究でもよく話題に上がるクラスター多極子、ハイブリッド多極子、遍歴多極子といったものは、これら4つの多極子が複数原子、混成軌道、波数空間において活性化しているものとして系統的に分類することができます[2]。こうした多極子自由度をミクロな立場から系統的に基礎づけることにより、電気・磁気・トロイダル自由度間に生じる特異なマルチフェロイクス(交差相関)現象を開拓することが可能になると期待しており、理論側から面白い提案ができればいいと考えています。

本研究課題では、その中でも電気トロイダル多極子や磁気トロイダル多極子といった非従来型多極子に着目し、それらが促す電気(電流)磁気効果・電気歪み効果・磁気歪み効果・熱誘起磁化効果といった複数自由度間にまたがる交差相関現象を理論的

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

[2] S. Hayami, M. Yatsushiro, Y. Yanagi, and H. Kusunose, preprint (arXiv: 1806.01964), to be published in Phys. Rev. B

に明らかにすることを目指します。電気トロイダル多極子や磁気トロイダル多極子と聞くと、かなりマニアックな状況が必要という印象を持つかもしれませんが、実際にはかなりの多くの状況でこうした自由度は活性化します。例えば、電気トロイダル単極子は、カイラルな点群($O, T, D_4, C_4, D_2, C_2, D_6, C_6, D_3, C_3, C_i$)で活性化しますし、電気トロイダル四極子は、一部のジャイロトロピック点群($D_4, D_{2d}, C_4, S_4, D_2, C_{2v}, C_2, C_s, D_6, C_6, D_3, C_3, C_i$)の元で活性化します。また、こういった格子構造において磁性が発現すると、多くの場合において磁気トロイダル多極子が活性となります。一方で、このようなトロイダル多極子が秩序化すると、多彩な交差相関現象が期待されます。電気トロイダル四極子の元での電流誘起磁化や磁気トロイダル四極子の元でのスピン伝導などがその一例です。こうしたトロイダル自由度を有する微視的なモデルに対する計算を行うことにより、トロイダル多極子秩序の発現に重要な要素は何かということを明らかにしていく予定です。

こうした理論的な解析を通して、トロイダル多極子秩序が実現しうる候補物質の探索や、それらが示す新奇現象を検出するための実験的検証法を提案したいと考えています。最後になりましたが、様々な方々と議論や共同研究ができれば幸いです。ぜひお声をお掛けください。

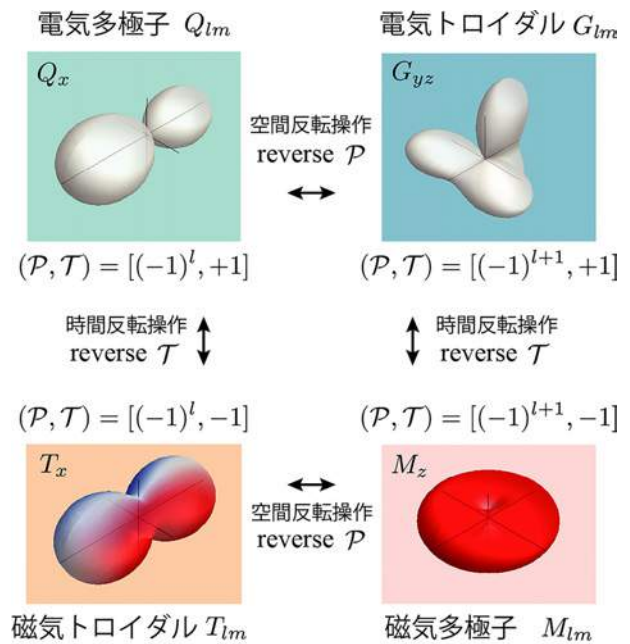
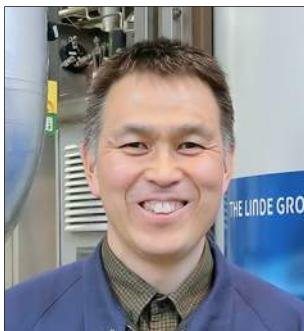


図1 4つの多極子(電気、磁気、電気トロイダル、磁気トロイダル)の関係



キラル化合物 YbNi_3Ga_9 の圧力誘起による量子臨界現象と磁気秩序相

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

大原 繁男

名古屋工業大学 大学院工学研究科
教授

自己紹介

この度は新学術領域研究「J-Physics」の公募班に採択していただき、ありがとうございます。私は福岡県北九州市出身で、大学はその当時広島市内にあった広島大学理学部物性学科です。卒業研究では、後の研究で活かされることになる交流法比熱測定を用いた磁場中比熱測定に取り組みました。ちなみに、卒論で配属された研究室の1学年先輩に大原繁男さんがいらっしゃいました。30年余りの時を経て、また、大原先輩と一緒に共同研究をさせて頂けることになるとは、何か不思議な縁のようなものを感じます。その後、九州大学大学院総合理工学研究科修士課程に進み、そこでCe系金属間化合物の高圧下の物性研究を修士論文のテーマにしたことから、高圧下物性研究の虜となりました。

修士課程修了後に、広島大学理学部物性学科磁性体研究室（藤原浩教授）の助手に幸いにも採用されました。その時、どうせなら誰もやったことがないことに挑戦しようと思立ち、その当時（1990年頃）ほとんど測定例のなかった「低温高圧下比熱測定」に取り組むことにしました。しかし、前例がない測定ゆえ、圧力セルから測定システムのすべてを自作しなければならず、試行錯誤の繰り返しで、助手着任から3年間は全く成果を出せず、恥ずかしながら1本の論文も書けませんでした。今の大学では、そのような状況は許されず、下手をすると、解雇で路頭に迷う羽目になるところですが、そのような状況を許し

ていただいた当時の研究室や学科の先生方に感謝の言葉しかありません。

そうしているうちに、広島大学理学部の東広島市への移転、藤原先生のご退官があり、1995年に高島敏郎教授が磁性体研究室に着任され、幸いにも、一緒に研究させていただけることとなりました。2006年から自然科学研究支援開発センターに異動になり、物性研究で必要不可欠な液体ヘリウムと液体窒素の製造と供給をしています。このご時世で、今の若い先生方や博士課程の学生さんが、昔の私のような結果がすぐに出ない研究を何年も続けるのはほとんど不可能ですが、それでも、チャレンジングな研究テーマにも出来るだけ取り組める環境を作れるよう、寒剤や低温技術を通して支援したいと考えております。

研究紹介

私は、これまで、希土類元素を含む化合物の圧力誘起量子臨界現象を、主に電気抵抗・磁化・比熱といったマクロ測定によって研究してきました。その中でも特に、圧力下比熱測定には独自の方法を開発し、現在、12 GPaまでの高圧力、0.3 Kまでの極低温、9 Tまでの強磁場下で、比熱の絶対値測定が可能です [1]。この方法では、低温で比較的比熱の大きな重い電子系化合物や、磁気秩序を示す物質だけでなく、超伝導転移の比熱を精度よく測定したり [2]、カゴ状物質のラットリングのような特異な格子振動に起因した比熱の圧力効果も測定可能です。

そのような測定方法を、最近、注目されているキ

ラル化合物YbNi₃Ga₉に適用して、研究を進めてきました。このYbNi₃Ga₉は同型構造のYbNi₃Al₉とともに、近年、大原先生が純良単結晶を育成され、非常に興味深い物性を示すことが明らかとなりました。これらのYbNi₃X₉ (X=Al, Ga)の系の特徴を下記に挙げます。

(1) 量子臨界現象の研究の舞台

YbNi₃Ga₉は、500 K程度の近藤温度をもつ価数揺動系です。したがって、YbNi₃Ga₉を加圧すると量子臨界点を経て磁気秩序が誘起されると予想されました。実際、 $P_c=9$ GPa以上の圧力を印加すると磁気秩序が誘起されます [3]。また、 P_c 以下の常磁性領域で、交流磁化率の磁場依存性に現れたメタ磁性的な異常は、Ybの臨界価数揺らぎに起因すると議論されています [4]。

(2) キラル構造に起因した特異な磁気秩序

YbNi₃X₉ (X=Al, Ga)の結晶構造は、鏡映面と反転心をもたないキラルな構造です。この構造に起因して、YbNi₃Al₉はキラルらせん磁気構造を取り[5]、さらに、Niの一部をCuで置換すると、磁場中でキラルらせんが周期的に解けたキラルソリトン格子 (CSL) と呼ばれる特異な磁気秩序が発現します [6]。CSLはこれまで3d遷移金属を含む絶縁体で確認されていましたが [7]、希土類元素を含む金属間化合物では初めてで、その起源が注目され盛んに研究されています。

最近、我々は、YbNi₃Ga₉の高圧下比熱測定から、 P_c 付近で電子比熱係数が1 J/K²molに達する重い電子状態が発現すること、 P_c 以上で、磁場を三方晶のc軸に垂直に印加したときのみ、新たな磁場誘起磁気秩序相が出現することを見出しました [8]。それらを踏まえ本研究では下記の課題に取り組みます。

(1) YbNi₃Ga₉の温度 - 圧力 - 磁場相図上で、量子臨界終点を探索し、そこでの比熱、電気抵抗、磁化にYbの臨界価数揺らぎに起因した臨界現象が現れるかどうか調べます。また、キラルらせん磁気揺らぎに起因した新しい臨界現象が出現するかを明らかにします。

(2) P_c 以上での磁気秩序状態で、キラルらせん構造やCSLが発現しているかどうかを、高圧下における磁気抵抗効果とホール効果の測定から明らかにします。

これらの研究を通して、空間反転対称性をもたない構造をもつYb系金属間化合物の量子臨界現象やキラルソリトン格子発現のメカニズムについて有益な情報を得ることで、C01班の研究に貢献したいと考えています。また、低温高圧下比熱測定の共同研究や情報提供などを通じて、領域全体の研究に少しでもお役に立てればと思いますので、お気軽にお声をおかけください。2年間どうかよろしく願いいたします。

-
- [1] K. Umeo, Rev. Sci. Instrum, **87** (2016) 063901.
 - [2] K. Umeo *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **78** (2009) 123602.
 - [3] K. Matsubayashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114** (2015) 086401.
 - [4] S. Watanabe, and K. Miyake, J. Phys. Cond. Mat. **24** (2012) 294208.
 - [5] S. Ohara *et al.*, JPS Conf. Proc. **3** (2014) 017016.
 - [6] T. Matsumura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **86** (2017) 124702.
 - [7] Y. Togawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 112001.
 - [8] K. Umeo *et al.*, Phys. Rev. B **98** (2018) 024420.



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

本山 岳

島根大学 自然科学研究科 准教授

藤原 賢二

島根大学 自然科学研究科
教授

自己紹介

出身は愛知県安城市、上り新幹線で名古屋駅を出発して約10分突然田園風景の広がるところが私の育ったところとなります。農耕牛の逃亡事件が起こるような農村で、友人たちと壊れた古い農機具を分解して遊んでいました。その頃の経験が少なからず今の研究に役立っているのではと思います。その後、名古屋大学理学研究科のM研（紺谷研、佐藤研）で学び、兵庫県立大学物質科学研究科（旧姫路工業大学）の電子物性学講座（小田研、住山研）で10年研究した後、現在の島根大学自然科学研究科（この4月に総合理工学研究科から研究科名称が変更）に異動しました。この間に身に付けてきた試料育成技術と超低温技術が自分自身の最大の武器だと考えています。松江に来て既に5年経ってしまいましたが、ようやく新しい化合物の発見にこぎつけ、またGM冷凍機を改良した希釈冷凍機も0.2 Kに到達するようになりました。松江は日本酒が美味しいという地の利にも恵まれており、時々研究会などが開催されますと、面白い研究をされている様々な方にご足労いただだけ最新のお話を伺うことが出来ます。こういった充実した研究環境で島根大物性グループの方々と一緒に研究しております。趣味はバスケットボールとスキーでした、過去形になっていたのですが息子の成長のおかげで趣味スキーが復活し、ブーツや板の新調に成功しつつあります。

松江で見つけた新しい化合物を縁に「J-Physics:

多極子伝導系の物理」の領域でいろいろな方と研究できることを楽しみにしております。これからどうぞよろしくお願いいたします。

研究紹介

学生の時に聞いた「試料合成はいくつかの知られている元素から役に立つ物質を創生するという点で錬金術に似ていて、元素の組み合わせやその組成比によって可能性は無限に…」や、また「結晶の周期性や対称性によって様々な興味深い量子現象が生み出されるが、その結晶を自由に創造し…」といった話を鵜呑みに試料合成に取り組んでいます。発見したその物質が超伝導など興味深い量子現象のステージとなれば、そしてそうならなくとも新しい物質の発見は勲章だと思いがり、時間を見つけては試料合成を続けています。物質探索のいろいろな挑戦をする度に先輩方の努力が広範囲にわたり行われていたことを思い知らされるばかりで、Ce化合物にこだわった物質探索は現実には厳しいことを知りました。そんな中で偶然にでも見つかった Ce_3TiBi_5 や U_3TiBi_9 は、まだまだ物質探索において宝が残っていることを示す希望だと思っています。

本研究の中心課題となっている Ce_3TiBi_5 はCeサイトが1つしかなく、TiやBiを含めても4つのサイトしかないシンプルな構造をしています（図1参照）。Biの1つのサイトはTiを取り囲んで八面体を作り、面共有でジグザグに八面体鎖構造を作っています[1]。

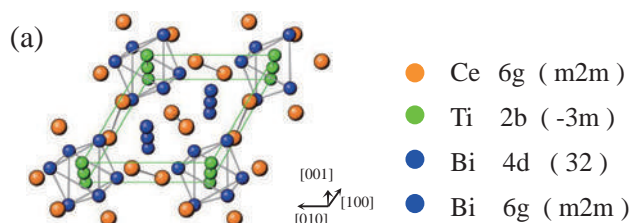
そして、そのBiと同じ対称性のサイトでその少し外側にCeが位置し、c軸に伸びる柱状の基本構造を形成します。最外周に位置しているCeの最近接Ceは同一の柱状構造内にはなく、隣接する構造の中にあります。そしてCeはジグザグ鎖構造を作ります。また磁気構造は不明ですが、磁化率・比熱測定等から5.0 K以下に反強磁性秩序があり磁気モーメントはジグザグ鎖とおよそ平行方向に向いていると推測しています。U₃TiBi₉も同様な柱状の基本構造を持っています[2]。しかし柱状構造の間に入るBiの増加によって柱状構造間が広がり、Uの最近接UがCe₃TiBi₅とは異なって同一構造内のUとなります。このためUの正三角形が交互に積層する構造となっています(図1参照)。また磁気モーメントが面内に向いていると推測していて、キラリティーが期待できる背景が整っています。

同型の315系化合物としていくつかのSb化合物が報告されていて[3, 4]、実際にTiをZrに置換した

Ce₃ZrBi₅やCeをLa, Pr, Nd, Smに置換した化合物の作成に成功しています。単純な構造を持ち多くの同型化合物の存在するこの系において、電気磁気効果の探索を行うこと、磁気構造を決定し詳細な議論をする基礎を整理していくこと、また電気磁気交差相関を利用したホール素子による磁化測定などの測定技術を確立していくことを本研究課題で目指していきます。

これまでのCe₃TiBi₅の研究は、東大物性研の郷地先生、上床先生、島根大の藤原先生、西郡先生、武藤先生との共同、U₃TiBi₉の研究は、原研の芳賀先生、兵庫県立大の山口先生、川崎先生(現原研)、住山先生との共同で行われてきたものです。研究計画に挙げた磁気構造の決定は藤原先生および琉球大の阿曾先生、ホール素子による磁化測定は山口先生と協力して行っていく予定です。また、領域の先生方と広く協力して研究を進めて行くことを望んでいますので、よろしくお願いいたします。

Ce₃TiBi₅ : P6₃/mcm (no. 193) Ga₄Ti₅-type



U₃TiBi₉ : P6₃/m (no. 176)

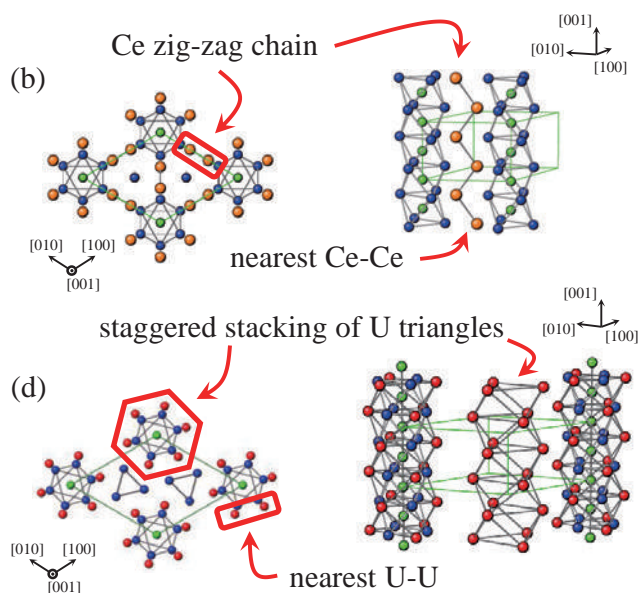
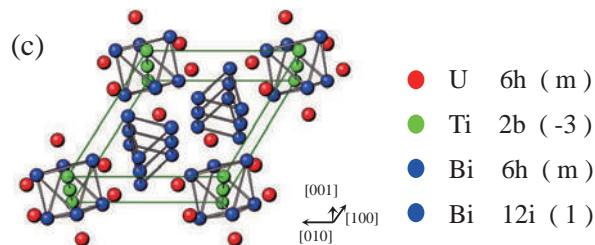


図1 (a), (c) Ce₃TiBi₅およびU₃TiBi₉の結晶構造および原子サイト。(b), (d) 上面図およびCeジグザグ鎖構造とU正三角形が交互に積層した柱状構造を抜き出すために元素を選択して描画した結晶構造。

[1] G. Motoyama, *et al.*, Physica B. **536** (2018) 142-144.
 [2] G. Motoyama, *et al.*, Progress in Nuclear Science and Technology, in press.
 [3] S. H. Devon Moore *et al.*, Chem. Mater., **14** (2002) 4867-4873.
 [4] A. V. Tkachuk *et al.*, J. Alloy and Comp. **418**. (2006) 39-44.



電流と格子回転・歪みによる複合共役場を用いた拡張多極子検出の試み

柳澤 達也

北海道大学大学院理学研究院 准教授

大串 研也

東北大学大学院理学研究科
教授

【奇パリティ多極子をいかにして観測するか?】

絶縁相におけるマルチフェロイクスの物理を金属相に応用し、更に発展させた新しい理論が次々と提案されているが [1, 2]、今のところ金属相に関する研究では理論研究が先行している感があり、拡張多極子を実験的に観測したという報告はまだ数えるほどしかない。[3, 4]

本研究の眼目は固体物性研究の分野で実績のある超音波の手法を発展させ、磁場や電流（電場）や一軸圧力を印加しながら精密音速測定を行い、高次の奇パリティ多極子を弾性応答として観測する新たな手法を開発することである。超音波を用いる利点の一つに、絶縁体・金属にかかわらずバルク単結晶の試料中を伝搬し、電気多極子を敏感かつ分光的に捉えることができるという特徴がある。また、超音波が結晶中に誘起する歪み場は、異なる時空対称性を持つ磁場や電流（電場）の外場とも相性が良い。そこで私は「異なる2つ以上の外場を組み合わせた『複合場』を超音波と組み合わせることにより、通常の磁化測定等では検出不可能な対称性の多極子応答を捉えることができるのではないか?」という着想を元に本研究を始めた。具体例を挙げると、正方晶系点群 D_{4h} における B_{1u} 対称性のカイラリティの自由度や、 A_{2g} 対称性の回転モードは、磁場と共役でないため磁気双極子を観る通常の磁気測定には応答しない。一方、横波超音波は結晶内に B_{1g} 対称性を持つ「歪み場(階数2)」と A_{2g} 対称性を持つ「格子回転

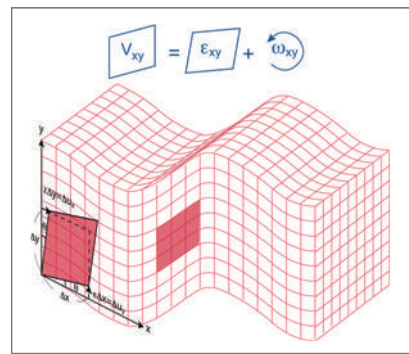


図1 横波超音波が結晶中に誘起する歪み場と回転場

場(階数1)」を同時に誘起することができるため(図1)、うまく時空対称性を結びつける付加的外場を用意することで、それらの「隠れた多極子」を浮き彫りにできる可能性がある。

【複合場で時空パリティを制御する】

本研究ではそれらを検証する対象物質として $BaMn_2As_2$ およびそのKドープ系におけるMnサイトのG型反強磁性秩序相に着目する。この物質のMnサイトは反転対称を持たないため、高次の奇パリティ多極子の観点からこの磁気秩序を再解釈すると、 B_{1u} 対称性の「ハイブリッド型磁気十六極子秩序」として一般化できる。その秩序状態に c 軸方向の電流を印加すると、 ab 面内の自発歪み ϵ_{xy} が誘起される「磁氣的圧電効果」が理論提案されている[5]。反対称スピン-軌道相互作用に起因する、このような交差相関をより一般化し、活性となる多極子を群論に基

表1 入力する外場（複合場）と出力される（観測に用いる）物理量、それらに回答する多極子とのトライアド。それぞれの時間(T)・空間(P)反転対称に関するパリティ(偶:+, 奇:-)と階数(rank)。

INPUT			OUTPUT			RESPONSE (OPERATOR)			Responsible Tensor		
External Field (Composite Fields)	T	P	rank	Characteristic Tensor	T	P	rank	T		P	rank
H Mag. Field or Mag. Order	+	+	1	M Magnetization	+	+	1	0	+	0	Q ₀ : E-monopole
				ε Strain (ω Rotation)	+	+	2 (1)	1	+	1	G ₀ : ET-dipole
σ Stress	+	+	2	M	+	+	1	2	+	2	Q ₂ : E-quadrupole
				ε (ω)	+	+	2 (1)	3	+	3	T ₂ : MT-quadrupole
H + σ	+	0	-3	M	+	+	1	0	+	0	M ₂ : M-dipole
				ε	+	+	2	1	+	1	T ₂ : MT-quadrupole
J Current	+	+	1	M	+	+	1	2	+	2	M ₀ : M-monopole
				ε (ω)	+	+	2 (1)	3	+	3	G ₂ : ET-quadrupole
E Electric Field or Electric Order	+	+	1	M	+	+	1	0	+	0	Q ₄ : E-16 pole
				ε (ω)	+	+	2 (1)	1	+	1	Q ₄ : E-16 pole
H + J	+	+	0 - 2	M	+	+	1	2	+	2	M ₄ : M-32 pole
				ε (ω)	+	+	2 (1)	3	+	3	G ₄ : ET-16 pole
H + E	+	+	0 - 2	M	+	+	1	0	+	0	G ₄ : ET-monopole
				ε (ω)	+	+	2 (1)	1	+	1	Q ₄ : E-dipole

づいて分類した論文が報告されている。[1, 2] それらの論文を参考にし、入力場および出力場、それらと線形応答の範疇で応答する多極子との三者関係を表1に纏めた。ここでは、実験に用いる外場として、「磁場H」、「歪み場（応力場）σ」、「電流J」、「電場E」、およびそれらの複合場を想定し、物理量としては類推し易い「磁化」と「歪み・格子回転場（超音波）」のみに限定し、時間反転対称性(T)と空間反転

対称性(P)のパリティによる選択則から許される応答テンソル（多極子）を比較している。実際には更に点群対称性に基づく選択則が加わり、測定にかかるかどうかが決まる。誌面が限られている為、本稿では更に表1の右端に示した注釈部分のみに着目し、それぞれの簡単な解説を以下に箇条書きする。

*1 磁化測定(階数1)では応答する多極子の階数が足りない場合でも、入力場・出力場として歪み(階数2)を駆使すれば、高次多極子の応答を観測できるかもしれない。

*2 BaMn₂As₂の磁気十六極子秩序による磁気圧電(ピエゾ)効果[5]は、この行に対応。

*3 UNi₄Bの強トロイダル秩序に伴う電流誘起磁化の観測[4]は、この行に対応。(電場と電流を等価に扱っている。)

*4 磁場と電流の複合場は階数0~2に応じて、単極子型(H・J)、双極子型(H×J)、四極子型(HiJj+JiHi)がある。これらは電場と同じ時空パリティを持つため、原理的に金属相では歪みを通して、電気トロイダルを観測することができる。

【まとめと自己紹介】

この度、表題の公募研究を採択いただきましたので二年間宜しくおねがいします。私は雪国越後の上越市に生まれ、地元の新潟大学で超音波計測技術と群論を教わり、修了後は陽光降り注ぐ米国西海岸で試料合成とクラフトビール醸造の修行を積んだ後、試される北の大地に移住して約十年になります。私の座右の銘はヘイケ・カマリンオンネス先生の言葉[6]「計測を通じて認識する(“door meten tot weten”)」です。実験屋として候補物質を片端から測定し、上記の理論を検証したい、と思っております。本稿にて超音波計測に多少なりとも興味を持たれた方がいらっしやいましたら、ぜひお声がけください。

[1] S. Hayami *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 165110 (2018).
 [2] H. Watanabe and Y. Yanase, arXiv:1805.10828.
 [3] T. Furukawa *et al.*, Nat. Commun. **8**, 954 (2017).

[4] H. Saito *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033702 (2018).
 [5] H. Watanabe and Y. Yanase, Phys. Rev. B **96**, 064432 (2017).
 [6] 'The art of measurement', Nature Physics **12**, 1 (2016).



核磁気共鳴によるスピン軌道結合系および局在多極子系における新奇な秩序の探索

瀧川 仁

東京大学物性研究所 教授

廣井 善二

東京大学物性研究所

武田 晃

東京大学物性研究所

この度はJ-Physicsの公募研究に採択していただき有難うございます。本領域のねらいは、これまで主として局在 f 電子系を対象としてきた多極子の研究を、遍歴 5 f 電子系やスピン軌道結合の強い 5 d 伝導系に拡張して、より多彩な現象を探索するとともに、複数サイトにおよぶクラスター多極子のような新概念を通じて物理を深めることだと理解しています。また研究会などの機会を通じて、そのような活動がこれまで着実に進展しているという印象を持ちました。そこで、私もこれからの2年間、スピン軌道結合の強い 5 d 遷移金属酸化物と、比較的局在性の強い f 電子化合物の両面から研究を進めたいと考えています。

前者については、まずパイロクロア酸化物 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ を対象とします。この物質は2001年にパイロクロア酸化物では初めての超伝導体であることが報告されましたが、200K及び110Kにおいて2段の構造相転移を示し、低温の二つの相ではいずれも反転対称性が消失していることが知られています [1]。その後、構造相転移と超伝導の関連について実験・理論の両面から進展がありました。まず、合成法の改良によって各段に質が向上した結晶を用いた実験によって、高圧下で構造相転移が抑制されるととも

に、反転対称性が回復する臨界圧力近傍で超伝導転移温度が増大することが発見されました [2]。また理論的には、スピン軌道結合の強い金属においては、電子系の相互作用によって反転対称性が自発的に破れ、スピン分裂したフェルミ面やパリティの揺らぎによる超伝導が出現する可能性が指摘されました [3]。

このような最近の進展を背景に、本研究では高圧下を含む環境下でReおよびCdサイトのNMR実験を行い、電子系の秩序パラメータやその揺らぎの性質を明らかにしたいと考えています。とは言ってもNMRは実空間の局所プローブなので、運動量空間におけるスピン分裂が直接観測できるわけではありません。実のところ、NMRで何が見えるのかまだよく分からないのですが、両サイトの内部磁場や緩和率を比較することにより、秩序に伴う局所的な磁化密度の変化やその揺らぎが検出できるのではないかと考えています。

局在 f 電子系に関しては、まず籠状Pr化合物系 $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ ($T=\text{Ti, V}$) を対象とします。この系では、ダイヤモンド格子に位置するPrが非磁性2重項の結晶場基底状態を持ち、磁気双極子の秩序が起きないので、四極子や八極子などの高次多極子の物理を研究

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

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

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

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

する格好の舞台となっています [4]。これまで私の研究室でもPrTi₂Al₂₀の強四極子秩序についてアルミサイトのNMRによって、対称性の破れの微視的な検証や磁場-温度相図の決定などを進めてきました [5]。PrTi₂Al₂₀は常圧ではf電子の局在性が強く、伝導電子との混成による異常はあまり顕著にあらわれません。今後は、より強いf-c混成に起因する現象に注目したいと考えています。

その一つは、高圧下のPrTi₂Al₂₀の物性です。圧力印加によって四極子秩序相が徐々に抑制され、電気抵抗が非フェルミ液体的な振る舞いを示すと同時に、超伝導転移温度が増大することが知られています。もう一つはV系における実験です。PrV₂Al₂₀はTi系に比べてf電子と伝導電子の混成が強く、四極子近藤効果を示唆する異常が報告されています。また温度の低下とともに2段の逐次相転移を示し、そのうちの一つは磁気八極子の反強秩序に対応するのではないかと、という理論予想もあります。時間反転対称性を破る磁気八極子秩序があれば、自発的な内部磁場を検出できるNMRは特に有力なプローブとなります。また、これまでの局在多極子に関する実験は静的な秩序状態を特定するものがほとんどでしたが、本研究では核磁気緩和率の測定によって、多極子の揺らぎの検証に挑戦したいと思っています。

私は、これまでの研究生活を通してNMRを用いた様々な強相関電子系や量子スピン系の研究を行ってきました。対象となる物質も多岐にわたっています

が、実は大学院で研究を始めたときのテーマがSmB₆やCeB₆などのf電子系化合物でした。特にCeB₆の反強四極子相において、磁場によって誘起される磁気双極子の反強磁性構造をNMRスペクトルの解析によって決定し、学位論文にまとめたのですが、これがほぼ同時に行われた中性子回折の実験によって否定されてしまったために、NMRの結果が何を意味するのかが謎となっていました。それから15年後、酒井・椎名・ス波・Thalmeierの理論によってこの問題が解決され、NMRで見えていたものが磁場によって誘起された磁気八極子であることが分かった時には、大変感動すると同時に、「隠れた秩序」の検出に対するNMRの威力を改めて認識しました。

この公募研究では、局在多極子とスピン軌道結合金属の両者に対して、基礎に戻ってNMRから何が分かるのか、その可能性を極めたいと思っています。昨年度まで5年間にわたり研究所長を務めていたために少し鈍ってしまったかもしれない研究の勘を少しでも早く取り戻して、皆様と活発な議論ができることを楽しみにしています。

[5] T. Taniguchi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 113703 (2016).

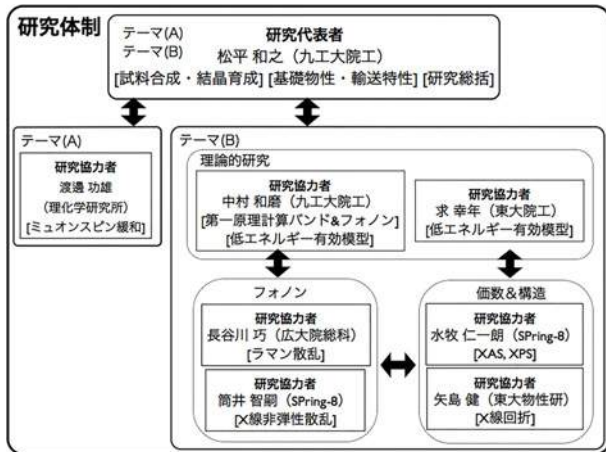


幾何学的フラストレート系 イリジウム酸化物における新奇物性の研究

松平 和之

九州工業大学 大学院工学研究院 教授

ここ10年ほどで、 $5d$ 遷移金属酸化物の実験的および理論的研究が進展し、 $5d$ 電子系の物性の理解にはスピン軌道相互作用の役割が重要であることが判ってきました。特に Ir^{4+} ($5d^5$) を含むイリジウム酸化物は有効全角運動量 $J_{\text{eff}} = 1/2$ の半分詰まった幅の狭いバンドによる強相関電子系で理解されることが明らかになっています[1]。この公募研究は、幾何学的にフラストレートした格子を有するイリジウム酸化物に関する研究で、2つのテーマ、(A)【パイロクロア $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ における磁気八極子秩序による量子臨界現象】、(B)【1次元鎖三角格子系 $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ における非線形伝導と105 Kの相転移の機構解明】を対象とします。本公募研究は、以下に示すような研究体制となっています。



まず、テーマ(A)【パイロクロア $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ における磁気八極子秩序による量子臨界現象】について紹介します。 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は33 Kで金属絶縁体転移を示します[2]。この金属絶縁体転移はIrの反強磁性秩序を伴い、その磁気構造はIrのall-in all-out構造です[3,4]。このall-in all-out構造は拡張多極子としてみると、磁気八極子秩序となっています。我々は、 Nd^{3+} を Ca^{2+}

で置換するホールドープにより金属絶縁体転移が抑制され消失することを見出しています。その金属絶縁体転移が消失する近傍の金属状態において、異常な電気抵抗の温度依存性 ($T^{1.2}$) が現れることが解ってきました。しかし、これらは多結晶での実験結果であり、Ndの局在スピンからの寄与(抵抗極小が出現する)等もあり、詳細な議論のためには純良単結晶試料の育成が必要です。パイロクロア型イリジウム酸化物の単結晶は東大物性研の中辻らが発見したKFフラックス法により育成されます[5]が、組成の制御が難しいという問題があります。このような状況のもと、精密にホールドープされた試料を育成するために、新たな取り組みとして雰囲気制御下での結晶育成にアプローチします。現在、電気炉を立ち上げ中であり、準備が整い次第、結晶育成を行う予定です。

次に、テーマ(B)【1次元鎖三角格子系 $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ における非線形伝導と105 Kの相転移の機構解明】について紹介します。図1に結晶構造を示します。結晶構造は空間反転対称性のない六方晶 (P-62m, No.189) であり、 c 軸方向に IrO_6 が辺共有した1次元鎖をなし、 c 面内ではIrの部分格子が三角格子をなしています[6]。Irの平均価数は+4.67で Ir^{4+} と Ir^{5+} が1:2で存在することになり、電荷(価数)のフラストレーションが内在しています。電気伝導性は0.2 eV程度

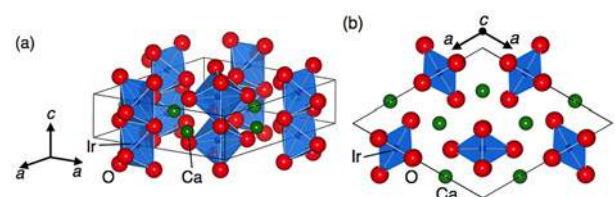


図 1. $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ の (a) 結晶構造と (b) c 面内の構造 [7]

の小さなバンドギャップを持った半導体であり、7.5 Kで反強磁性秩序を示します[7]。また、105 Kで二次相転移を示しますが、粉末X線および中性子回折による構造解析では、構造変化が観測されず[6]、その相転移機構は15年ほど未解明です。その解明が目標の1つです。また、2016年春に単結晶試料の育成に成功し、輸送特性を調べたところ、偶々、非線形伝導を示すことを見出しました。電流印可による試料の自己発熱の効果を考慮して、本質的に非線形伝導を示すことを確認しました(図2)[7]。非線形伝導はSDW, CDWや電荷秩序状態などにおいてしばしば見出されています。しかし、今回の発見は無秩序状態において非線形伝導が現れるということが新しいと考えています。その起源には電荷のフラストレーションが関係していると推測しており、その解明がもう一つの目標です。

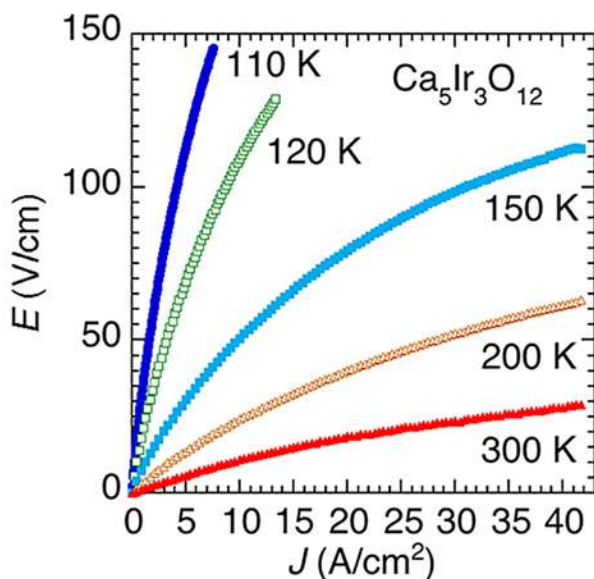


図2. $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ の c 軸方向の電場-電流密度特性 [7]

最後に自己紹介をします。私は札幌で生まれ育ち、北大理物の極低温研究室(現、Jマテリアル強相関物性研究室)で、榊原先生(現、東大物性研)にご指導頂き、重い電子系 CeRu_2Si_2 のメタ磁性に関するテーマで学位[博士(理学)]を取得しました。その後、1999年5月に北大理化学の無機化学研究室に助手として着任し、酸化物の合成手法を学びました。着任の際に日夏先生から、「この中から面白いことが見つかるから調べてください。」とパイロクロアのレビュー論文[8]を渡されました。これがパイロクロアとの出会いです。当初は希土類のf電子の磁性に着目し、極低温研究室の希釈冷凍機を借用し、AC磁化の測定から当時発見されたばかりのスピナイスの極低温ダイナミクスを明らかにしました。2001年4月に九工大に助手として着任し、スピナイス物質 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の単結晶育成を東大物性研の廣井先生と行いました。これがカゴメアイスおよび磁場誘起液相-気相相転移の発見、磁気モノポール対励起の観測につながりました。また、学位取得後から室蘭工大の城谷先生、関根さんと充填スクッテルダイトの研究を開始し、2003-2007年度の"スクッテルダイト"特定領域研究の計画班(城谷・関根班)分担者として参加しました。また2007-2011年度の"フラストレート系"特定領域研究の計画班(前川班)分担者として参加しました。本文で紹介したパイロクロア型イリジウム金属絶縁体転移は、"フラストレート系"特定領域の開始直前に発見しました。最近、f電子系とフラストレーションの視点を持ちつつ、5d電子系の研究を進めています。"J-Physics"にてf電子とd電子の分野融合に微力ながら貢献できればと考えています。宜しくお願い申し上げます。

- [1] B. J. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 076402 (2008).
- [2] K. Matsuhira *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 043706 (2007); J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 094701 (2011).
- [3] K. Tomiyasu *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 034709 (2012).
- [4] H. Guo *et al.*, Phys. Rev. B **88**, 060411(R) (2013).
- [5] J.N. Millican *et al.*, Mater. Res. Bull. **42**, 928 (2007).
- [6] M. Wakeshima *et al.*, Solid State Commun. **125**, 311 (2003).
- [7] K. Matsuhira *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 013703 (2018).
- [8] M. A. Subramanian *et al.*, Prog. Solid State Chem. **15**, 55 (1983).



遍歴反強磁性物質

BaMn₂Pn₂における電気磁気

谷垣 勝己

東北大学 材料科学研究所/理学研究科物理 教授

Khuong K. Huynh

東北大学
材料科学研究所

小笠原 拓磨

東北大学
理学研究科物理

電子の有する磁気と電荷は物性の重要な要素である。磁気と電荷という二つの物理量は、スピン軌道相互作用 (ζ_{SO}) を介して強く結びついている。物理量として、通常は、電場の応答である電流と磁場の応答である磁気が相互に結びつく効果は、電気磁気 (ME) 効果と呼ばれる。ME効果の延長として、最近強誘電・強磁性・強弾性が相互に結びつく効果が注目され、マルチフェロイクスとして研究されている。このような状況は、より広義の立場で、多極子という概念で理解する試みが続けられている。静的なME現象 (Static ME) の発現には、物質の空間反転対称性の破れが重要である。一方、電子が局在性極限から遍歴性極限に移行する際の動的ME効果 (Kinetic ME) に関しては、殆ど理解されていない。最近そのよ

うな重要な例として、反強磁性相互作用を基本とする遍歴反強磁性金属 (CuMnAs) の研究に注目が集まっている。この物質では、電流を流す事により電流と反強磁性の相互作用により分極電流が創出され、静的な電子スピン配列を磁気トルクにより変化させる事ができる興味ある物性が報告されている。

本研究の目的は、反強磁性遍歴電子系物質において、空間反転対称性 (Space Inversion Symmetry: SI) と時間反転対称性 (Time Reversal Symmetry: TR) が同時に破れている (空間パリティ-時間対称性 PT=SI×TR保存) 物質群において、新奇な動的電気磁気効果 (Kinetic Electromagnetic Effect: KME) を探求する事である。その対象物質としては、Mn₂Pn₂ (Pn: As, Sb, Bi: 図1) に着目して研究を進める。この物質はPT (=SI×TR) 対称性が保存されていて、Mnが構成する正方形の伝導面内と垂直な方向に磁気モーメントが配向する反強磁性が基底状態であるが、同時に金属相が存在するユニークな物質である。

本研究グループでは、この物質群に対して磁気輸送特性を系統的に研究して、特異な巨大負性磁気抵抗

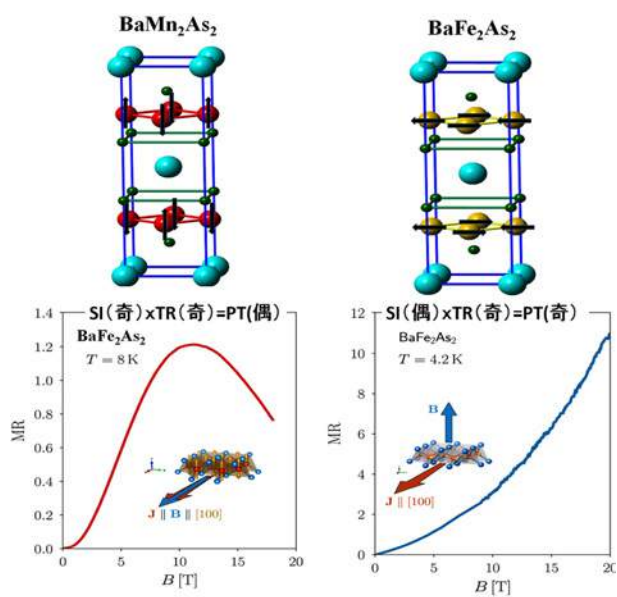


図1. 遍歴反強磁性物質 BaMn₂As₂ と BaFe₂As₂ の構造とスピン配列

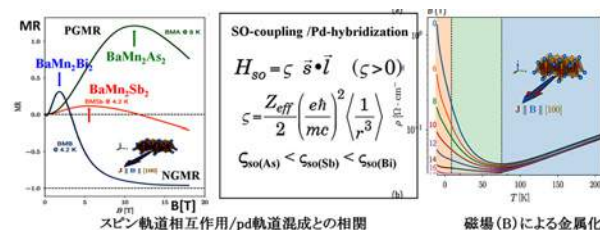


図2. Mn₂Pn₂ (Pn: As, Sb, Bi) の磁気抵抗 (MR) と磁場 (B) 下の抵抗の温度依存性

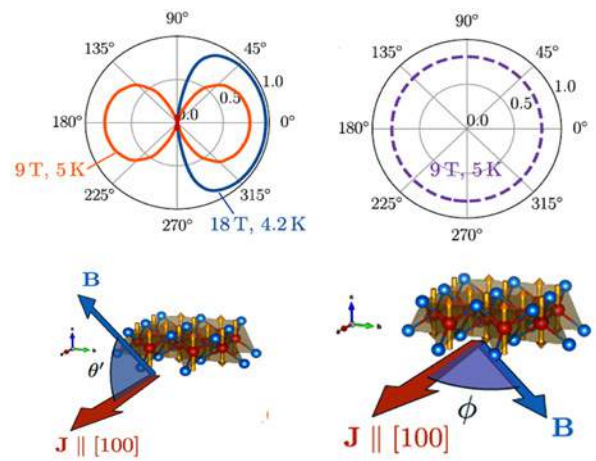


図 3. 観測される巨大磁気抵抗の新奇な角度依存性と磁場 - 電場方向の相関

(GNMR) と巨大正磁気抵抗(GPMR)の両方が電子系と正孔系バンドに存在する事を新しく見いだした(図2)。これまでの研究で, Mn_2Pn_2 系物質は, 1. 巨大負性磁気抵抗 (GNMR), 2. 磁場 (B) 誘起金属化, 3. 従来物質では観測されていないユニークなMR対称性, を示す知見を得ている。観測されたGNMRおよびGPMRは, Pn元素のスピン軌道相互作用 (ζ_{so}) /pd軌道混成状態と密接に関係する事が推測される。

現在, $BaMn_2Pn_2$ (Pn: As, Sb, Bi) 物質群を系統的に研究する事により, GNMRがPn元素の種類と系統的な相関を示す事を確認するに至った。すなわち, $BaMn_2Pn_2$ (Pn: As, Sb, Bi) のGNMRは, スピン軌道相互作用 (ζ_{so}) が大きくなる順に顕著になる傾向を示す。更に, 本物質系で観測される, GNMRの磁場 (B) の角度依存性を検討したところ, 図3に示すように磁場が2次元伝導面内にある場合にその方向によらず最大で, 2次元導電面に垂直な場合には殆ど観測されなくなる顕著な異方性がある事がわかった。 $BnMn_2Pn_2$ において観測された興味ある巨大負性磁気抵抗は, これまで報告されていない対称性を示す初めての実験結果である。

本新学術領域研究の観点からは, 多極子を基礎概念として, 物質の電気的および磁気的物性を広義の立場から理解する事を意図する研究である。本研究は, 遍歴反強磁性物質の電気磁気効果という未開拓の物性分野に関する研究であり, 当該新学術領域の

研究発展にとって重要であると考えている。本研究領域には, 強相関系や重い電子系に関係する d, f 電子系物質の研究者が多く集結している。また本研究領域の理論研究者も多い。私たちのグループの研究提案は, 遍歴反強磁性物質の電気磁気効果という未開拓の物性分野に関する研究であり, 当該領域の研究と関係して今後発展していく事を期待している。

[研究者紹介]

本公募研究代表者である谷垣は, 東北大学材料科学研究所に所属し, 電子材料研究領域のPrincipal Investigator (PI)である。また, 同時に理学研究科物理学専攻の教授を併任している。趣味は, さまざまな形態のスポーツと骨董品収集である。研究は, III-IV属軽元素系物質と d 軌道元素から構成される物質群を中心として, 広く新奇な伝導, 磁性, 超伝導および光現象などに興味を持って研究を進めている。Huynhは, ベトナム国出身の若手研究者で, 東北大学材料科学研究所の助手である。 d 元素系物質のディラック/ワイル金属状態に強い興味を有して研究を進める研究者である。小笠原は, 博士課程後期に進学予定の学生であり, バンド状態理論計算を併用して, 研究を進める事ができる。将来に職業として研究者をめざす学生である。

[1] K. K. Huynh, Y. Tanabe, and K. Tanigaki, Phys. Rev. Lett. **106**, 217004 (2011).

[2] K. K. Huynh, Y. Tanabe, T. Urata, H. Oguro, S. Heguri, K. Watanabe, and K. Tanigaki, Phys. Rev. B **90**, 144516 (2014).

[3] K. K. Huynh, Y. Tanabe, T. Urata, S. Heguri, T. Kida, M. Hagiwara, and K. Tanigaki, New J.Phys. **16**, 093062 (2014).



強磁場研の歩き方: NMR編

徳永 陽 / 酒井 宏典

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター

磁気共鳴 (NMR)には磁場が不可欠であり、信号強度は磁場が強いほど大きくなる。従って、強磁場下で面白い現象があれば、NMR研究者にとっては一石二鳥となる。我々はここ数年、強い磁場を求めてフランスと米国の施設を利用してきた。本稿ではそれらの施設について、実験設備や課題申請の方法、宿や食事、エクスカーション等について紹介したい。NMR実験に関する話題が中心となるが、基本的な情報はどの実験でも同じである。今後、強磁場実験を考えている方に、本稿が少なからずお役に立てば幸いである。

1. LNCMI-Grenoble (フランス)

グルノーブルはフランス東南部に位置し、山に囲まれた風光明媚な都市である。フランスではパリに次ぐ学術研究都市であり、国際会議や、放射光、中性子実験等で訪れたことがある方も多いと思う。フランス国立強磁場研究所グルノーブル(LNCMI-Grenoble)は、その市内の北東部、CEAやILLなどの研究機関が集中する地区の一角にある。アルプスを源流とする2つの河川に挟まれ、電磁石の冷却にもこの川の水が利用されている。研究所は1971年に設立され、1980年に量子ホール効果が発見された。

設備概要: 水冷式の電磁石が複数台設置されている。NMR実験で利用するのは、主にM9 (36T/34mm) [(最高磁場/ボア径)]もしくはM10 (31T/50mm)と呼ばれる電磁石で、⁴He VTIや希釈冷凍機と組み合わせて、300Kから20mKまでの温度領域で測定が可能である。両マグネットとも強磁場電磁石としては比較的高い磁場の安定性と均一性をもつ。じつは著者(徳永)がポスドクをしていた15年以上前から、45Tハイ

ブリッド型磁石の計画があり、実際に建設も進められてきたが、諸事情により未だ完成を見ない。一方、電磁石の方は線材の改良等により最高磁場が年々上昇し、昨年には37 Tに到達している。施設のより詳細な情報が本ニュースレター第5号のIlya Sheikin氏の記事にある。

利用申請: 現在、欧州では4つ強磁場施設がEuropean Magnetic Field Laboratory (EMFL)という横断ネットワークを形成し、実験の申請もこのEMFLのwebページで一括して受け付けている。5月と11月の年2回Proposalの締め切りがあり、審査委員会でA,B,Cにランク分けされた後、それに応じた優先順位とマシンタイムが割り当てられる。A評価であれば、通常7日間(8時間/日)のマシンタイムが与えられる。

アクセス: 最寄りの空港はリヨン・サン＝テグジュペリ国際空港。日本からは直行便がないのでドイツやベルギーなどを経由する。空港からはシャトルバスを利用して約1時間。ジュネーブ空港の利用も可能である(バスで2時間半)。国鉄駅や市内中心から研究所まではトラムで15分程度。

宿泊・食事等: 研究所の建物内にユーザー用の宿泊部屋が用意されている。強磁場実験は電気代の安いナイトシフト(深夜から朝までの実験のこと)になることが多いので、研究所内に泊まるメリットは大きい。市内からのアクセスが良く食料の買い出しや息抜きも容易である。カフェテリアのランチは充実している。

エクスカーション: 半日時間があれば、バステューユ城砦跡に登るのが定番コース。市街地とアルプスの山並みが見渡せる。ロープウェイもしくは徒歩で30~40分。夜景も美しい。もし一日余裕があればぜひ湖畔の古



LNCMI-Grenobleの一般公開日の受付の様子
毎年、多くの子供連れで賑わう



秋のアヌシー湖

都アヌシーへ。美しい湖と対岸に広がるアルプスの眺望が楽しめる。鉄道もしくはバスで1時間40分。

その他：NMR実験に限れば、グルノーブルを利用する最大のメリットは、現地に非常に強力なNMRグループが存在することかもしれない。実験に際して様々な協力と助言がもらえる。トラブルへの対応も早い。

2. LNCMI-Toulouse (フランス)

トゥールーズはフランス西南部に位置し、エアバス社の本拠地としても知られている。ピレネーを源流とするガロンヌ川が市内を流れ、レンガ造りの美しい街並みから「バラ色の都市」とも呼ばれる。フランス国立強磁場研究所トゥールーズ(LNCMI-Toulouse)は市内南部、緑の広がるトゥールーズ大学のキャンパスの隣にあり、すぐ脇をミディ運河が流れる。この運河はそれほど川幅はないが、実は地中海と大西洋を結ぶ大運河の一部で、古くはワインなどを運ぶ物流の大動脈であった。世界遺産に登録されている。

設備概要：パルス強磁場を主とし、最大磁場は約100 T。NMR実験はボア径の若干大きい(28mm)磁石を利用するので、最大磁場は60Tとなる。磁石の冷却速度が比較的早く、最大磁場付近でも約40分間隔でパルス磁場を印加できる。現在1.5KまでのNMR実験が可能となっている。

利用申請：EMFLのwebページより一括して申し込む。審査委員会の評価と実験の性質を考慮して、利用可能な最大のパルス数が決められる。

アクセス：市内にトゥールーズ・ブラニャック空港がある。日本からの直行便がないので乗り継ぎとなる。空港からはトラムもしくはバスを利用し市内の中心

部へ到着(約30分)。そこから地下鉄を利用して約15分で研究所へ到着する。

宿泊・食事等：研究所に隣接するINSA 国立科学研究所の宿泊施設が利用できる。ただしキャンパスが広大で、飲食店も少ないので、食料の調達には少し苦勞する。市内にホテルを取っても良い。

エクスカージョン：比較的大きな街なので、地下鉄に乗り市内の中心部に行けば何でもある。ガロンヌ川の河畔やレンガ造りの旧市街を歩くだけでも楽しい。豆と肉を煮込んだ「カスレ」が名物。また空港近くの航空博物館には、コンコルドの実機が展示されている。

その他：現在、欧州ではトゥールーズとドレスデンの2つの強磁場研でパルス強磁場実験が可能である。本稿ではこのうちトゥールーズの施設のみ紹介した。パルス強磁場下のNMR技術はまだ発展途上であり、多くの信号の積算を要する測定や、緩和時間の測定は難しい。テーマの選択が重要となる。

3. NHMFL- Tallahassee (米国)

タラハシーは、フロリダ州の州都であり、フロリダ半島の西、メキシコ湾岸から少し離れた内陸にある。亜熱帯気候で、夏は蒸し暑い、冬は比較的温暖で過ごしやすい。フロリダ州では春から夏にかけてハリケーンが発生し、しばしば各所で大きな被害がみられるが、ここタラハシーで被害は稀だという。ここにはフロリダ州立大学(FSU)、フロリダA&M大学(FAMU)、タラハシーコミュニティー大学などがあって、とにかく学生が多い。タラハシーにある国立強磁場研究所(NHMFL)はFSUによって運営されていて、定常強磁場供用、固体物理、生体・化学NMRなどの



ガロンヌ川の河畔



Cell-14から、偶数Cellをのぞむ
奇数Cellは裏側

研究が行われており、市民からは親しみを込めて「Maglab」と呼ばれている。NHMFLには他に、フロリダ州ゲインズビルのフロリダ大学(UF)の生体・化学NMRおよび超極低温実験施設と、ニューメキシコ州ロスアラモス国立研究所(LANL)のパルス強磁場施設とが含まれるが、ここでは紹介しない。

設備概要：45 Tまでの定常磁場での実験が可能。現在も定常磁場では世界最高である。外側に11.5 Tの超伝導磁石、内側に33.5 Tのビッター型電磁石を配置したハイブリッド磁石で、通称Cell-15と呼ばれる(NHMFLのマグネットは、コンクリート厚壁で仕切られた周囲に配置されているため、「細胞」Cellに例えられている)。Cell-15でのNMR実験では通常の ^4He -VTI、 ^3He クライオスタットが利用可能で、約500 mKまで冷やすことができる。他に、NMR可能な高均一マグネットとして、Cell-14の連結(シリーズ)ハイブリッド36 Tが最近供用開始された。同じ電流を超伝導磁石とビッター型電磁石に使うため、電力消費はCell-15に比べて低いが、45 Tまで2分で到達するCell-15に比べて、励磁スピードは格段に遅い(約30分)。また、試料が十分小さければ、Cell-8での通常ビッター型電磁石35 TもNMR可能である。かつてCell-2にあったNMR専用高均一ビッター型磁石30.5 Tが最近使えなくなったのは残念なニュースではあるが、超伝導磁石32 Tに近い将来供用開始になるとのことで期待している(超伝導磁石では24時間励磁可能となる)。

利用申請：実験のProposalはNHMFLのwebページで一括して受け付けている。外部委員も含めた採択委員会でマグネットタイムが割り当てられる。いうまでもなく競争率が高いCell-15採択は容易ではない。

申請前に、現地スタッフと連絡を密にとって研究計画を作成することが求められる。特にNMRでは、信号が出ないとどうにもならないので、現地のスペクトロメーターとプローブを使って実際に信号が出ることを確認するなど、十分な準備検討が必要である。こうした準備実験データは、審査委員会でのアピールに有効である。

アクセス：郊外にタラハシー地域空港がある。日本からの直行便がないので通常ダラスかアトランタで乗り継ぎとなる。空港から研究所へは、車で10分程度。いつも訪問者にとって問題となるのは、「足」。公共交通機関が十分ではないので、レンタカーが必須となる。タクシー、Uber利用も可能であるが、実験中は、早朝深夜に研究所を往復する必要があるので、レンタカーに分がある。市内への移動にも車は必須である。

宿泊・食事等：かつてはユーザ用の宿泊部屋が用意されていたが、現在は自分で民間の宿泊場所を確保しなくてはならない。一部市内のホテルでは、Maglab価格が利用でき、NHMFLのホームページに情報が公開されている。ただ最近の物価上昇と円安の影響で、格安ホテルというのはほとんどなく、1泊平均80~150ドルかかってしまう。一方、民泊Airbnbで快適かつ格安という物件があるらしく、米国や欧州ユーザーではこちらを利用する方がメジャーなようだ。入学卒業シーズンの5月と9月、またアメリカンフットボールの大学リーグ開催中の秋季は宿泊料金も割高になる上、早めの予約が必要。食事はレンタカーさえあれば、全く不自由を感じない。好景気なのか、近くにスーパーマーケット、レストランもどん



Cell-15のプラットフォームにて



Wakulla Springsの飛び込み台

どん増えている。ただし、日本人には物価高に感じる
ので、外食を減らすため宿泊場所にキッチンがあると助かる。ただ、せつくなので実験完了後には、贅
沢にステーキハウスで米国高級ステーキを思う存分
頬張ってもらいたい。

エクスカージョン: 数年前に感じた景気後退の雰囲気
はなく、ダウントウンは公園も増えて格段に綺麗に
なった。散歩やランニングには最適だろう。また、
ビール醸造所も流行っているのか、Maglab近くにも
2つの醸造所があり、週末には多くの人が開放的な
屋外でビールを楽しんでいる。秋季にはぜひ本場の
アメリカンフットボールを米国最大のレンガ製FSUス
タジアムで観戦したい。車で1時間ほど足を伸ばせば
Wakulla Springs自然公園で、運が良ければマナ
ティーを見ることができる。夏期には、ここの遊水池
に飛び込み台が設置されていて、トラディショナルア
メリカンな雰囲気を楽しめる。もっと足を伸ばせばメ
キシコ湾のビーチでのんびり気分を楽しめるはず。

その他: 冒頭に、蒸し暑い夏、過ごしやすい冬、などと
書いてしまったが、研究所内は常に過剰にエアコンが
効いている。夏でも長袖フリースかジャケット、冬には
半袖Tシャツを旅行鞆に詰めておくことをお勧めする。

4. IMR-Tohoku (仙台)

本ニュースレター第5号の野尻氏の記事で紹介さ
れているように、国内でも昨年度から東北大金研の
強磁場施設で25T無冷媒超伝導磁石の運用が始まっ

た。非常に安定した超伝導磁石で、ユーザーは24時
間測定が続けられる。長時間の信号積算が必要とな
るNMR実験にとって、このメリットは計り知れない。
同じ1週間のマシンタイムでも、これまでの海外施
設の優に4-5倍のデータが得られる感覚である。同
ニュースレターには東大物性研で進められている超
安定化パルス強磁場を用いたNMR技術の開発も紹
介されている(小濱氏)。今後、強磁場実験がより身
近なものとなって行くものと期待している。

5. 最後に

経験上、強磁場実験はほぼ予定通りには進まな
い。何が起きても動ぜず、柔軟に対応する心構えが
必要である。ユーザー側の問題であれば徹夜してで
も何とかしなくてはならないが、様々な原因(猛暑で
市内の電力が欠乏、冷却水温度の上昇等)で磁場そ
のものが出なくなることも多々ある。実験の目的を明
確にし、計画をあまり欲張らないこと、またオプショ
ンの実験プランを複数用意しておくことも重要となる
(待ち時間に行くレストランを丹念に調べておくなど
心の余裕も大事)。またマグネットタイムには複数の
手足と頭脳が大事で、あまりに疲れると判断も鈍り
やすい。単独ではなく複数での出張を強くお勧めす
る。各施設のwebページにはLocal Contactの名前
が載っている。まずは彼らに連絡を取るのが強磁場
実験の第一歩となる。

世界各国の強磁場施設については、今年の3月に以下の論文がアーカイブにアップされている。
今後の展望も含め詳しく紹介されている(全49頁)。

[1] R.Battesti, arXiv:1803.07547 (2018)



物質開発者のための 共同利用施設利用のすすめ

大貫 惇睦

琉球大学 理学部 客員教授

J-Physics ニュースレターの編集委員の松田達磨さんから、表題のようなタイトルで執筆を依頼されました。物性物理の分野の中で私ほど共同利用施設を利用している研究者はいないので、そのような依頼が来たのでしょう。64才で大阪大学を定年退職し、琉球大学理学部の仲間隆男さん、辺土正人さんの磁性体研究室に来て7年目をむかえています。これまでの沖縄での生活の日々は、大阪大学低温センターだよりも、道の途中で「樹木」、「生きもの」、「くだもの」、「島めぐり」、「島唄」などと題してつづってきました。本土から遠く離れ、気候も文化もかなり違う沖縄は、興味深いことがいろいろあります。同様に、現在の日本の研究状況を見ると、見えてくるものが多々あります。若い研究者に現状を認識していただき、勇気を持って生きて欲しいというエールを送りたいと思い、本稿を書くことにしました。

20年以上前に大学院重点化が実施され、例えば主要旧国立大学では理学部教授は大学院理学研究科教授に配置換えになりました。大学院生の定員も増えました。並行して校費の減額が毎年実施され現在に至っています。例えば、教官ひとり当たり年間60～100万円あった重点化前の校費は現在1/5に減少しています。教官2人でチームを組んで一地方旧国立大学の研究グループは100万円以上ありましたから、科研費がなくても実験研究はできたでしょう。しかし、現在の校費では無理と言うものです。大学院重点化後、旧国立大学は法人化されました。もちろん基盤となる資金は文部科学省に大きく依存しているわけですが、その大部分は人件費に使われます。法人化の趣旨は、それぞれの大学が特色のあるテー

マを掲げ、学長がそれを実行するというものです。そのため、それまで一人だった副学長は、例えば5人に増え、それぞれの副学長の下に委員会が設けられ、学長によるトップダウンの教育・研究システムになりました。掲げた特色のあるテーマの実行の検証も求められますので、それにも資金がかかります。委員会の数も多くなり、教員の研究に割く時間は減っています。地方旧国立大学では助教は極めて少数なので、准教授も教授と一緒に各種委員会に出席することになります。教員の人数が少ない上に、委員会の数は大学に依らず同じなので、地方旧国立大学の教員は研究に割く時間は本当に少なくなっていると言えるでしょう。追い打ちをかけて人件費を抑制するために教員数は減少しています。特に、この数年間は教授が定年退職しても、補充されない状況が続くと思われま

自民党政権は数の上では極めて安定なので、6年ぐらい前に私は財政健全化が実施されるのではと思っていました。つまり少子化も大学に反映してきましたので、私立大学の統廃合は進むでしょう、それに伴って旧国立大学大学院の学生数はとりあえず現状とし、まず学部の学生数を減らす、科研費等の研究費も減少させる、と思っていました。しかし、そういうことにはなりません。でも現状の借金はいつまでも続けられなくなるので、いずれはそういう日が来ると思うのです。つまり、科研費の総額はこの20年間減少していません。むしろ微増していると言って良いでしょう。それ以外に文部科学省がいろいろとテーマを掲げて資金を提供しています。主要な大学ではそれらを獲得するので、教育・研究資金に困る

ことはないでしょう。文部科学省への分配金も減少してはいないので、どこかでと言うか、広く多くの大学への資金を減らし、ほんの一部の大学で補償されているか、増えていることになります。日常生活の言葉で言えば、スープは薄めて飲まない、飲むべき人が飲む、と言うのがこの20年間の教育・研究行政のスローガンと言って良いでしょう。さて科研費の獲得状況ですが、本人が代表で獲得している割合は主要旧国立大学で7~8割、地方旧国立大学で5割かと思います。主要大学の活躍著しい教員は複数科研費を獲得しています。若手研究者の時代には科研費が獲得できても、若手の枠から外れると獲得が著しく難しくなっています。

以上のような状況を踏まえて、次にどうするか一緒に考えてみましょう。まず明るい状況を述べましょう。現在の40代の准教授・教授は著しく優秀です。物づくりから計測までどの分野にもとても優秀な人材が見いだせます。この人達から多くのことを学びとることです。中でも、物づくりだけは若いうちに身につけないと感性がとぎ澄まされないでしょう。知識を体に染み込ませないと本物にはなれません。現在の年配の教員は、物づくり、装置づくりをやってきた方々です。装置が故障したとき、いちいち装置を製造元に送り返して修理を頼むとお金がかかります。そんなお金は現在はありませぬので、装置を分解して、原因をつきとめ、ある一部のパーツのみを交換するという技術を身につける必要があります。それが若い研究者にも求められるのです。私が一番危惧しているのは測定装置のことです。主要大学・研究所にはSQUIDを始めとして簡単便利な装置があるので、磁

化率・磁化、電気抵抗、ホール効果、比熱等の基本の物性をただちに測定することが可能です。一つ新しい化合物が見つかったら、2週間ぐらいでほとんどすべての測定ができることになります。そういう研究環境で学位を取得し、地方の大学に職を得たら、何もできないことになります。若い頃私は上述の物性を測定できる装置を次々に手づくりで作っていきました。その時思ったのは、何か他にはない特色ある計測ができないか、ということでした。それが私にとってはドハース・ファンアルフェン (dHvA) 効果測定でした。単純金属のときは伝導電子のフェルミ面の研究として威力を発揮しましたが、化合物になると試料の純良性が著しく悪くなり、dHvA量子振動が観測できません。dHvA量子振動の観測には純良な単結晶が必要不可欠です。それが私のその後の研究になりました。

主要旧国立大学が装置を整えて、多くの大学院学生と一緒に研究が進むと、例えば東京大学物性研究所の研究特色が色あせてきました。そこで、この20年間特色のある、他の追随を許さない装置開発が物性研究所で進められてきました。それが現在生きています。もちろん、物性研究所に限らず、東北大学金属材料研究所、その他もしかりです。こういう装置が共同利用できるのです。これは、世界に誇る日本の文化、旧文部省の文化なのです。旅費、滞在費が出て研究費がかからないのは本当に素晴らしいことです。多年物性研究所を始めとし、いくつかの共同利用施設で委員をしてきたので、現在は共同利用者の一人としてそのいくつかの施設を利用しています。施設利用もそうですが、研究の友は何と言っても

学生さんです。琉球大学で多くの学生さん、中でも3人の博士後期課程の学生さんと一緒に研究をしてきました。これまで学生さんの進路について、とやかく言ったことはありません。進路は本人が決めるもので、それを手助けするのが教員の役目だと思い、そうしてきたつもりです。でも3番目の学生さんの時には博士課程に進んだらどうでしょうかと声をかけました。博士課程の学生さんと一緒に研究できるのは、教員にとって本当に幸せなことです。何と言っても学部4年生、修士課程の学生さんへの良きアドバイザーです。この6年間、面白そうな純良単結晶を育成して、共同利用施設の装置を活用させていただき、論文を作成してきました。研究者は何と言っても論文を書かないと、科研費は獲得できません。研究資金なくして実験研究はできません。ここで、例えば物性研究所での共同利用者の名を見ると、意外に主要大学の研究グループが多いのです。ある程度の研究の目安があって、こういう測定をすれば何とか学会発表や論文にできるだろうという状況でないと申請は基本的にはできません。仮に申請がなされ、許可されたとしても、受け入れ教員と具体的な話し合いが行われてからはじめて共同利用が実施されるからです。そう思ったとき、物づくり、純良単結晶育成は、どこの大学でも生きていける術になると思うのですが、どうでしょうか。地方で輝くには、例えば圧力技術とか物づくりとか何か特色を持つことが重要です。ホテルの光はネオンの下では目立たないかも知れませんが、地方に行けば輝きます。ホテルの光でいいじゃないですか。ホテルの光は意外と目立つものなのですよ。



琉球大学のバス停で、バスを待つベンチに座っていたら、隣に正装した年頃の女性が座り、何となく会話になりました。教授の方が退職にされるので最終講義に来たとのことでした。今年の3月のことです。大学院は東京の大学に進み、今は企業に勤務されているとのこと。大学院でのお友達と結婚するつもりでお付き合いしているが、お相手の方が大学での就職先が決まらず苦悩しているということをお話してくれました。相手の男性の方が、かつての自分の息子のような気がして、今の若手研究者の現状をお話しし、支えてあげて下さいね、と思わず熱く激励してしまいました。5年前に琉球大学で学位を取得し、この間ポスドクを続けていた若手研究者が沖縄の大学に就職が決まったことが、この4月に本人からのメールで知らされました。これまで2度推薦文を書きましたので、とても気になっていました。ようやく安心できる職場が得られたようです。我が子のように嬉しいです。私達が研究で苦楽を共にした3人の博士課程の学生さんは、本人の希望に沿って一人は大学の助教に、一人は大企業に就職して活躍しています。もう一人は現在D3で学振の特別研究員になっていて、沖縄での物づくりの会社について先日内定したところですよ。



歪んだ三角格子反強磁性体の フェリ磁性の崩壊

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

嶋田 ありさ

京都大学大学院
理学研究科

中野 博生

兵庫県立大学
物質理学研究科

吉村 一良

京都大学大学院
理学研究科

1. はじめに

典型的なフラストレーション系として知られる $S=1/2$ 三角格子反強磁性体は、絶対零度において120度構造と呼ばれる長距離秩序を持ち、飽和磁化の3分の1において磁化曲線がプラトーを持つことが知られている。この三角格子反強磁性体に $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 型と呼ばれる格子ひずみを導入すると、フラストレーションが完全になくなる極限においてダイス格子反強磁性体と呼ばれるモデルに至る。このダイス格子反強磁性体は、Marshall-Lieb-Mattisの定理[1,2]によって保証された飽和磁化の3分の1の自発磁化を持つフェリ磁性基底状態を持つことがわかっている。本研究では、三角格子とダイス格子の間で、この格子ひずみを連続的に変化させた場合の中間領域において、どのような磁性が発現するかについて、数値的厳密対角化を用いた数値解析により研究したので、その結果を報告する[3,4]。

2. モデルと数値計算法

本研究で考えるモデルは、図1で示した格子における $S=1/2$ ハイゼンベルクモデルで、ハミルトニアンは以下のようなものである。

$$\mathcal{H} = \sum_{i \in B, j \in B'} J_1 \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j + \sum_{i \in A, j \in B} J_2 \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j + \sum_{i \in A, j \in B'} J_2 \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$$

ここで、格子点A、B、B'はそれぞれ図1中の3つの部分格子の点を表し、 J_1 はBB'間の交換相互作用定数、

J_2 はAB間及びAB'間の交換相互作用定数で、本研究では、 J_1, J_2 が両方とも正、すなわち反強磁性相互作用の場合を考える。この二つの交換相互作用の比を $r=J_2/J_1$ とすると、この格子は $r=1$ のとき歪みのない三角格子となり、 $r \rightarrow \infty$ の極限、すなわち $J_1=0$ のときダイス格子となる。 $r=1$ の三角格子反強磁性体の場合には、絶対零度では自発磁化を持たない120度構造の長距離秩序が実現することが知られている。一方、ダイス格子の場合には、Marshall-Lieb-Mattisの定理により、飽和磁化の3分の1の自発磁化を持つup-up-down構造のフェリ磁性が基底状態で実現することが示されている。そこで、 $1 < r < \infty$ の中間状態においてどのような磁性が実現するかを解明することが本研究の目的である。

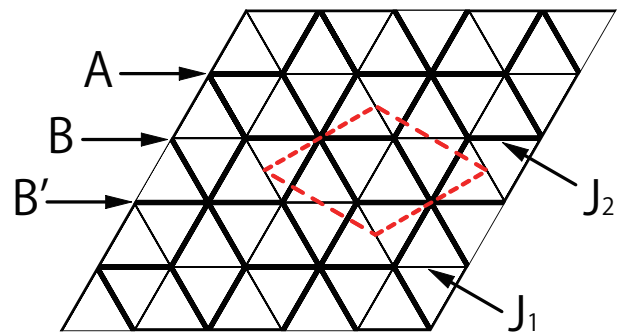


図1. 本研究で考える格子。A、B、B'が3つの部分格子を表し、赤い破線がユニットセルとなる。細実線と太実線が、それぞれ J_1 と J_2 の大きさを持つ相互作用ボンド。

本研究では、上述のモデルに対して、有限クラスターの数値的厳密対角化を適用して、理論的に研究した。このモデルでは、規格化された磁化 $m=M/M_s$ (磁化 $M=\sum_j S_j^z$, M_s は M の飽和値) は保存量となるので、 m の決まった部分空間における最低エネルギーをランチョス法で計算することにより、絶対零度における自発磁化の有無とその値を求めることができる。ランチョス法の計算を実施する場合、計算対象となる部分空間の行列次元の大きさを持つ配列 (ベクトル) のデータをメモリに格納する必要がある。 $S=1/2$ の場合、40 サイトに近い規模以上の計算を実現するには、相応のスーパーコンピュータ上で並列化プログラムを適切に実行することが求められる。本研究にはそのような大規模並列計算の結果も含まれている。使用した並列化プログラムは、元々、ハルデンギャップ解析の研究[5]で開発されたものを用いた。移植性と汎用性に優れている特長があることから、京コンピュータを含む様々なスーパーコンピュータで大規模並列計算の実績[6,7]を持つプログラムでもある。また、取り扱い可能なスピン数が更に制限されるものの、ハウスホルダー法によりすべての固有値の計算も行った。これにより、比熱の温度依存性を求めることができる。これらの数値解析の結果を以下に示す。

3. 自発磁化

スピン数 $N_s=9, 12, 21, 27, 36, 39$ の有限クラスター (周期境界条件) に対して、ランチョス法に基づく数値的厳密対角化を適用して、各 m についての最低エネルギーを計算して比較することにより、比 $r=J_2/J_1$ を

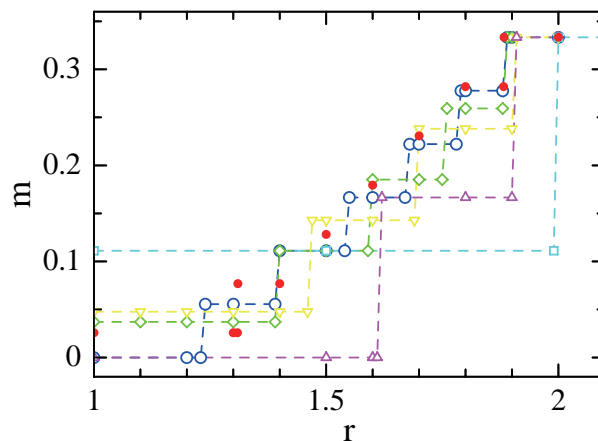


図2. 自発磁化の r 依存性。水色四角、紫三角、黄逆三角、緑ダイヤモンド、青丸(白抜き)、赤丸(塗り潰し)がそれぞれ $N_s=9, 12, 21, 27, 36, 39$ のクラスターの自発磁化。

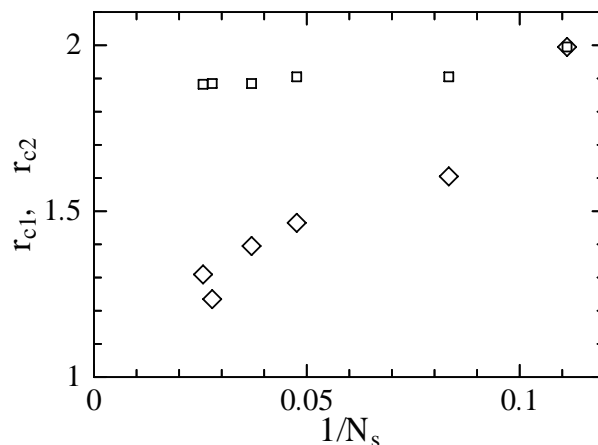


図3. 二つの相境界 r_{c1} (\diamond) と r_{c2} (\square) のシステムサイズ N_s 依存性。

変化させた場合の絶対零度の自発磁化を求めた。この自発磁化の r 依存性を図2に示す。図2によると、 $1 < r < 2$ の範囲内の幅広い領域で、3分の1より小さい中庸な自発磁化が（候補となる磁化がそもそも存在していない $N_s=9$ を除いて）実現していることがわかる。これは、Marshall-Lieb-Mattisの定理では示すことのできない非自明な自発磁化を持つ新たな相が出現することを示唆している。この非自明な自発磁化を持つ中間相出現が単なる有限サイズ効果ではないことを確認するため、各サイズのクラスターにおいて、 $M=0$ または $M=1/2$ （自発磁化がないことを示している）より大きい M が現れる最低の r を r_{c1} 、 m がちょうど3分の1になる最低の r を r_{c2} として、そのサイズ依存性を図3に示す。図3によると、システムサイズ N_s が大きくなるにつれて、 r_{c1} については N_s の偶奇で異なる系列となっていることに留意すると、非自明な中間状態の相の領域が広がっている様子が捉えられている。したがって、この非自明な中間状態の相の領域は、無限系においても存在することは明らかである。とくにこの領域の下限である r_{c1} は、 $N_s \rightarrow \infty$ の極限で、1に向かってるように見える。もしそうなら、三角格子に対して少しでもこの歪みが入ると自発磁化が現れることになるが、この点は未解決である。

4. 比熱のピーク

次にハウスホルダー法に基づく数値的厳密対角化により、ハミルトニアン全ての固有値を計算して、比熱の温度依存性を求める。この計算は、計算機資源としてのメモリ量の制約から、あまり大きいシステムサイズに適用できないため、本研究では $N_s=12$ の有

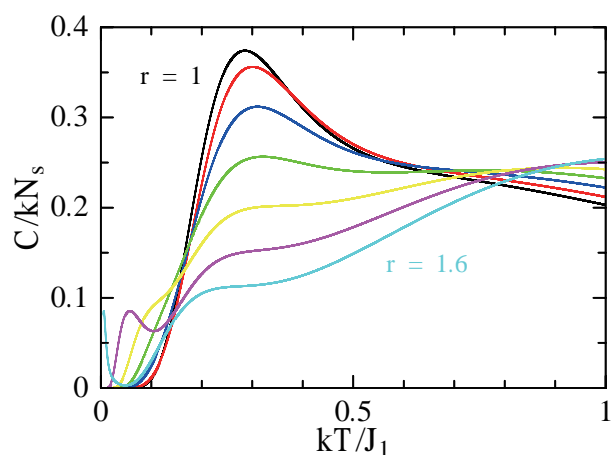


図4. いくつかの r に対する $N_s=12$ クラスターの比熱の温度依存性。黒線、赤線、青線、緑線、黄線、紫線、水色線がそれぞれ $r=1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6$ 。

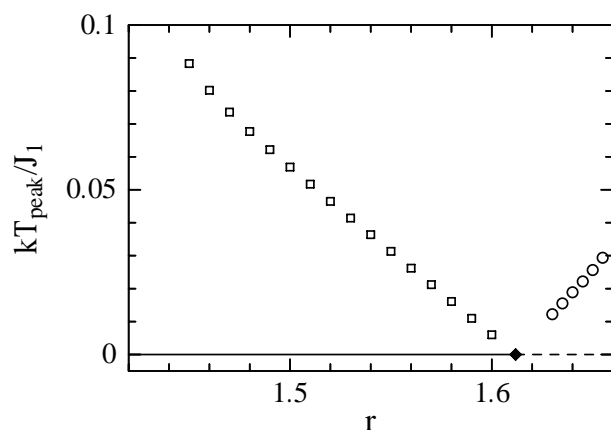


図5. $N_s=12$ クラスターの比熱のピーク温度の r 依存性。 $r < r_{c1}$ を四角、 $r > r_{c1}$ を丸で示す。温度ゼロの実線部は自発磁化の無い相、破線部はフェリ磁性相。

限クラスターに絞って、いくつかの r の値について計算した。 $r=1\sim 1.6$ の比熱の温度依存性を図4に示す。 $r=1$ の歪みのない三角格子反強磁性体から、 r が大きくなるにつれて、三角格子としての比熱のピークが次第に小さくなって消失するとともに、もっと低温で新しいピークが生じていることがわかる。この低温側の新しい比熱のピークは、更に r を大きくすると、より低温側にシフトしていく様子が捉えられている。このピークを示す温度を r の値を細かく変えて計算し、その r 依存性を図5に示す。このシステムサイズ $N_s=12$ では、 $r_{c1}\sim 1.612$ となることが前節の計算でわかっているため、図5では温度ゼロにおける横線として、実線部分が自発磁化の無い相、破線部分が非自明な中間状態相を示している。図5により、低温側の新しい比熱のピーク温度は、ちょうど $r=r_{c1}$ でゼロとなり、その両側において、ほぼ $|r-r_{c1}|$ に比例する挙動を示していることがわかる。同じ解析を r_{c2} 付近で行ったところ、ほぼ同様の結果を得ている。この結果から、ここで現れた低温側の新しい比熱のピークは、本研究で発見された非自明な中間状態相を特徴づける現象であることが推定される。

5. まとめ

$S=1/2$ 三角格子反強磁性体とMarshall-Lieb-Mattisの定理によるフェリ磁性を示すダイス格子をつなぐモデルとして、 $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 型歪みを持つ三角格子スピンモデルを、数値的厳密対角化で研究した。その結果、三角格子とダイス格子の間の中間領域において、中庸な自発磁化を持つ非自明な中間状態の相が現れることが判明した。この中間状態相は、ダイス格子側から見ると、その格子形状によって出現したフェリ磁性がフラストレーションによって崩壊していく挙動と見られることもできる。本研究では、そのような崩壊の様子を量子力学的に偏りのない計算の中で捉えたことが大きな特徴となっている。また、低温における比熱の温度依存性には、この非自明な中間状態相と密接に関連する新しいピークが出現することもわかった。この新しいピーク構造の発見を契機に、この系の挙動を今後の研究で更に深めていきたい。

-
- [1] W. Marshall: Proc. R. Soc. London, Ser. A, **232** (1955) 48.
 - [2] E. Lieb and D. Mattis: J. Math. Phys. (N. Y.), **3** (1962) 749.
 - [3] H. Nakano and T. Sakai: J. Phys. Soc. Jpn. **86** (2017) 063702.
 - [4] A. Shimada, H. Nakano, T. Sakai and K. Yoshimura: J. Phys. Soc. Jpn. **87** (2018) 034706.
 - [5] H. Nakano and A. Terai: J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 014003.
 - [6] H. Nakano and T. Sakai: J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 053704.
 - [7] H. Nakano and T. Sakai: J. Phys. Soc. Jpn. **87** (2018) 063706.



反強磁性スピン波励起スペクトルの電子相関による線幅増大

森 道康

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 主任研究員

反強磁性絶縁体(AFI)と強相関電子系(CM)の接合において、AFI中のスピン波励起スペクトルを考察する。このような例は、多層系銅酸化物と呼ばれる高温超伝導体や、スピン流を基軸としたスピントロニクスデバイスに見ることが出来る。

多層系銅酸化物の単位胞内には、酸素の配位数が異なる複数のCuO₂面が存在する。単位胞の外側には酸素5配位のCuO₂面(OP)があり、そのキャリア濃度は、単位胞の内側にある酸素4配位のCuO₂面(IP)におけるキャリア濃度とは一般に異なっている。そのため、OPが超伝導状態、IPが反強磁性状態になりうる事が報告されている[1]。一方、銅酸化物高温超伝導体の磁気励起は、ホールを導入すると、低エネルギーで非整合波数に現れ、エネルギーの増加と共に整合波数に向かって収縮し、より高エネルギーでは再び非整合波数を持つ、砂時計のような形になることが知られている[2]。この特異な磁気励起スペクトルについて多くの研究がなされていることは周知の事実であるが、最近、低エネルギー側の磁気励起は、反強磁性スピン波と非整合波数を持つ磁気励起の重ね合わせである可能性も報告されている[3]。

銅酸化物高温超伝導体の磁気励起スペクトルの全貌を理解することは、高温超伝導の理解に直結する重要な課題である。その試みの一つとして、図1に示すAFIとCMの2層系を考察することにした[4]。AFIは、最近接サイト間に磁気交換相互作用(J)を持つハイゼンベルク模型を仮定して、線形スピン波近似で扱うことにする。CMは、各サイトで電子の二重占有が禁止される模型を考える。CMに J は含まない

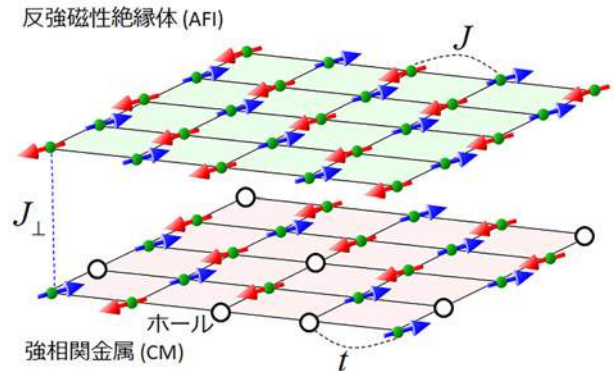


図1 反強磁性絶縁体(AFI)と強相関金属(CM)の二層系の図。赤と青の矢印は電子スピンを表す。白抜き丸印はホールを表す。CMでは電子の二重占有を禁止する。AFIは最近接間に磁気交換相互作用(J)、CMは最近接間に電子の飛び移り積分(t)を考える。AFIとCMの間には磁気交換相互作用(J_{\perp})を考える。

ことにする。二重占有の効果は、Gutzwiller近似を用いて、最近接サイト間の電子の飛び移り積分(t)に対する繰込み($t \rightarrow g_t t$)として扱う。ここで、 g_t はGutzwiller因子で、ホール濃度(p)の関数として $g_t = 2p/(1+p)$ で与えられる。AFIとCM間は、磁気交換相互作用(J_{\perp})で結ばれているとする。Gutzwiller近似では、AFIとCM間の電子の一体の飛び移り積分は消える。 $J \gg J_{\perp}$ として、AFIのスピン波に対する自己エネルギーを、 J_{\perp} の2次の範囲で求めた。計算の詳細は、文献[4]を参照して頂くこととして、以下に結果の一例を示す。

図2は、スピン波励起の存在領域を、波数(q)とエネルギー(ν)で示したものである。エネルギーは t で規格化した。図2(a)は、CMの二重占有を許す場合($g_t=1$)、つまり電子相関が無い場合である。線形の分散関係を持つ反強磁性スピン波励起の存在が見てとれる。一方、図2(b)は電子相関を含めた場合(g_t

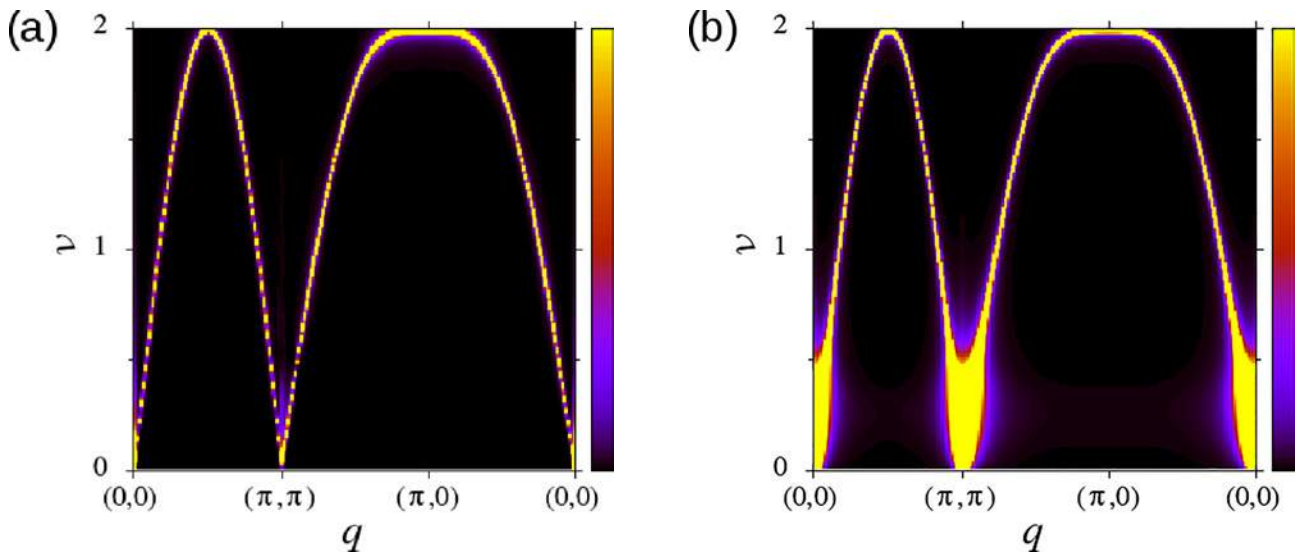


図2 波数(q)-エネルギー (ν)面上でスピン波励起の存在領域を示した図。(a)は、CMの二重占有を許す場合($g_t=1$)、つまり電子相関が無い場合である。(b)は電子相関を含めた場合($g_t \sim 0.02$)。エネルギーは t で規格化。

~ 0.02)で、 $\nu < 0.5$ の低エネルギー領域でスピン波励起の分布が広がっていることが見てとれる。これは、励起スペクトルの線幅が増大しているためである。線幅の見積もりとして、 $q=(\pi, \pi)$, $\nu=0.5$ において、自己エネルギーの虚部(Γ)をある値で規格化したものを g_t の関数としてプロットすると図3のようになる[5]。 g_t が小さくなるにつれ、つまり電子相関の効果が大きくなるにつれて線幅が増大する様子が分かる。この起源は何か？自己エネルギーは、大まかに言えばCM内の電子正孔励起である。そのCMは電子相関によりバンド幅が抑制され状態密度が増大している。このため、CM内の電子正孔励起が、低エネルギー領域における反強磁性スピン波励起の逃げ道として働き、線幅が増大したと見ることができる。つまり、磁性体と金属界面にバンド幅が狭く状態密度が大きい局在状態が存在する場合、低エネルギー領域

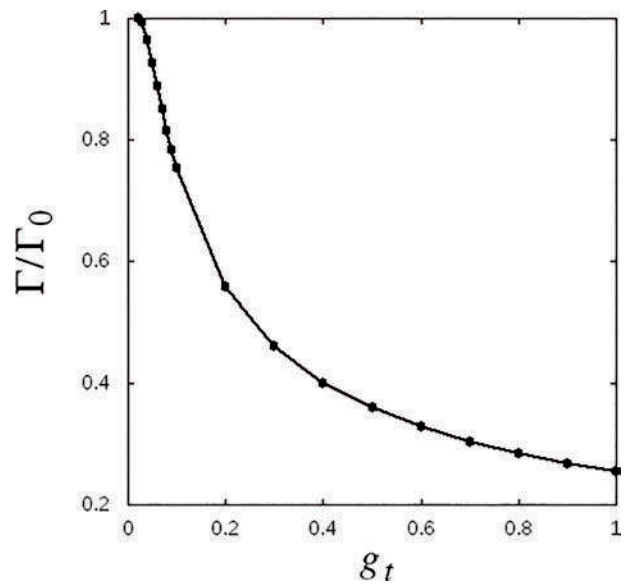


図3 $q=(\pi, \pi), \nu=0.5$ における自己エネルギーの虚部(Γ)の g_t 依存性。二重占有を許す場合、つまり電子相関を含めない場合が、 $g_t=1$ に対応する。

のスピンの励起では、集団励起としての性質を失うことを示唆している。

ここまでは、多層系銅酸化物を例に、磁性体と金属の接合における磁気励起をみてきた。最後に、関連する例を考察する。現在のスピントロニクスは、スピン流を基軸として発展しており、強磁性体のみならずフェリ磁性体や反強磁性体も重要な材料として期待が高まっている[6]。その一つの例がスピンゼーベック効果である。スピンゼーベック効果は、強磁性体と金属の単純な積層構造に温度勾配を与えると電位差が生じる物理現象である。単純な積層構造で熱電変換が可能になるため廃熱利用への応用が期待されている。この現象が実用化されるために、高効率なスピン流生成が必要条件の一つとして挙げられる。本稿で延べてきた研究のもう一つの動機がここにある。スピンゼーベック効果の磁場や温度依存性を定量的に評価する上で、磁性体および金属中の緩和現象の考察が重要なのである[7,8]。本稿で考察した状況は、界面の乱れを減らすことの重要性を示唆していると見ることも出来る。また、スピンホール効果は、現在のスピントロニクスにおいて不可欠な物理現象の一つだ。この現象は、多極子を通じたs波とp波など異なる対称性の波動関数の干渉効果と見る

ことが出来る[9]。多極子であるが故に起こるスピンを基軸とした現象である。多極子の世界は広大だ。

[1] H. Mukuda, S. Shimizu, A. Iyo, and Y. Kitaoka, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 011008 (2012).

[2] M. Fujita, H. Hiraka, M. Matuda, M. Matsuura, J. M. Tranquada, S. Wakimoto, G. Xu, and K. Yamada, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 011007 (2012).

[3] Kentaro Sato, Thesis(doctor), Tohoku University, (2016).

[4] M. Mori, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 124705 (2017).

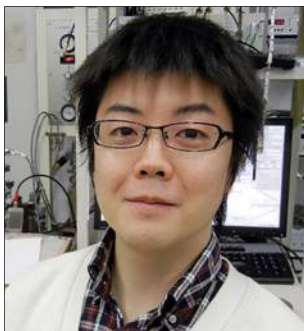
[5] gt依存性を見るために、ここだけホール濃度に依らない独立変数として扱う。

[6] J. Sinova and T. Jungwirth, *Physics Today*, **70**, 38 (2017).

[7] H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, and S. Maekawa, *Phys. Rev. B* **83**, 094410 (2011).

[8] T. Kikkawa, K. Uchida, S. Daimon, Z. Qui, Y. Shiomi, and E. Saitoh, *Phys. Rev. B* **92**, 064413 (2015).

[9] Z. Xu, B. Gu, M. Mori, T. Ziman, and S. Maekawa, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 017202 (2015).



高精度 ^{29}Si ナイトシフト測定で明らかになった URu_2Si_2 におけるスピン磁化率の強い異方性

服部 泰佑

原子力機構 先端基礎研究センター (JAEA ASRC) 研究員

酒井 宏典

JAEA ASRC

徳永 陽

JAEA ASRC

神戸 振作

JAEA ASRC

松田 達磨†

JAEA ASRC

芳賀 芳範

JAEA ASRC

ほとんどの非従来型超伝導は、磁気秩序や軌道秩序など、何かしらの“秩序状態”の近傍で現れます。他の秩序との関係という点からみると、高次多極子秩序ではないか、と議論されているものの、未だ確定的ではない所謂“隠れた秩序”の下で生じる超伝導はとても興味深い研究対象です。 URu_2Si_2 に静水圧力を加えると、隠れた秩序は反強磁性秩序へと転移しますが、超伝導は反強磁性領域で現れず、隠れた秩序相内でのみ現れます[1]。まるで隠れた秩序に守られているかのような超伝導を調べることで、超伝導の新しい側面が見られないか、またそこから隠れた秩序についても何か言及できるのではないかと、といった視点から ^{29}Si NMRを用いた URu_2Si_2 の研究を進めました。

今回はナイトシフトの結果を紹介します。ナイトシフトは電子の磁化率に比例し、マイスナー効果を示す超伝導状態においても微視的に電子磁化率を測定できる点が強みです。実際、多くの非従来型超伝導研究においてスピン対称性を決定する手法として用いられてきました[2]。 URu_2Si_2 については、過去に超伝導状態のNMRが行われていましたが、粉末試料の広い線幅に起因し、十分な精度でのスピン対称性決定には至っていません[3]。一方、巨視的な測定では、低温で臨界磁場が抑制され[4]、一次転移的振る舞いを示す[5]ため、パウリ常磁性効果が大きいスピナー重項超伝導と考えられていました。すなわち、本研究第一の主眼は対形成に伴うスピン磁化率減少

を直接的に観測し、スピナー重項超伝導である微視的証拠を提示することです。

高精度NMR測定を超伝導状態において実現するため、NMR可能な核である ^{29}Si 同位体を約50%まで濃縮した純良単結晶試料を新たに合成しました。加えて、感度が最大となるようNMRのセッティングを行い、注意深く磁場方向を制御した上で50 mKまで測定可能な ^3He - ^4He 希釈冷凍機を用いてNMR測定を行いました。その結果、非常にシャープなNMRスペクトルを得ることに成功し、過去最高の解像度で超伝導状態におけるナイトシフトを測定することに成功しました。試料の純良性及び高解像度測定についての詳細は、先に掲載された原著論文[6]を参照下さい。

超伝導状態におけるナイトシフトの温度依存性を図1, 2に示します。それぞれ、磁化容易軸であるc軸方向 (K^c 図 1 [7])、および磁化困難軸であるa軸方向 (K^a 図 2 [6]) の結果で、いずれも超伝導転移温度 ($T_{\text{sc}} \sim 1.5 \text{ K}$) における値からのズレ $\Delta K = K(T) - K(T = T_{\text{sc}})$ で表示しています。高解像度の測定でも一切の変化を捉えることができなかった K^a とは対照的に、 K^c は超伝導転移温度以下で明瞭に減少することが分かります。 K^c の減少は、超伝導対形成にともなう電子磁化率の消滅を意味するものであり、スピナー重項超伝導を実証するものと考えられます。事実、本系でスピナー重項超伝導が形成された場合に期待されるナイトシフト減少量[2]及び、カイラルd波の

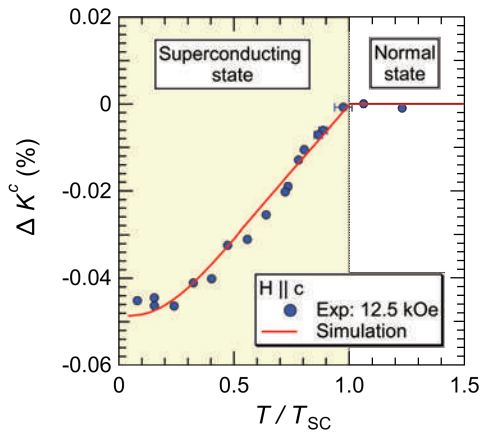


図1. 容易軸方向に対する ^{29}Si ナイトシフトの温度依存性。実線はシミュレーション。横軸は約1.5Kの超伝導転移温度 T_{sc} でスケールしている[7]。

超伝導ギャップ異方性を用いたシミュレーション（図1実線）は、実験結果をよく説明できています。しかし、スピン重項超伝導の場合、磁化率のスピン成分は磁場方向に依らず消滅するはずで、スピン磁化率に比例するナイトシフトは全軸方向に対して減少する必要があります。すなわち、 K^a の減少が観測されなかったのは、磁化困難軸のスピン磁化率が実験で観測できる限界値を超えて小さかったことを意味します。約0.05%の減少が確認された K^c に対して、 K^a の変化は測定限界である約0.002%以下のため、少なくとも25倍以上のスピン異方性が必要になります。強いスピン異方性は臨界磁場の異方性[4]や非線形

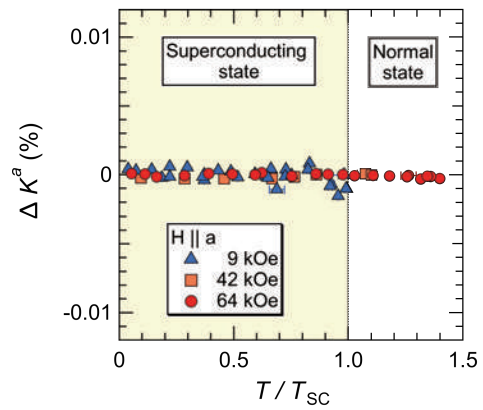


図2. 磁化困難軸方向に対する ^{29}Si ナイトシフトの温度依存性。臨界磁場 $H_{c2}^a \sim 130$ kOeに対して半分以下の磁場で測定している[6]。

磁化率の角度依存性[8]から示唆されているものとも合致しており、ナイトシフト測定は隠れた秩序下におけるスピン磁化率の強い1軸異方性を直接的に実証したものとと言えます。このようなスピン異方性が隠れた秩序に起因し生じるものなのか、あるいは高温から存在し、隠れた秩序のトリガーとなるものなのか、また、非従来型超伝導の起源とはどのように関係しているのか、疑問は尽きません。今後、隠れた秩序が消失し、超伝導も見られない圧力下での測定を進め、電子状態を比較することで、より深い研究を進めていく予定です。

† Present address: 首都大学東京理学部物理学科

- [1] See, for example, J. A. Mydosh and P. M. Oppeneer, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1301 (2011).
- [2] H. Tou *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **74**, 1245 (2005).
- [3] Y. Kohori, K. Matsuda and T. Kohara, *J. Phys. Soc. Jpn.* **65**, 1083 (1996).
- [4] J. Brison *et al.*, *Physica C* **250**, 128 (1995).
- [5] Y. Kasahara *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 116402 (2007), R. Okazaki *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 037004 (2008).
- [6] T. Hattori *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 073711 (2016).
- [7] T. Hattori *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 027001 (2018).
- [8] M. M. Altarawneh *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 066407 (2012). J. Trinh *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 157201 (2016).



Spin-split Fermi surfaces and heavy electronic states in $U_3Ni_3Sn_4$

Arvind Maurya

Institute for Materials Research, Tohoku University, Japan

<p>Hisatomo Harima Kobe University</p>	<p>Ai Nakamura Tohoku University</p>	<p>Yusei Shimizu Tohoku University</p>	<p>Yoshiya Homma Tohoku University</p>
<p>DeXin Li Tohoku University</p>	<p>Yoshiki J. Sato Tohoku University</p>	<p>Fuminori Honda Tohoku University</p>	<p>Dai Aoki Tohoku University</p>

In a crystal with time reversal symmetry, breaking or lack of space inversion symmetry in general the energy bands split, otherwise spin-degenerate electronic states are formed. The strength of this splitting is primarily governed by the antisymmetric spin orbit coupling. The spin splitting has been explored in several itinerant, albeit uncorrelated electron systems by de Haas-van Alphen effect [1,2]. However, such a scenario in uranium systems is scarce. We have observed the spin split Fermi surfaces in the non-centrosymmetric compound $U_3Ni_3Sn_4$ [3].

$U_3Ni_3Sn_4$ crystallizes in a cubic non-centrosymmetric space group ($\bar{4}3d, T_d^2$). The Sommerfeld coefficient derived from the low temperature specific heat capacity is 95 mJ/mol-U K^2 , classifying $U_3Ni_3Sn_4$ as a moderate heavy fermion system [4-8]. $U_3Ni_3Sn_4$ does not exhibit a magnetic order or superconductivity down to 130 mK, but is most likely located to the proximity of antiferromagnetic order. Single crystals of $U_3Ni_3Sn_4$ grown in the actinide laboratory located

at Oarai by the Bridgman method shows a large residual resistivity ratio (~ 300) and low residual resistivity ($1.3 \mu\Omega\cdot\text{cm}$). The good quality of the crystals enabled us to probe the Fermi surface properties of $U_3Ni_3Sn_4$ by the de Haas-van Alphen (dHvA) effect. The origin of dHvA effect is the quantized orbital motion of conduction electrons in magnetic field. However, scattering processes due to defects and broadening of Landau levels at finite temperatures often limit the appearance of the quantum oscillations, hence growing a good quality single crystal is the first and one of the most crucial task to explore the Fermi surface properties by the dHvA effect. Additionally, the paramagnetic nature of $U_3Ni_3Sn_4$ simplifies the analysis of the dHvA oscillations as Fermi surface of a magnetic system is more complicated due to zone folding imposed by the magnetic ordering.

The frequency of dHvA oscillations (F) is related to the extremal cross-section area of the Fermi surface (S) by the Onsager's relation $F = \frac{\hbar c}{2\pi e} S$. This enables

[1] T. Kawai, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 113705 (2008).

[2] A. Nakamura, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 113705 (2013).

[3] A. Maurya, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 4044703 (2018).

[4] T. Endstra, *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **89**, L273 (1990).

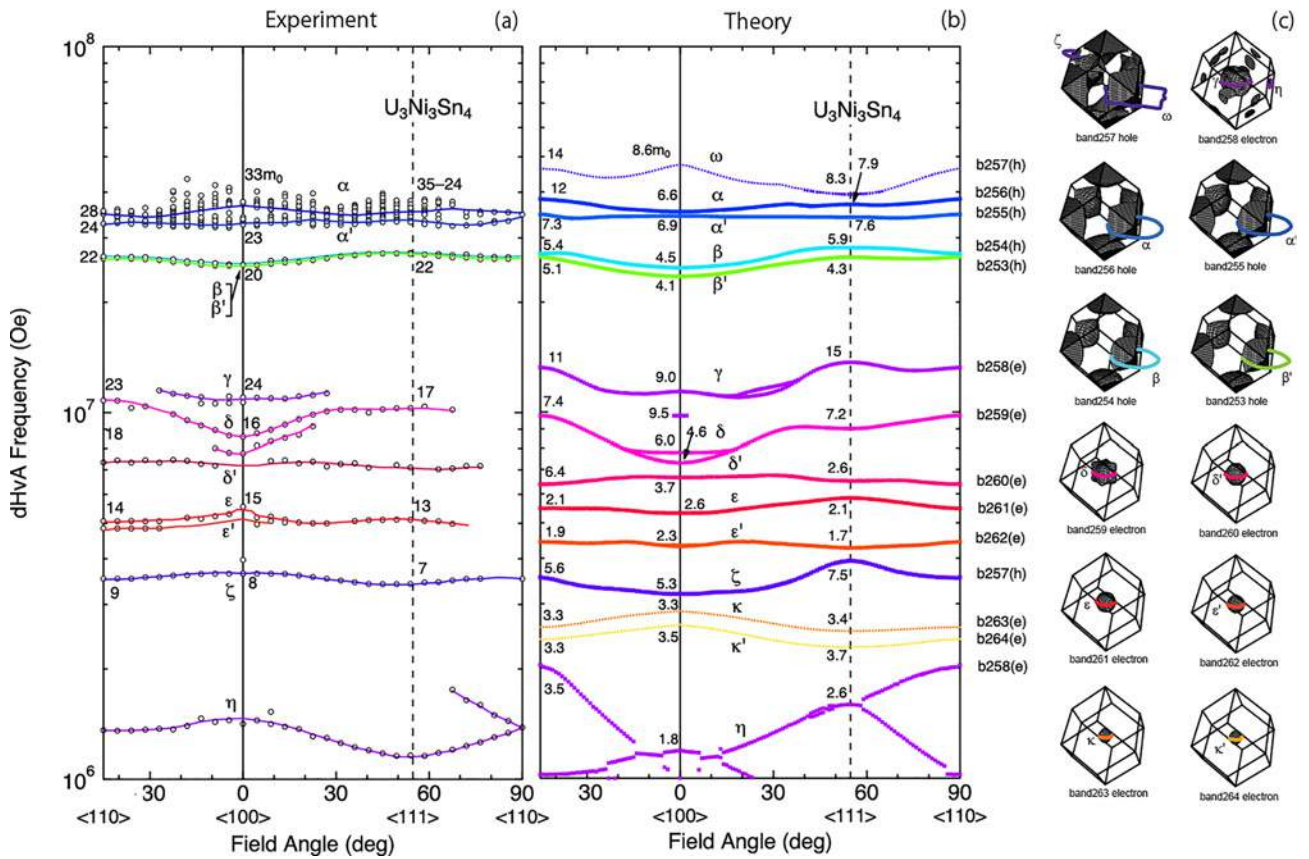


Figure 1 (a) Experimental and (b) theoretical angle dependence of dHvA frequencies in $U_3Ni_3Sn_4$. (c) Calculated Fermi surfaces of $U_3Ni_3Sn_4$. Cyclotron orbits contributing to the dHvA effect are also shown.

one to map the three dimensional topology of Fermi surfaces by measuring angle dependence of dHvA frequencies. However, location of the Fermi surface pockets in the Brillouin zone and their character (electron or hole) is established only after combining the results from theoretical electronic structure calculations. Prof. Harima's band structure calculations for $U_3Ni_3Sn_4$ utilizing local density approximation (LDA) and considering U-5f electrons as itinerant reveals 12 bands crossing the Fermi energy (see Fig. 1(c) for the associated Fermi surfaces). The multitude of the Fermi surfaces in $U_3Ni_3Sn_4$ is due to the splitting of the bands by antisymmetric spin orbit coupling introduced by the

absence of an inversion center in $U_3Ni_3Sn_4$. The angular dependence of dHvA frequencies is a characteristic of many closed Fermi surfaces with nearly spherical shape, consistent with the band structure calculations. From Fig. 1(a) and 1(b), one can readily observe that there is a good agreement between the theory and the experiment. Some of the frequencies predicted by the band structure calculations are not detected possibly because of their heavy cyclotron mass. The cyclotron effective masses, m_c^* vary between 7-35 m_0 , which are enhanced by a factor of 1-6 times that of the band masses. Here, m_0 is the rest mass of an electron. This enhancement of cyclotron effective mass is

[5] T. Takabatake, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **59**, 4412 (1990).
 [6] T. Takabatake, *et al.*, Physica B **165-166**, 437 (1990).
 [7] L. Shlyk, *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **11**, 3525 (1999).
 [8] L. Shlyk, *et al.*, Physica B **292**, 89 (2000).

consistent with the increased Sommerfeld coefficient (95 mJ/U-mol.K²) observed in the low temperature heat capacity. According to the LDA band calculations, the density of states near the Fermi surface is mainly contributed by the U-5*f* electrons.

On comparing the angle dependence of the experimental dHvA frequencies to the calculated ones with the band structure calculations, one can clearly identify spin split Fermi surfaces, namely (α , α'), (β , β'), and (δ , δ'). The largest pair of spin split Fermi surfaces (α , α') exhibit magnetic breakdown effect evident from the appearance of multiple peaks in the dHvA spectrum in the high frequency regime.

The magnitude of the splitting energy ($\Delta\varepsilon$) is related to the difference in dHvA frequencies of spin split branches (ΔF) by $\Delta\varepsilon = \frac{\hbar e}{mc} \Delta F$.

In U₃Ni₃Sn₄, we estimate the splitting energies to be 23 K and 24 K for branches (α , α') along $\langle 100 \rangle$ and (δ , δ') along $\langle 110 \rangle$, respectively using the experimentally observed ΔF and the cyclotron effective masses. Note that $\Delta\varepsilon$ is inversely proportional to the effective mass. By using the effective masses derived from the band structure calculations, corresponding $\Delta\varepsilon$ values of 100 K and 68 K are obtained. These values are noticeably smaller than those reported previously for other compounds [1, 2]. This is most likely due to the heavy quasiparticles and multiple 5*f*-bands crossing the Fermi energy. Nevertheless, U₃Ni₃Sn₄ is the first instance when the spin splitting has been observed

clearly in a 5*f*-electron system.

From the field dependence of the amplitude of dHvA oscillations, Dingle temperatures of 0.1 K is deduced, which correspond to mean free paths up to 1950 Å, further indicating a good quality of the U₃Ni₃Sn₄ single crystal.

I would like to thank J-Physics for supporting my stay in Japan to complete this work.



Evidence of a New Current-Induced Magnetoelectric Effect in a Toroidal Magnetic Ordered State of UNi₄B

齋藤 開

高エネルギー加速器研究機構 博士研究員

網塚 浩

北海道大学理学部

柳澤 達也

北海道大学理学部

日高 宏之

北海道大学理学部

金属反強磁性体UNi₄Bにおける電流による磁化誘起現象の観測を報告した拙著論文が、Journal of the Physical Society of Japanにおいて、2018年2月期の注目論文(Editor's Choice)に選出された。本稿ではその論文を簡単に紹介する。

本研究の大本の主題は、J-Physicsプロジェクトの主要テーマの一つである拡張多極子とそれが導く新奇な物性に関する理論提案を、実験的に検証することである。拡張多極子のなんたるかは、ニュースレターの既刊も含め各所で読むことができるので、ここではいくつか参考文献[1-4]を挙げるにとどめたい。私たちが本研究を進めるきっかけとなったのは、ハニカム構造

が積層した系において、磁気トロイダルモーメント \mathbf{t} の強的な秩序が基底となりうることを示した速水先生らの理論提案[5]である。この論文では、磁気イオンサイトで局所的に空間反転対称性の破れた系において、磁気秩序が生じることで奇べきの多極子である \mathbf{t} が現れること、 \mathbf{t} の強的な秩序下では波数 \mathbf{q} に非対称なエネルギー分散の変形、電気磁気効果(以下、ME効果)、磁気光学効果などが生じること、UNi₄Bが現実の候補物質であることが示されている。

UNi₄Bの結晶構造はかつては六方晶($P6/mmm$)であると信じられていたが、最近のX線構造解析[6]により直方晶($Cmcm$, D_{2h}^{17} , No. 63)であることが明らかになった。この構造ではUが僅かに歪んだ三角格子

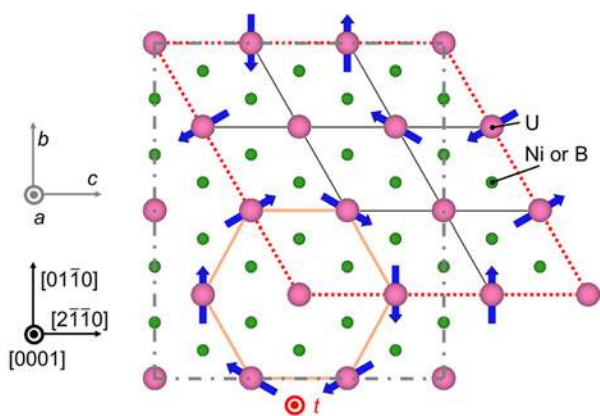


図1 UNi₄Bの結晶構造。Uを含む層のみを切り出した。灰色実線(一点鎖線)で囲まれたセルが六方晶(直方晶)の単位胞子。破線は六方晶の磁気単位胞子。橙実線は \mathbf{t} を構成するUを結んでいる。直方晶結晶軸を英字で示している。

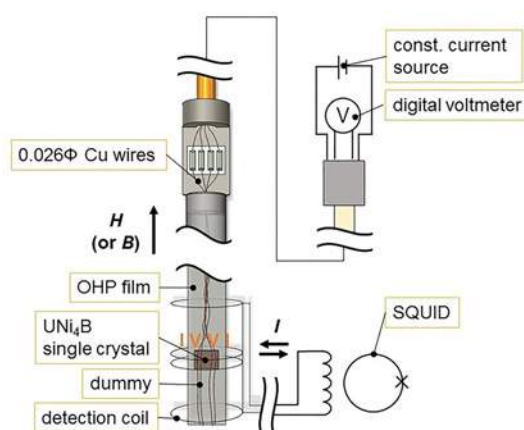


図2 測定系の概略。V端子は短絡がないことを確認するためのみに使用した。

[1] S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, *Kotaibuturi* **50**, 217 (2015).

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

[3] M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, and R. Arita, *Phys. Rev. B* **95**, 094406 (2017).

[4] 楠瀬博明, *NEWS LETTER J-Physics* **#2**, 04 (2016).

を構成する(図1参照)。実験室レベルの背面反射Laue写真だと、この直方晶と六方晶とを見分けるのは難しい。そこで、簡単のため以降は系が六方晶であるものとして扱う。UNi₄Bは $T_N = 20.4$ Kで反強磁性(AF)秩序を示す。 T_N 以下ではハニカムをなす2/3のUが持つモーメントが、渦上の磁気構造をとることが中性子弾性散乱により示されている[7]。この磁気モーメントの配列は t が[0001]を向いて強的に整列しているとみなせる。 T_N で秩序しなかった残りの1/3のUは $T^* = 0.3$ Kでのもう一つの秩序に寄与していると報告されている[8]。

電流下の磁化測定には磁気特性測定装置MPMS

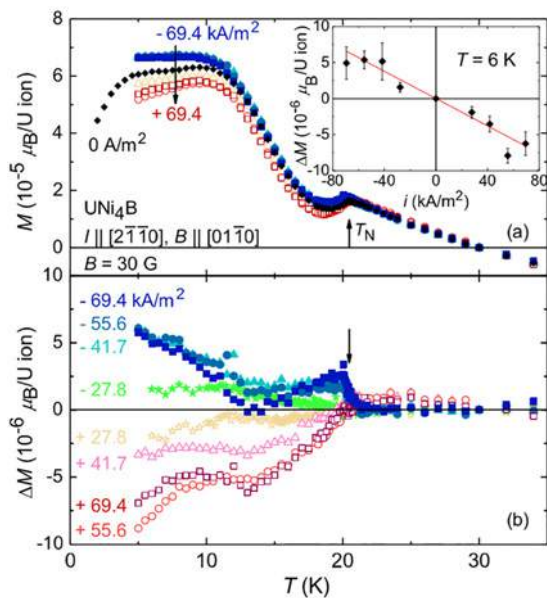


図3 (a) 磁化 M と、(b) 電流による変化分 ΔM の温度変化。内挿図は ΔM の $T = 6$ K での電流密度 i 依存。 $I \parallel [2\bar{1}\bar{1}0]$, $B \parallel [01\bar{1}0]$, $B = 30$ G。

を用いた。プローブ上端を切り落とし銅線とマンガン線を導入することで電流印加のほか電気抵抗の測定も可能にしている。プローブ下端にはターミナルを用意し、試料までは $\Phi 0.026$ の銅線を用いた(図2)。これは試料以外の磁化成分を極力抑えるためである。また、試料との導通は銀ペーストで得た。配線は極力撚線にし、回路面積を小さくすることで誘導磁場を低減した。解析の際にもこの誘導磁場の影響を抑えるため、生データを適当な温度からの相対変化に直した。詳細は論文を参照されたい。今回は30 Kを基準として取ったため、以下に示す磁化は特記のない限り30 Kからの相対変化となっている。測定には10年以上前にCzochralski法により育成された単結晶試料を、放電加工により整形して用いた。

まず、電流 $I \parallel [2\bar{1}\bar{1}0]$ 、磁化及び磁場 $B \parallel [01\bar{1}0]$ の結果を紹介しよう(図3)。理論によれば電流による磁

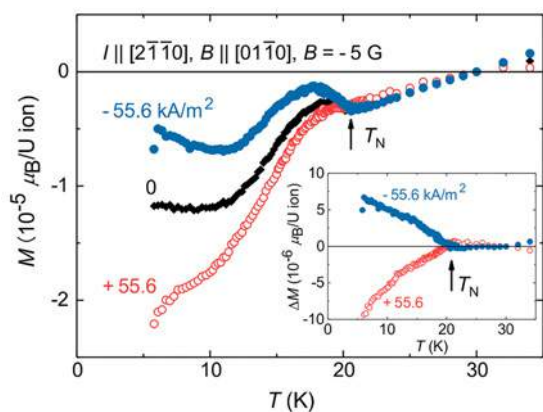


図4 M の温度変化。 $I \parallel [2\bar{1}\bar{1}0]$, $B \parallel [01\bar{1}0]$, $B = -5$ G。内挿図は ΔM の温度変化。

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

[6] Y. Haga, A. Oyamada, T.D. Matsuda, S. Ikeda, and Y. Onuki, Physica B **403**, 900 (2008).

[7] J.A. Mydosh, G.J. Nieuwenhuys, S.A.M. Mentink, and A.A. Menovsky, Philos. Mag. B **65**, 1343 (1992).

[8] R. Movshovich, M. Jaime, S. Mentink, A. A. Menovsky, and J. A. Mydosh, Phys. Rev. Lett. **83**, 2065 (1999).

化誘起に磁場は不要であるが、磁場ゼロでは磁化測定自体が困難となるため30 Gの磁場を印加している。図3(a)には磁化の30 Kからの相対変化 M を、図3(b)は M の電流による変化分 ΔM を示している。ここで、 $\Delta M = M(I, T) - M(0 \text{ mA}, T)$ である。ここから、(ア)電流による磁化変化が T_N 以下で生じていること、それが(イ)電流依存すること及び電流反転で符号反転すること、(ウ) ΔM の絶対値は降温につれ増大することがわかる。また、 ΔM の6 Kのデータを抜き出して電流密度 i 依存に直すと(図3(a)内挿図)、(エ)電流による磁化変化が精度内でおおよそ電流密度 i に比例していることがわかる。 ΔM が T_N 付近で跳ねたり、 T_N 以下でうねっているのは、電流印加による試料の発熱が原因である。これも詳細は論文を参照していただきたい。

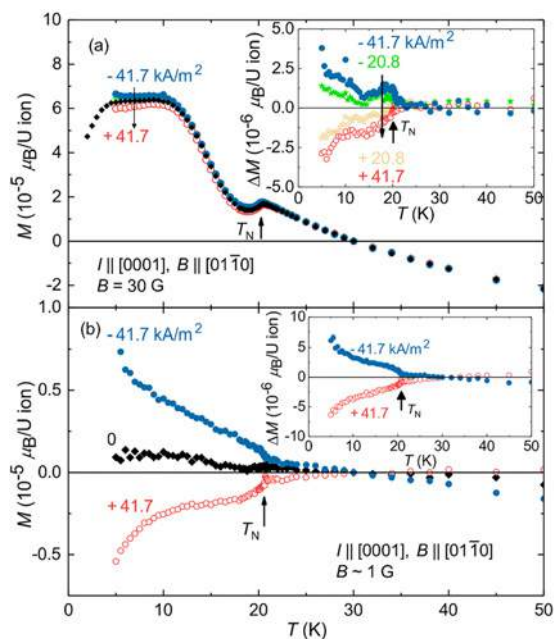


図5 M の温度変化。 $I \parallel [0001]$, $B \parallel [01\bar{1}0]$, $B =$ (a) 30, (b) 1 G。内挿図はそれぞれの ΔM の温度変化。

さらに、同じ電流・磁場配置で磁場を-5 Gに反転させた結果が図4である。磁場の反転に伴い通常の磁化成分は符号反転しているが、電流依存は変わらず負(正)の電流で磁化が増大(抑制)されている。このことは、(オ)電流による磁化変化が磁場に依存しないことを示している。以上の(ア)～(オ)のふるまいは、速水らの理論予測と質的に整合するため、私たちは UNi_4B における T_N 以下での電流による磁化変化を、電流誘起の磁化現象であると結論した。

一方で、電流方向が t に平行になると期待し、 $I \parallel [0001]$ とした測定では、理論による説明が単純には難しい結果を得た。図5は $I \parallel [0001]$, $B \parallel [01\bar{1}0]$ の配置で、 $B = 30, 1 \text{ G}$ において測定した磁化 M の温度変化である。こちらでも T_N 以下で電流による磁化の変化が観測された。また、その振る舞い、および変化量は $I \parallel [2\bar{1}\bar{1}0]$ の際と似たものとなっている。理論[6]によれば t に平行な電流によつては t の増大・抑制のみが生じ、磁場0では磁化が変化することはない。ただし、 t の変化は概ね反強磁性モーメントの変化を意味するので、帯磁率が変化することは考えられる。しかし、その場合は ΔM は磁場依存を持ち、磁場ゼロで ΔM が0となる。私たちのデータを見ると、 $B = 1 \text{ G}$ においても ΔM が有意に残っており(図5(b))、 t が $[0001]$ を向いているとすると説明ができない。したがって、この実験結果はなんらかの理由で $[0001]$ の電流によつても $[01\bar{1}0]$ に磁化が誘起されたと考えるのが妥当である。

ここまでデータを見て誰もが考えるのは、これが測定系などに由来する非本質な現象ではないのか、ということだろう。しかし、試料に非本質な現象であれ

ば、 T_N を境とした変化となる蓋然性が無い。では、この現象の原因を誘導磁場に求めるとどうだろうか。定電流での測定であるため、誘導磁場は回路形状にのみ依存するはずである。回路にはUNi₄Bを含むため、 T_N を境とした変化は生じうる。しかし、UNi₄Bの試料長の変化は50 K以下で $\sim 10^{-6}$ K⁻¹程度と小さく、 T_N 以下の ΔM の変化を説明できるほどの回路の変形を引き起こすとは考えにくい。その他の非本質な起源も検討したが同様に説明は困難で、UNi₄Bにおける電流誘起磁化は系に本質的な現象と考えられる。

では本質的な現象であることは認めるとして、表面の寄与である可能性はないのだろうか。一般に、物質の表面は組成や構造に依らずラッシュバ型のスピン軌道相互作用が有限にあり、磁気秩序に伴い電気磁気的にアクティブになりうる。幸いにも、UNi₄Bの場合は表面の寄与は概ね否定できる。UNi₄Bは空气中でゆっくりと酸化し、黒色膜を表面に形成する。私たちは同一試料において ~ 0.03 mm未満の酸化膜の有無で電流下磁化を比較したが、有意な変化は見られなかった。酸化膜は表面の積層を大きく変えるため、表面由来のME効果は、表面酸化によりその強度が変化するだろう。つまり、この結果はUNi₄Bにおける電流誘起磁化の原因を表面に求めるのが難しいことを示している。

それでは、なぜ電流誘起磁化の異方性が理論と異なるのだろうか。可能性はいくつか考えられるが、最も重要なのはUNi₄Bが自発的に持つ t が[0001]を向

いていない可能性である。過去の報告をよく読むと実はUNi₄Bの磁気構造は六方晶の結晶構造をもとに決められており、解析の収束度を示すR因子も10%を下回っていない。その後に結晶構造が直方晶であることが明らかになっていることも鑑みれば、渦状の磁気構造が本当に実現しているかはやや疑問が残る。 t の向きは磁気イオンサイトでの局所的な結晶場と磁気モーメント配置により決まる。したがって、([0001]を向いて強的に整列していると考えていた) UNi₄Bが自発的に持つ t は、現状ではどちらを向いているのか、強的に並んでいるのかも確かには言えない、という方が誠実だろう。つまり、私たちの実験結果は理論と整合しないとは言えず、異方性について十分な議論ができる状況にない、となると考えている。

現状を打開すべく、最近私たちはUNi₄Bの結晶構造・磁気構造の再測定を進めている。前者はKEK PFの田端さんにより測定が行われ、直方晶であるとす芳賀先生の報告[6]と整合する結果が既に示されている[9]。後者については現在、チェコ・カレル大学、ドイツ・ブラウンシュヴァイク工科大学、北海道大学の3国連携研究として少しずつ進められている[10]。

最後に、ほかの反強磁性金属化合物における、電流下磁化測定の結果を一部紹介したい。CeRh₂Si₂の結晶構造はThCr₂Si₂型正方晶($I4/mmm$, D_{4h}^{17} , No.139)である。この構造はCe位置に空間反転中心

[9] 田端千紘, 佐賀山基, 齋藤開, 中尾裕則, 網塚浩, 日本物理学会2018年秋季大会 11pB202-12など。

[10] 特に単結晶育成については、齋藤開, 博士学位論文 (2018)。

[11] S. Kawarazaki, M. Sato, Y. Miyako, N. Chigusa, K. Watanabe, N. Metoki, Y. Koike, and M. Nishi, Phys. Rev. B **61**, 4167 (2000).

があるという特徴を持つ。CeRh₂Si₂は $T_{N1} = 36$ K, $T_{N2} = 24$ Kで逐次のAF秩序を示す。各相ではCeの磁気モーメントがc軸を向き、磁気構造はそれぞれ、波数 $\mathbf{q} = (1/2, 1/2, 0)$ と $(1/2, 1/2, 0) + (1/2, 1/2, 1/2)$ で特徴づけられる[11]。この二つの磁気構造はともに系の空間反転対称性を破らないため、空間反転対称性の破れを要請するME効果は観測されないと期待されていた。しかしながら、本系の電流下磁化を測定すると、a軸に電流を印加し、c軸磁化を測定した場合のみ、電流による磁化誘起が T_{N1} と T_{N2} の間でのみ観測された(図6左)。

近藤半導体として知られるCeRu₂Al₁₀は直方晶 ($Cmcm$, D_{2h}^{17} , No. 63)の結晶構造を持つ。この構造ではCeがジグザグ鎖を組んでいる。 $T_0 = 27$ K以下の

AF秩序相は、Ceの磁気モーメントがc軸を向き、 $\mathbf{q} = (0, 1, 0)$ で特徴づけられる[12]。この磁気構造によってはRuサイトの空間反転中心が破られない。そのため、この系においても電流誘起磁化は観測されないと期待されたが、いくつかの電流・磁場配置で電流印加により磁化誘起が観測された(図6右)。これらの結果は、空間反転対称性が保たれている系で、ME効果が観測されたという点で非常に興味深い。また、電流誘起磁化が T_{N1} 、 T_0 で現れ、 T_{N2} で消えることから、UNi₄Bも含めこれらの系で観測されたME効果が、AF秩序及びその磁気構造と結びついたものであることが明らかとなった。

ここまで、UNi₄Bにおける電流誘起磁化現象についての論文と、加えてCeRh₂Si₂、CeRu₂Al₁₀における

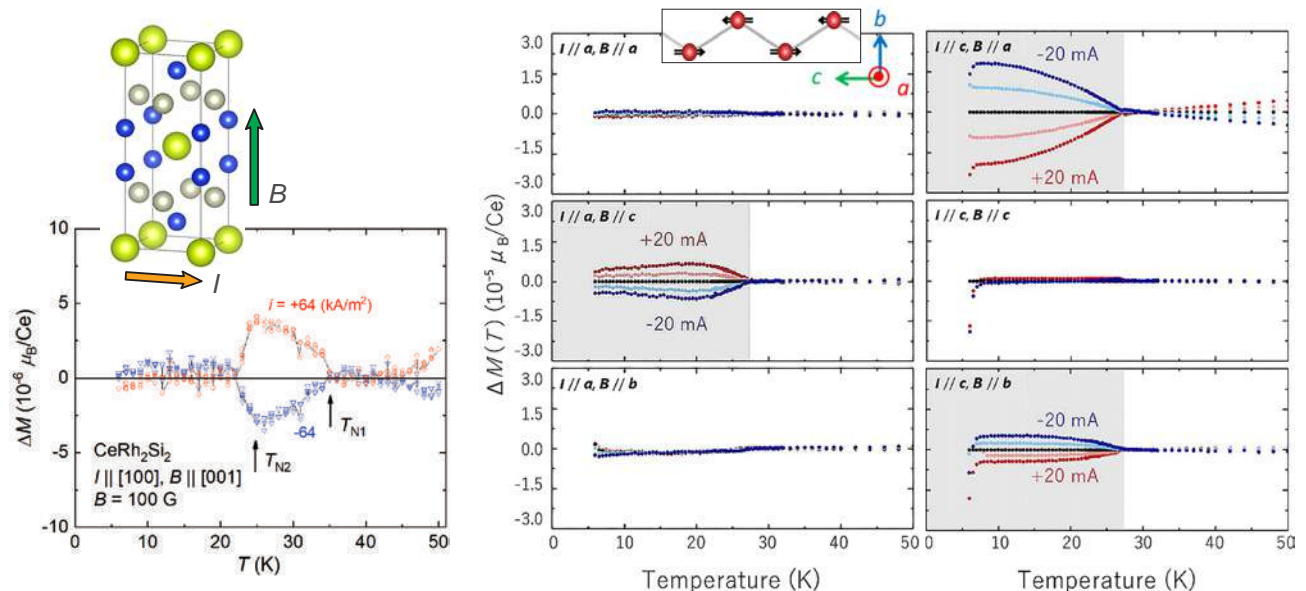


図6 (左)CeRh₂Si₂と(右)CeRu₂Al₁₀の電流による磁化の誘起分 ΔM の温度変化。どちらも、AF転移温度より高温の40 Kからの相対変化となっている。結晶構造を内挿して示した。CeRu₂Al₁₀についてはCeの1次元鎖のみを取り出している。

[12] D.D. Khalyavin, A.D. Hillier, D.T. Adroja, A.M. Strydom, P. Manuel, L.C. Chapon, P. Peratheepan, K. Knight, P. Deen, C. Ritter, Y. Muro, and T. Takabatake, Phys. Rev. B **82**, 100405R (2010).

最近の成果を紹介した。これらの観測事実から言えることは、まず第一に金属反強磁性体でのME効果を予測した速水らの理論は本質的には正しい、ということである。また、 CeRh_2Si_2 と $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ における電流誘起磁化の観測されたことは、多くの磁性体がME効果の舞台となる可能性を持つことを示唆している。空間反転対称性が保たれた系でのME効果の起源としては、磁気・結晶構造が過去の報告より対称性が低い構造であること、低対称位置のCe配位子イオンが秩序に伴い磁気分極を持つこと、もしくはそれらが電流印加により引き起こされることなどが考えられる。

誠実に言えば、理論の検証はまだ一步目を踏み出した段階である。今後、実験的にはより単純な構造の系など対称物質を探索し、電気磁気効果の有無を問わず観測例を増やす必要がある。また、磁化以外のプローブを用いた多面的な検証も不可欠で、最近是非弾性中性子が使えないか検討中である。UNi₄Bについては、異方性についての議論を進めるため、実験室レベルで直方晶結晶軸を同定する方法を見つける必要がある。

本研究は筆者が網塚研究室に所属し、修士・博士課程に行った内容です。研究を進めるにあたっては、共著の網塚先生、柳澤先生、日高先生、田端さん、三浦さん、上西君のほか、後輩諸氏にも助力していただきました。特に、 $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ は2017年度で修士を修了した鹿内さんの成果です。 $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ 単結晶試料は谷田先生、松村先生、世良先生に提供していただきました。また、速水先生、楠瀬先生、求先生、

播磨先生には頻繁に相談に乗っていただきました。本研究に関わる皆様へこの場を借りて改めて感謝申し上げます。



相関を持つランダムネスが誘起する スピンスパイラル秩序

品岡 寛

埼玉大学大学院 理工学研究科 助教

近年、スピンスパイラル状態を保つ絶縁物質は、マルチフェロイック物質を実現できることから注目を浴びている。このような絶縁物質の多くでは、スパイラル秩序は最近接相互作用と次近接相互作用の競合など、異なる距離に働く磁気相互作用の競合から生じている。一方、このようなマルチフェロイック物質を実用に供することを考えると、高い転移温度を保ち、物性が制御可能な方法が求められる。しかし、このような競合する磁気相互作用が共に室温程度の大きな値を持つことは少ない。このことは、スピンスパイラル転移温度を向上することに制限を与えている。本稿では、「フラストレーションがない磁性体」にある種の局所的フラストレーションを導入することで、スピンスパイラル状態を誘起・制御できることを紹介したい [1,2]。煩雑さを避けるため、レファレンスは最小限に留めるため、興味がある方は原論文を参照していただきたい。

YBaCuFeO₅は、図1に示すような擬2次元状の構造を持つ磁性物質である。本物質は440 K程度で反強磁性転移を示す。さらに温度を下げていくと、ある温度 T_{spi} にて磁気秩序に対応する波数ベクトルがはん強磁性(1/2, 1/2, 1/2)から(1/2, 1/2, 1/2-Q)へのズレ始めることで、スピンスパイラル転移が起こる。この物質で最も奇妙な点は、この T_{spi} が結晶の育成条件に依存して180 Kから310 Kの間で変わることである [3,4]。

この振る舞いは実は直感に反するのだが、そこを詳しく議論する前に、結晶構造を概観しておこう。それぞれの2重層は、Cu²⁺もしくはFe³⁺ 2個からなるBipyramid構造から構成されている。理想的な結晶

には、Cu²⁺とFe³⁺は等価な割合で含まれている。したがって、bipyramid構造の構成には、Fe³⁺ - Cu²⁺、Cu²⁺ - Fe³⁺、Cu²⁺ - Cu²⁺、Fe³⁺ - Fe³⁺の4つの可能性がある。それらの異なるbipyramid構造の配列は一種の無秩序状態にあると考えられている。

この物質では、 T_{spi} がFe³⁺/Cu²⁺の配列の無秩序さと強く関係があることが知られており、特に無秩序であるほど T_{spi} が高くなることが知られている。つまり、スピンスパイラル秩序という長距離秩序状態がランダムネスによって安定化されているように見えるのである。

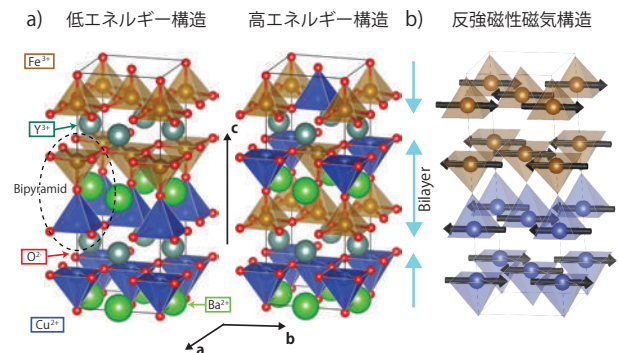


図3 YBaCuFeO₅の結晶構造と高温での反強磁性磁気構造

今回の論文の肝は、この配列にはある種の相関があり、それが局所的なフラストレーション効果を生むということである。我々の研究以前に行われた第一原理計算において、異なるbipyramid構造の配列を持つ格子構造のエネルギーが比較されている[3]。その結果、Fe³⁺ - Cu²⁺のように異なるイオンからなるbipyramid構造が、同種のイオンからなるbipyramid構造に比べて、エネルギー的に非常に安定であるこ

とが分かってる。つまり安定な配置を持つ結晶では、ほとんどのbipyramid構造が前者の構造を持つと考えられる。このような理想的な結晶構造の場合に、第一原理計算から磁気相互作用を見積もると、高温で現れる反強磁性相と整合的であり、磁気的なフラストレーションは存在しない。

では、低温でなにがスピンスパイラル秩序を引き起こしているのだろうか？実は同種のイオンからなるbipyramidが「不純物」として結晶中に存在していることがポイントである。このような不純物はエネルギー的に不安定ではあるが、冷却速度を速くするなど条件を変えることで、その濃度が増加する。

異なるイオンからなるbipyramid内では、磁気イオン間に強い強磁性相互作用が存在する。これが全体としての反強磁性秩序を安定化している。一方、 $Fe^{3+} - Fe^{3+}$ 型のbipyramid内では、その相互作用の符号が逆転しており、その絶対値も非常に大きい。したがって、 $Fe^{3+} - Fe^{3+}$ イオンからなるbipyramid、つまり「不純物」は局所的なフラストレーションを引き起こす。

このような局所的フラストレーションがスピンスパイラル秩序を引き起こしているのだろうか？答えはYesではあるが、単にランダムに導入された局所的フラストレーションはスピングラス転移を誘起してしまうことに注意してもらいたい。本物質では、このようなフラストレーションを引き起こすボンドが、一方向にのみ入っていることが重要である。さらに、本物質ではこの不純物の配置に空間相関があることで、スピングラスではなく、スピンスパイラル秩序が生じている。

種明かしをしよう。 $Fe^{3+} - Fe^{3+}$ 型のbipyramidの

間には、クーロン相互作用による強い斥力が存在しているのである。したがって、異なる層間に存在する「不純物ボンド」は近距離に配置されることはレアであり、互いにある一定の距離以上の間隔を保っていると考えられる。

このような場合に、なぜスピンスパイラル秩序が安定化されるのだろうか？専門的な話は原論文[1,2]に任せるとして、結論だけを直感的に解説したい。図2に示すように、不純物ボンド周りには局所的なスピンスパイル構造が生じる。この簡略図では、c軸に沿って、時計/反時計周りに回転する2つの自由度が局所的に縮退している。この自由度を擬似的なイジング自由度とみなすと、イジングスピン間に双極子相互作用型の有効相互作用が働くことを示すことができる。その符合が磁石と逆なので、c軸と垂直な方向に離れたイジングスピン間に強磁性的な相互作用が働く。元の模型の言葉では、局所的なスピンスパイラル回転の方向が揃い、全系がスピンスパイラル秩序を示すのである。

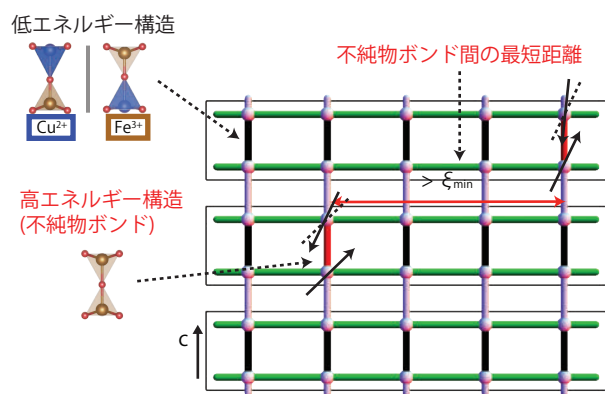


図2 不純物ボンドの空間配置とスピンスパイラル秩序

第一原理計算から古典スピン模型を構築し、モンテカルロ法による計算を行うことで、実際に本物質の相図を再現したデータを図3に示す。不純物ボンドの割合を増やしていくと、低温からスピンスパイラル秩序が現れる。この結果は、本物質で見られる不思議なスピンスパイラル秩序が、ある種の相関を持つ局所的フラストレーション起因であることを示している。

本稿で紹介した新しいスピンスパイラル秩序の機構では、一軸方向に局所的なフラストレーションを引き起こすボンドが入ることがポイントである。そして、そのようなボンドの空間分布に相関があることで、よりスピンスパイラル状態が安定化される。このような機構による新奇なスピンスパイラル状態を示す物質の探索、設計が今後の興味深い方向である。

本稿は、A. Scaramucci, M. V. Mostovoy, M. Müller, C. Mudry, M. Troyer, N. A. Spaldin各氏との共同研究に基づくものです。

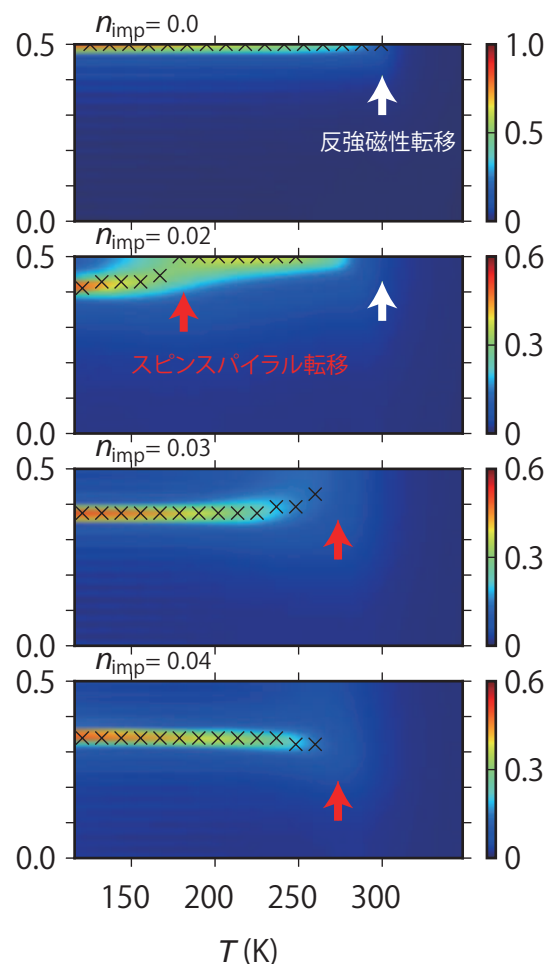


図3 第一原理スピン模型の解析から得たスピン構造因子。縦軸はc軸方向の波数。 n_{imp} は、不純物ボンドの割合。

[1] A. Scaramucci, H. Shinaoka, M. V. Mostovoy, M. Müller, C. Mudry, M. Troyer, N. A. Spaldin, *Phys. Rev. X* **8**, 011005 (2018).
 [2] A. Scaramucci, H. Shinaoka, M. V. Mostovoy, M. Müller, C. Mudry, arXiv:1610.00784.
 [3] M. Morin *et al.*, *PRB* **91**, 064408 (2015).
 [4] B. Kundys *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 072506 (2009); V. Caignaert *et al.*, *J. Solid State Chem.* **114**, 24 (1995); Y. Kawamura *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 073705 (2010); M. J. Ruiz-Aragon *et al.*, *Phys. Rev. B* **58**, 6291 (1998); M. Morin *et al.*, *Nat. Commun.* **7**, 13758 (2016).



層状スズニクタイド： 新しいファンデルワールス型層状超伝導体

後藤 陽介

首都大学東京 助教

水口 佳一

首都大学東京

松田 達磨

首都大学東京

青木 勇二

首都大学東京

2017年4月に首都大学東京の水口研に特任研究員として着任しました。雇用プロジェクトは産業技術総合研究所の李博士が研究代表を務めるCREST「ラットリングとローンペアの融合的活用による熱電材料の開発」でしたが、せっかく水口研（超伝導物質研）に着任したのだから、「熱電材料のみならず超伝導体にもなるような物質を探索しよう」という目論見で研究を開始しました。このようなアプローチはあながち的外れではないと考えており、例えば鉄系超伝導体の母物質LaFeAsOと同じ結晶構造をもつBiCuSeOは熱電材料として無次元性能指数ZTが1.4に達します。また当初は熱電材料として注目された Na_xCoO_2 も、水和物とすることで超伝導体になります。水口らの発見したBiS₂系超伝導体は、電子ドーピング（および結晶構造の最適化）により超伝導が発現しますが、電子ドーピングしない場合には熱電性能指数ZTが0.36を示します。このように、熱電材料・超伝導体のどちらとしても興味深い物性を示す物質群を新しく探索しよう、ということが研究構想です。将来的には、熱電材料と超伝導体の間に横たわる普遍的な学理の構築を目指す、ということさすがに大言壮語という感が否めないのですが、とにかく本稿ではこのような探索の結果得られた層状スズニクタイド（SnPn系）超伝導体について紹介します[1,2]。

まず、水口研はBiS₂系をはじめとしたカルコゲナイドの研究を中心に展開していたため、筆者はカルコゲンではなくニクトゲン（Pn）を扱ってみようと考えました。カチオンはBiではなく、2価のSnに注目しました。例えばSnSeはZT = 2.6を示す高効率熱電材料であり、高圧下での超伝導も報告されていることから、「Sn²⁺は何かよさそうな感じ」がしたのです。実際にSnPn系化合物を調べますと、図1に示すように多くの結晶相が報告されており、共通の特徴として、SnとPnからなるハニカム型構造の層を有することがわかります（Sn₄Pn₃については、Snサイトがハニカム型構造に含まれるサイトとそうでないサイトがありますので、色を分けて示してあります）。また、このSnPn層がファンデルワールス力により結合しているために、容易に劈開可能であり、スコッチテープ法（剥離法）等により厚さ数ナノメートルの薄膜化が報告されています。1960年代には、Sn₄Pn₃が転移温度 $T_c = 1.3$ Kの超伝導体であることが報告されており（ただし超伝導特性の詳細は不明）、類似の構造をもつSnPn系化合物は新しい超伝導物質群ではないかと期待しました。

紆余曲折の末、NaSn₂As₂が $T_c = 1.3$ Kの超伝導体であることがわかりました[1]。NaSn₂As₂の結晶相はすでに知られていましたが、2 Kまでの電気抵抗率し

[1] Y. Goto *et al.* J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123701 (2017).

[2] Y. Goto *et al.* Sci. Rep. in press.

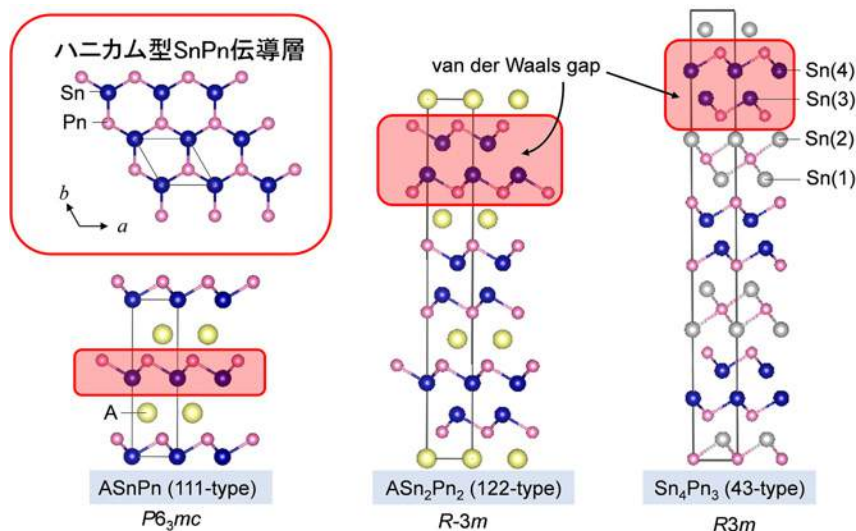


図1. SnPn系層状化合物の結晶構造

か報告されていませんでした。今回、 ^3He プローブを用いて2 K以下に冷却することにより、超伝導状態となることがわかったのです。この ^3He プローブは、首都大学東京青木・松田研（電子物性研）がJ-Physicsと基盤研究 (B) により導入したものであり、本研究の成果はまさにJ-Physicsの支援のおかげとすることができます。紆余曲折、と書いたのは、 NaSn_2As_2 にたどりつく前に、何度も「マイスナー効果」を示す試料を合成していたことによります。X線回折で検出される不純物の有無に関わらず、3-4 K以下で反磁性を示すことがよくありました。しかしながら、これらの試料では比熱の飛びが観測されませんでした。現在でもその原因は不明ですが、おそらく粒界に析出したSnに由来するものと推測しています。マイスナー効果によると思われる反磁性を示すにも関わらず、超伝導転移による比熱の飛びが観測されない、という経験を通じて、超伝導体探索の奥深さに触れたように感じています。

ともあれ、 NaSn_2As_2 については超伝導転移に伴うゼロ抵抗および比熱の飛びが観測され、バルク超伝導体であることがわかっています。まずは自分たちの見つけた超伝導体を特徴づける名称をつけようと考

え、SnPn系化合物を「ファンデルワールス型層状超伝導体」と呼んでいます。ファンデルワールス結合したハニカム型伝導層を有する超伝導体という点では、グラファイト、遷移金属カルコゲナイド、 HfNCI などと共通の特徴です。 NaSn_2As_2 は単結晶が作製できますので、種々の物性測定が可能です。芝内教授（東京大学）との共同研究により、磁場侵入長を測定し、BCS理論で説明されるs波超伝導体であることを明らかにしました[3]。また、磁場侵入長が960 nmと異常に長く、混合価数に由来するキャリア散乱を示唆する結果を得ました。物質探索という点では、 $\text{Na}_{1-x}\text{Sn}_2\text{P}_2$ という新物質を合成し、 $T_c = 2.0$ Kの超伝導体であることを報告しました[2]。

2018年4月から現職に就き、まずは本物質系の T_c をどこまで上昇させることができるのかを探ることが重要であろうと考え、日々学生と研究に励んでいます。本物質系の超伝導に関する論文が他グループからも出始めており[4]、少し焦りながらもよい刺激となっています。熱電材料やトポロジカル物質としても興味深い点があります。本稿では触れませんが、本物質群に関する論文一覧をウェブサイトにて公開していますので[5]、興味のある方はぜひご覧ください。

[3] K. Ishihara *et al.* Phys. Rev. B 98, 020503 (2018).

[4] E. J. Cheng *et al.* arXiv:1806.01141 (2018).

[5] "Papers on SnPn-based superconductors and related compounds" http://www.comp.tmu.ac.jp/eesuper/SnPn_papers.html



Enhanced superconducting transition temperatures in the rocksalt-type superconductors $\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x \leq 0.5$)

小林 夏野 Kaya Kobayashi

岡山大学 異分野基礎科学研究所 Research Institute for Interdisciplinary Science (RIIS), Okayama University

阿井 幸男

Department of Physics
Okayama University

Harald O. Jeschke

RIIS
Okayama University

秋光 純

RIIS
Okayama University

単純なNaCl構造($Fm\bar{3}m$, cF8, #225)をもつSnTeは、古くからナローギャップ半導体として知られていたが[1], 近年トポジカル結晶半導体として盛んに研究が行われている[2]。微量のSn欠損や、化学ドーピングによって超伝導が発現する事も知られており、特にInドーブは他のドーパントに比べ超伝導転移温度(T_c)が高く($T_c \sim 3\text{-}4\text{ K}$), バレンススキップ超伝導の可能性が議論された[3]。このように超伝導発現機構からも、トポジカル超伝導体の候補としても興味をもたれたSnTeのInドーブ組成物質の報告が近年も多く行われている[4,5]。さらに、系統的なInドーブによって、高濃度と低濃度でドーパントの状態が異なる可能性と同時に、Inの固溶限界が45%程度($\text{Sn}_{0.55}\text{In}_{0.45}\text{Te}$)であることが報告された[6]。

SnTe高濃度Inドーブの際には、不純物としてInTeが現れる。このInTeはTlSe構造($I4/m\bar{c}m$, tI16, #140)を持ち、NaCl構造と大きく異なるため、上記のように固溶限界が存在する。一方、高圧下においてInTeはSnTeと同じNaCl構造を持ち、超伝導を示す事が報告されている[7]。同様の高圧合成によってIn高濃度ドーブのSnTe超伝導体を合成できるのではないかと、という期待から、我々はJ-Physicsで購入した高圧合成装置を用いてSn-In-Teの合成を試みた。

InTeと同様の合成条件で $\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ を合成した結果、 $x=0 \sim 0.5$ までの領域ではほぼ単相のNaCl型構造を持つ試料の合成に成功した(図1)。格子定数は、SnTe(6.35 \AA)とInTe(6.1 \AA)の格子定数から予測されるように、Snの増加に従って単調に増加する。

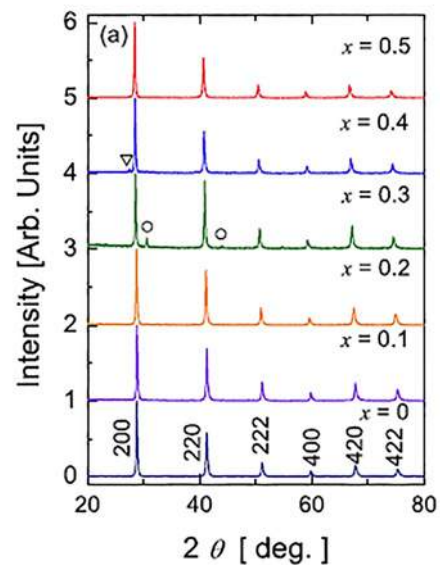


図1. $\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ の粉末X線回折の結果。▽は高圧セルのBN, ○はNaCl構造のInTeが不純物として析出する。

常圧合成では、SnTeにInをドーブすると、 T_c がInのドーブ量につれ単調増加する。一方、本研究で合成したIn高濃度ドーブ領域(もしくはInTeのSnドーブ領域)における T_c のSn組成 x に対する変化は、 $\text{In}_{0.3}\text{Sn}_{0.7}\text{Te}$

[1] L. Esaki and P. J. Stiles, Phys. Rev. Lett. **16**, 1108 (1966).

[2] Y. Tanaka *et al.*, Nat. Phys. **8**, 800 (2012).

[3] G. S. Bushmarina *et al.*, Sov. Phys. Solid State **28**, 612 (1986).

[4] G. Balakrishnan *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 140507(R) (2013).

付近で最大を示すドーム型を示した(図2)。

InドーパされたSnTeは、超伝導を示す組成でも特徴的なディラックコーンを示しており[5]、トポロジカル超伝導体の有力な候補であったが、InTeはSnTeと異なりtrivialな金属である。したがって、本研究で合成した領域において、topological相からtrivialな相への転移が期待されたが、 T_c の変化は基本的に連続的であった。常圧合成で得られている結果と合わせると、図2に示すように、 T_c はInTeとSnTeの間の中央組成付近で平らなドーム型を示し、両端のSnTeと $\text{Sn}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{Te}$ ならびにInTeと $\text{In}_{0.9}\text{Sn}_{0.1}\text{Te}$ の間での T_c の変化は顕著であることがわかる。

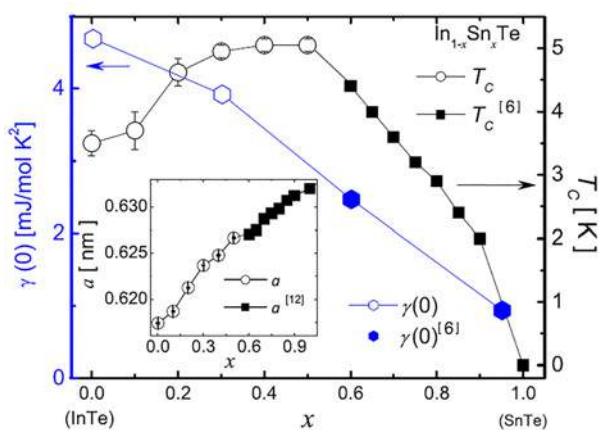


図2 InTe-SnTeにおける超伝導転移温度 T_c と電子比熱係数 γ のSn組成に対する変化。白抜きマークが今回得られた結果。文献値[6]と大きな飛びなく接続する。挿入図は格子定数の変化。○が今回得られた結果、■は文献値である。

SnTeにInをドーパした場合、Inによる不純物バンドがフェルミエネルギー付近に成長して超伝導が発現すること、電子比熱係数 γ がInドーパによって増加する事が指摘されていた[6]。本研究でも、Inが増加するに従って γ が増加する振る舞いが見られた(図2)が、 T_c は γ の増加に伴って増加せず、上記の様にドーム状の変化を示した。

この振る舞いについて明らかにするため、我々は

第一原理計算を行い、In-Snの置換によって系の電子状態がどのように変化するかを調べた(図3)。図3(a)に、ドーパされていないInTeのバンド構造を示す。フェルミエネルギーより少し上に、鋭い状態密度のピークが存在することがわかる。今回の研究では、InをSnで置換することによって電子がドーパされ、この鋭いピークがフェルミエネルギーに近づくことで T_c が上昇したとみることもできる。一方で、図3(c)のように、鋭いピークはドーピングによってポテンシャルが乱れると広がりを持つと予想される。この乱れを考慮した計算結果が実際に観測された T_c の振る舞いとよく対応していることから、InTeへのSnドーパによる T_c の上昇とドーム型の変化は、InTeのバンド構造から説明できることが分かった。これらバンド構造の変化に伴って生じる振る舞いを、今後は単結晶を用いた測定で検証していきたい。

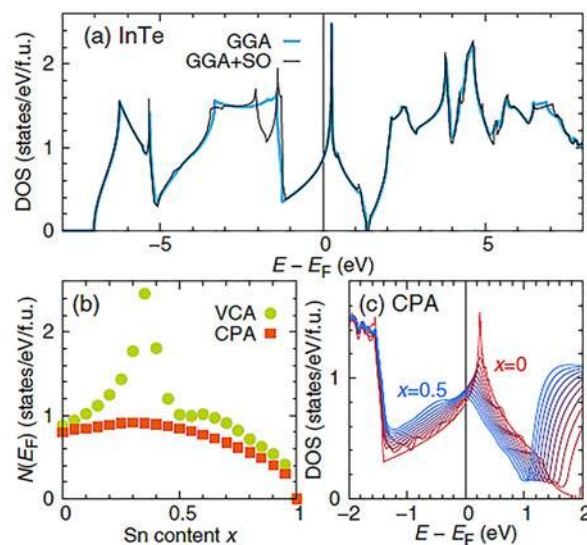


図3 $\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ の電子構造。(a)スピン軌道相互作用(SO)によるバンド構造の変化。(b)フェルミエネルギーにおける状態密度のSn濃度依存性。乱れを考慮した計算(CPA)では、特徴的な鋭いピークが失われる。(c)ドーパによって生じる乱れを入れたポテンシャルを仮定して計算したフェルミエネルギー付近の状態密度。

[5] C. M. Polley *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 075132 (2016).
 [6] N. Haldolaarachchige *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 024520 (2016).
 [7] M.D. Banus *et al.*, Science **142**, 662 (1963).
 [8] K. Kobayashi *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 104511 (2018).



会議報告： J-Physics平成29年度領域全体会議

酒井 明人

東京大学物性研究所

2018年3月15日～17日の3日間に渡り、東京大学物性研究所6階大講義室にて平成29年度の領域会議が行われました。参加者は124名でした。

3月15日(木)

まずオープニングに領域代表である播磨尚朝(神戸大理)先生からJ-Physicsの目的とこれまでの成果についてご説明いただきました。中間報告に対して審査委員会からAの評価を受けており、これまで通り今後も研究に邁進し成果を出し続ける必要があること、一方でアウトリーチ活動に対しては現状不十分であるため積極的に行っていく必要があるとの報告がありました。

この日の講演はA01班の計画研究からスタートしました。中辻知先生(東大物性研)の講演「局在多極子と伝導電子の相関による新しい量子現象」では、A01班の成果のサマリーの後、仮数揺動系 YbAlB_4 、四極子近藤系 $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$)、ワイル反強磁性体 Mn_3Sn 等での最近の成果が報告されました。

中西良樹先生(岩手大理工)の講演「超音波で探る $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の低温秩序相と電子状態」では、磁場中でソフトニングが増大する最新の実験結果が報告されました。

小林寿夫先生(兵県大物質)の講演「 YbAlB_4 の低温・高圧力下 ^{174}Yb 放射光メスbauer分光法による研究」では、高解像度メスbauer分光を圧力下まで拡張した最新の結果が報告されました。

榊原俊郎先生(東大物性研)の講演「 EuPtSi の磁気相図」では極低温磁化測定により決定された異方的な磁場温度相図が示されました。

佐藤卓先生(東北大多元研)の講演「Nonreciprocal magnons in noncentrosymmetric magnets」では反転対称性のない反強磁性体 $\alpha\text{-Cu}_2\text{V}_2\text{O}_7$ のマグノン分散について報告がありました。

鈴木通人先生(理研CEMS)の講演「クラスター多極子による反強磁性相の巨視的秩序パラメータ」では、磁気構造を拡張多極子により分類することで、異常ホール効果の発生が自然に理解できることが示されました。

有田亮太郎先生(理研CEMS)の講演「 Mn_3Sn における大きな磁気光学カー効果に対するクラスター多極子理論」では、 Mn_3Sn が巨大な磁気光学カー効果を示すことを理論・実験双方から明らかにしたことが報告されました。

20分の休憩の後、A01班の公募研究者の講演が始まりました。出口和彦先生(名大院理)の講演「正20面体準結晶の磁性と超伝導」では、準結晶や近似結晶が舞台となる超伝導や量子臨界性について報告がありました。

渡辺真仁先生(九工大基礎科学)の講演「Yb系準結晶と近似結晶における新しい量子臨界現象」では、周期系～準結晶まで様々なYb化合物で見られる仮数揺動の量子臨界性がどのように統一的に理解できるのか、理論的に示されました。

関山明先生(阪大基礎工)の講演「角度分解内殻光電子線二色性による占有4f軌道対称性の解明」では $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ を始めとするPr化合物の結晶場基底状態が光電子分光によっても確認できたことが報告されました。

古賀昌久先生(東工大理工)の講演「ハニカム格子



図1 会議の様子

上多軌道模型におけるスピン軌道相互作用の効果」では、スピン軌道相互作用の強いハニカム格子上でスピン液体や磁気秩序相がどのように競合、出現するかを理論的に研究した結果が報告されました。

椎名亮輔先生（琉球大理）の講演「Sm化合物における軌道依存型混成による秩序化現象と重い電子状態」では、SmRu₄P₁₂が示す磁場中での複雑な電気抵抗率の温度依存性や、SmOs₄Sb₁₂, SmTa₂Al₂₀を始めとする磁場に依存しない重い電子化合物がどのように理解できるか理論的に研究した成果が報告されました。

大槻純也先生（東北大理）の講演「量子多体物理におけるスパースモデリングの方法」では、量子多体物理で非常によく用いられる量子モンテカルロ法がスパースモデリングの導入でどのように進歩するのが示されました。

坂井徹先生（兵庫県立大物質理）の講演「低次元量子反強磁性体のスピンネマティック相」では、厳密対角化法や密度行列繰り込み群法を用いて、低次元量子反強磁性体におけるスピンネマティック液体相などのエキゾチックな量子相の可能性が報告されました。

森道康先生（原子力機構先端研）の講演「拡張多極子によるフォノンホール効果」では、Ba₃CuSb₂O₉で見られる熱ホール効果について、拡張クラスター多極子と孤立スピンの焦点を当て、そのメカニズムを示されました。

3月16日（金）

会議2日目は伊藤哲明先生（東京理科大理）の招

待講演「単体Teにおける電流誘起バルク磁性」からスタートしました。時間反転対称性を破らない電流誘起の磁化がNMRで観測されたことが報告されました。

20分の休憩の後、C01計画研究班、公募研究班の講演が順に行われました。網塚浩先生（北大理）の講演「反強磁性金属における電気磁気効果の検証」では、C01班の活動内容紹介の後、様々な反強磁性体での電気磁気効果について、理論と実験が一致する点及び異なる点について報告がありました。

藤秀樹先生（神戸大理）の講演「UNi₄Bの常磁性およびトロイダル磁気秩序状態のB-NMRによる研究」では、磁場中のNMRスペクトルの比較から、結晶対称性と磁気構造の関係が示されました。

中尾裕則先生（KEK-IMSS）の講演「Resonant x-ray scattering study on hybridized orbital states in *d*- and *f*-electron system」では人工超格子(LaMnO₃)₂(SrMnO₃)₂、及び充填スクッテルダイトPrRu₄P₁₂の秩序相での混成効果について報告がありました。

高阪勇輔先生（岡大基礎研）の講演「無機キラル磁性体の不斉結晶育成」では、水溶性・不溶性双方のキラル磁性体における純良な不斉結晶合成の成果や今後の展望を示されました。

楠瀬博明先生（明大理工）の講演「拡張多極子による交差相関結合」では、クラスター多極子やハイブリット多極子の分類と、期待される対称性の破れ及び線型応答について報告がありました。

御領潤先生（弘前大理工）の講演「Kane-Mele金属におけるカイラル*d*-波超伝導と表面自発スピン分極: SrPtAs を視野に入れて」では、カイラル*d*波超伝導体の表面物性について理論的な予測が報告され



図2 ポスターセッションの様子

ました。

大串研也先生（東北大理）の講演「奇パリティ多極子秩序伝導系の開拓」では、奇パリティ多極子秩序を示す物質として新たに最近発見されたBaMn₂As₂の強磁気四極子/十六極子秩序について報告がありました。

大原繁男先生（名工大院工）の講演「反転中心のない結晶構造のYbNi₃Al₉および関連物質の磁気的性質」では、YbNi₃Al₉、ErNi₃Ga₉およびLuNi₃Al₉の磁気相図や電流誘起磁化について報告がありました。

高島敏郎先生（広大院先端物質）の講演「ジグザグ鎖近藤半導体の反強磁性秩序に対する一軸圧力効果」では、近藤半導体CeT₂Al₁₀ (T = Ru, Os)の一軸圧力下での異方性や混晶系の低温物性が報告されました。

昼食休憩後、ポスターセッションが行われました。64件もの講演があり、活発な議論が行われました（図2）。

品岡寛先生（埼大理）の講演「動的平均場近似に基づく第一原理計算手法の開発と応用」では、第一原理計算に必要な連続時間量子モンテカルロ法について、多軌道物質に適用した例や最新のスパースモデリング法導入の利点についても報告がありました。

古賀幹人先生（静大教育）の講演「結晶場多重項に起因する非フェルミ流体状態における多極子物理」では、立方晶Pr化合物のΓ₅三重項結晶場基底状態の多極子近藤効果について理論的な研究の成果が報告されました。

野原実先生（岡大基礎研）の講演「5d遷移金属を含む超伝導体の開発」では、Irを含む超伝導体や局

所反転対称性のない系の超伝導について報告がありました。

鬼丸孝博先生（広大院先端研）の講演「Pr系の非クラマース二重項における相転移と非フェルミ液体的挙動」では、PrT₂X₂₀系の四極子秩序や四極子近藤効果について系統的に報告されました。

水口佳一先生（首都大物理）の講演「重金属を含む層状超伝導体の探索」では層状Bi型超伝導体の局所構造、同位体効果、キャリアドーピングの結果等が報告されました。

秋光純先生（岡大基礎研）の講演「Trial to Carrier-doping in Sr₂IrO₄/Ba₂IrO₄」では、Ir酸化物の超伝導探索の現状について報告されました。

播磨尚朝先生（神戸大理）の講演「反転対称の無い系やウラン化合物の電子構造」では、UNi₄Bのバンド構造が示されました。

講演終了後、懇親会およびポスター賞授賞式がカフェテリアで行われました。5名の受賞者に賞状とマグカップの記念品が贈呈されました（図3）。



図3 ポスター賞授賞式の記念撮影

3月17日(土)

最終日はD01公募研究班の講演から始まりました。高林康裕先生(東北大AIMR)の講演「Emergent electronic phenomena in hybrid *f*-/*p*-electron molecular materials」では、希土類金属を含むフラーレンベースの分子材料における元素置換や圧力を用いた電子物性の系統的な変化が報告されました。

阿部伸行先生(東大新領域)の講演「*3d*電子系における高次多極子に由来する非対角応答」では、カイラル反強磁性体の非相反方向二色性や奇パリティ多極子秩序の候補物質であるハニカム反強磁性体の電気磁気効果について報告がありました。

岡本佳比古先生(名大院工)の講演「*Ir*・*Pt*化合物における新超伝導体探索」では、スピン軌道相互作用の強い*Ir*や*Pt*を含む超伝導物質探索の最近の進展が報告されました。

宮坂茂樹先生(阪大院理)の講演「遷移金属ダイカルコゲナイドの異常物性」では、Type IIのDirac型分散を持つ NiTe_2 のバンド構造について最新の実験結果が報告されました。

20分の休憩の後、B01計画研究班の講演が行われました。青木大先生(東北大金研)の講演「B01計画研究のこれまでの成果と*f*電子系化合物の超伝導探索」では、B01班の成果を報告された後、強磁性超伝導 URhGe の一軸圧効果について報告がありました。

石田憲二先生(京大理)の講演「重い電子人工超格子の核磁気共鳴」では、強磁性超伝導体や人工超格子のNMRについて報告がありました。

神戸振作先生(原子力機構先端研)の講演「 URu_2Si_2 のNMRによる研究」では、過去の報告にあった2回

対称秩序は純良試料で弱く、不純物由来の可能性が高いことが報告されました。

井澤公一先生(東工大理)の講演「 $\text{U}_{1-x}\text{Th}_x\text{Be}_{13}$ の輸送係数にみられる非フェルミ液体的挙動」では、熱伝導率測定からフルギャップ的な準粒子励起が報告されました。

松田達磨先生(首都大院理工)の講演「 $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ (*Tr*: 遷移金属)における重い電子状態の特徴について」では、磁場に依存しない重い電子状態が価数揺動で理解できることが報告されました。

柳瀬陽一先生(京大理)の講演「奇パリティ多極子秩序・超伝導の分類学と電磁応答」では、超伝導や多極子の分類表に加え、対称性から期待される新たな電磁応答についても報告がありました。

午後のセッションではB01公募研究班の講演が行われました。服部一匡先生(首都大院理工)の講演「異方的四極子RKKY相互作用と磁場中強四極子秩序」では、 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の強四極子秩序の[100]方向磁場での磁場中相転移は、磁場に依存する四極子間相互作用の導入によって説明できることが示されました。

池田浩章先生(立命館理工)の講演「多軌道超伝導体の分類とその応用」では、多軌道系の超伝導のペアリングやギャップ構造について理論的に研究した成果が報告されました。

藤森伸一先生(原子力機構)の講演「3次元ARPESによる強相関ウラン化合物の電子状態」では、ARPESを使った最新の実験技術により、 URu_2Si_2 の非常に綺麗なフェルミ面の3Dマッピングが示されました。

野尻浩之先生(東北大金研)の講演「 URu_2Si_2 および関連化合物の強磁場相」では、 URu_2Si_2 や CeRu_2Si_2



図4 集合写真

などの中性子散乱やXMCDの結果が報告されました。

野島勉先生（東北大金研）の講演「電場誘起超伝導における増強された常磁性極限臨界磁場の直接観測」では、 SrTiO_3 を用いた電気二重層トランジスタでの電場誘起超伝導の高い上部臨界磁場について、磁場角度、温度を関数とした詳細な測定結果が報告されました。

大貫惇睦先生（琉大理）の講演「立方晶化合物の特異なフェルミ面」では、量子振動で様々な物質のフェルミ面を測定され、現代のバンド計算が小さなフェルミ面を除き非常に良く実験を再現することが報告されました。

最後に評価委員である鹿野田一司先生、上田寛先生に講評いただきました。伝導する多極子をキーワードに研究が発展していることを評価される一方、領域の枠にとらわれずに研究することも大事であるとコメントいただきました。また面白さを専門外の人にわかりやすく伝えることも大変重要であるという言葉に大変共感致しました。



国際ワークショップ報告 Novel Phenomena in Quantum Materials driven by Multipoles and Topology

大槻 匠

東京大学物性研究所 特任研究員

酒井 明人

東京大学物性研究所
助教

中辻 知

東京大学物性研究所
教授

2018年4月9日(月)、10日(火)の2日間に渡り、東京大学柏キャンパス柏図書館メディアホールにおいて、国際ワークショップ“Novel Phenomena in Quantum Materials driven by Multipoles and Topology”がJ-Physicsと東京大学物性研究所量子物質研究グループとの共催で開催されました。近年、量子物質、とりわけ強相関電子系における研究は、多極子やトポロジーに基づいた新しい物理学の概念の導入によってより深く理解されてきました。本ワークショップは、新物質で発現する新奇な物理現象を模索する研究者と、スピントロニクスやフォトニクスを駆使して新機能を探索する研究者の架け橋となり、最新の研究成果の共有ならびに新しい研究の芽を育む場を提供することを目的に開催しました。年度始めのご多忙な時期ではありましたが、2日間でのべ162名(初日92名、2日目70名)の参加があり、22件の口頭発表と42件のポスター発表が行われました。

初日は、始めに押川正毅氏(東大物性研)、森初果物性研所長、播磨尚朝領域代表よりご挨拶を頂きました。引き続き、午前前半はトポロジカル相のセッションで、 SmB_6 を題材にしたstrange metalの研究(Rutgers大学、Piers Coleman氏)、ワイル/ディラック超伝導体におけるカイラルな電磁気効果(大阪大学、藤本聡氏)について発表2件がなされました。午前後半は、ワイル磁性体に関する口頭発表が3件あり、ワイル半金属における非線形光学応答(Boston

大学、Ying Ran氏)、角度分解光電子分光によるワイル磁性体のバンド構造の観察(東大物性研、近藤猛氏)、ワイル反強磁性体 Mn_3Sn における電氣的・熱的・光学的応答(東大物性研、肥後友也氏)について発表が行われました。

昼食を挟んで初日午後にはポスターセッションが行われ、活発な議論が行われる様子が至る所で見られました。参加者にご記入いただいたアンケートでも、ポスターセッションの印象が特に良かったようです。ポスター発表のうち、学生による発表については、15名の審査員によってポスター賞が厳正に審査されました。

午後前半は多極子のセッションで、スピン軌道結合金属 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ における多極子秩序(東大物性研、廣井善二氏)、非クラマース二重項における非フェルミ液体的挙動と2チャンネル近藤効果(広島大学、鬼丸孝博氏)、 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ における強制的四極子秩序への磁場の効果(東大物性研、瀧川仁氏)について発表3件が行われました。午後後半はstrange metalのセッションで、価数揺動系 YbAlB_4 の ^{174}Yb 放射光メスバウアー分光(兵庫県立大学、小林寿夫氏)、近藤絶縁体 $\alpha\text{-YbAl}_{1-x}\text{MnxB}_4$ における高温反強磁性(東大物性研、鈴木慎太郎氏)、近藤超格子における巨大磁気抵抗(東大物性研、多田靖啓氏)について報告がなされました。初日の講演終了後は、柏の葉キャンパス駅前コメスタへと場所を移し、懇親会が催されました。



2日目午前前半は、量子スピン液体に関する講演3件があり、キタエフ量子スピン液体における量子熱ホール効果（京都大学、笠原裕一氏）、 α -ZrCl₃における創発SU(4)対称性と量子スピン軌道液体状態（東大物性研、山田昌彦氏）、カゴメ反強磁性体における熱ホール効果（東大物性研、山下穰氏）について報告がなされました。午前後半は強相関電子系の多極子に関する講演2件で、希土類・アクチノイドにおける隠れた秩序（Rutgers大学、Premi Chandra氏）、熱膨張・磁歪測定によるPrV₂Al₂₀の多極子秩序（東大物性研、酒井明人氏）について研究報告がなされました。

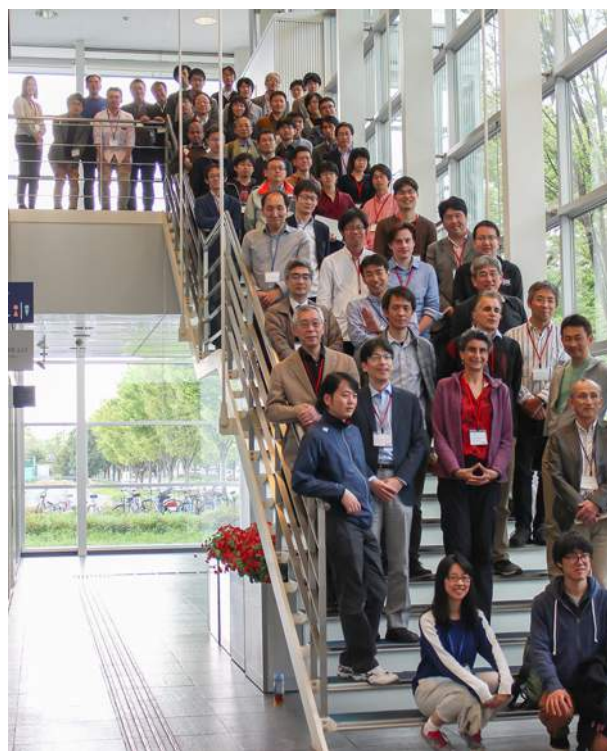
午後前半は、新奇超伝導体のセッションとして3件の発表が行われ、強磁性超伝導体におけるリエントラント超伝導とフェルミ面の不安定性（東北大学、青木大氏）、PrTr₂Al₂₀ (Tr = Ti, V)における四極子秩序と超伝導の圧力制御（電気通信大学、松林和幸氏）、鉄カルコゲナイト超伝導体におけるネマティック秩序とBCS-BECクロスオーバー（東大新領域、芝内孝禎氏）について報告がなされました。後半は、スピントロニクスと電流駆動現象に関する3件の発表が行われ、反強磁性金属における電流誘起磁化（北海道大学、網塚浩氏）、多極子秩序の分類学と電磁応答（京都大学、柳瀬陽一氏）、量子スピントロニクスと応用（東大物性研、三輪真嗣氏）について報告がなされました。

全講演終了後、中辻から閉会の挨拶、ならびにポスター賞審査委員長の瀧川仁氏（東大物性研）からポスター賞の発表があり、野口亮氏（東大物性研）、近江毅志氏（東大新領域）、西川尚氏（東大物性研）の3名に賞状と記念品のマグカップが贈呈されました。

最後に、3月開催の領域全体会議から日が浅く、年

度始めのお忙しい時期での開催となりましたが、多数の皆様にご出席いただき誠にありがとうございました。2日間という過密なスケジュールでしたが、休憩時間にも随所で議論が行われ、多極子とトポロジに関連した最新の研究成果について、濃密な情報共有と意見交換をしていただけたのではないかと思います。

当日の様子を撮影した写真が、本ワークショップWebサイト (<http://satoru.issp.u-tokyo.ac.jp/ISSPWorkshop20180409.pdf> から「Photo」をクリック) にありますので、是非ご覧ください。





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

J-Physics平成30年度領域全体会議報告

はじめに

平成30年度の領域全体会議（後半キックオフミーティング）は、5月24–26日に東北大学片平さくらホールで開かれました。本会議では、研究期間後半に採択された公募研究が提案者によって紹介され、その研究計画について討論することが主な目的になっています。また、中間評価が昨年9月に終わりました。その結果を踏まえて、領域として期間後半の研究展開について議論することも重要な目的であり、各計画研究班代表から今後の研究計画に関する発表がありました。新緑の仙台の過ごしやすい季節のおかげで議論も大いに進みました。全体の参加人数は115名でした。

はじめに播磨領域代表から領域の研究計画の概要と今までの成果および今後の会議予定に関する説明がありました。以下、項目ごとに報告します。

公募研究課題

今回は79件の応募があり、33件の公募研究課題が採択されました。このうち理論に関するものが9件、実験に関するものが24件です。前後半に継続して採択された研究者は14名でした。どの研究にもこの領域研究の新しい局面を切り開こうとする気概の感じられるものと思われました。

ポスター発表

ポスター発表は2日目の午後に行われ、54件の発表がありました。主な発表者は計画班員や、その研究室のPDと大学院生の方々です。会場は盛況で多くの活発な議論が交わされました。また若手対象のポ

スター賞の選考も行われたため、若手の方々は自分の成果の説明に真剣に取り組まれていました。

特別セッション

特別セッションでは「物性若手のためのキャリアデザイン—企業で活躍する先輩からのメツツセージ」というテーマで、パナソニックの四橋聡史氏とNTTの角柳孝輔氏に講演をお願いしました。今後、少子化の影響で大学などのアカデミックポストは必然的・合理的に減少します。バブル崩壊後、企業の博士修了者採用数も減少しましたが、新しいイノベーションの担い手として企業で物性物理学者が活躍する可能性を具体的に丁寧に語っていただきました。本号に網塚さんが詳しいレポートを書かれています。ご参照ください。

各計画班の研究計画

A01班

東大物性研中辻氏から今後の研究計画に関する説明がありました。局在多極子を同定し、その多極子が多極子格子になった時に伝導電子との相互作用を通してどのように遍歴化させられるかということに注目する野心的構想です。すでにPr1-2-20系やYb系でその端緒を掴んでおり、今後の成果が期待されます。新しい公募班の研究課題もその構想の沿ったものであり、理論にも重きをおいたものになっています。

B01班

東北大金研青木氏から今後の研究計画に関する説明がありました。本班は、遍歴性が強く多極子自由度が物性を支配する系の超伝導や磁性に注目しています。高品質な試料の物質開発を行い、dHvA効

果などの量子振動実験でFermi面の詳細を決定し、NMRや熱・電輸送現象でFermi面近傍の低エネルギー励起を詳細に明らかにしていきます。これらの結果に基づき、多極子自由度に起因する超伝導や磁性の微視的機構の解明を目指しています。公募班も、独自の手法もつ実験家と理論家が集まっており、この困難な問題をどう料理するのか楽しみです。

C01班

北大理学院網塚氏から今後の研究計画に関する説明がありました。この班は、主に（グローバル、局所）反転対称性の破れに注目しています。反転対称性の破れた新しい化合物の探索とそれに起因する新奇な物性発見が研究計画の両輪です。新しい公募班の研究課題も探索、理論、精密物性とバランスのとれたものです。特に電流磁気効果やマルチフェロイックな新物性発見を目標としています。最近、JPSJのEditor's choiceに選ばれた斎藤氏（元網塚研）のUNi₄Bの電流磁気効果の論文は、2018年（2-4月）でダウンロード数のトップ5を3ヵ月間維持し、総ダウンロード数は900に近づいています（2018年5月時点）。新しい電流磁気現象に強い興味を持たれていることを示しており、この方向での研究を推進することを勇気づけるものです。

D01班

岡山大異分野基礎科学研究所野原氏から今後の研究計画に関する説明がありました。この班の5d/6p系のj=3/2, 1/2 Physicsの構築という明確な目標が示されました。その鍵となる戦略として 1) 秩序構造を持ち、局所的に反転対称性が破れている化合物 2) Fermi面の強いnestingの2点に注目しま

す。この構想は、野原氏がf電子系のj=5/2 Physicsの研究からフィードバックしたものであり、d電子系では斬新で野心的挑戦です。またd-f電子系の統一の視点を構築するという領域の目標に誠に合致したものです。公募班もd-f系の多彩な研究者になっています。

懇談会

懇談会は2日目夕に会議場と同じ東北大学片平さくらホールで開かれました。中間評価を終え、研究が佳境に入ってきた中、研究者間で今後の研究や将来の展望について熱い議論が交わされました。またポスター賞の授賞式もあり、播磨代表から5人の若手研究者の方に賞状と記念品が贈られました。今回の記念品は、宮城名産の美しい玉虫塗りのペンケースであり、筆者もいただきたいと思った次第です。また、早坂東北大理事（研究担当）・副学長、高梨東北大金研所長、今野東北大金研教授に播磨領域代表との隠された過去? を含む貴重なお話をいただき、会場は大いに盛り上がりました。

評価委員講評

会議の最後に、評価委員の上田寛先生から講評をいただきました。全体の研究方向は概ね良いが、物質開発では余り自分の探索領域を限定せず、自由にやったらよいとの助言をいただきました。方向性のないむやみな物質探索も問題ですが、ある程度の自由度とのバランスも必要なのでしょう。確かにセレンディピティのある物質開発研究者は、良いバランス感覚を持っているように見受けられます。

まとめ

この3日間の会議で、各班の研究目標がかなり明確になりました。各班が多極子という概念を異なった現象に適用することで、この概念がよりリッチなものに変貌してきていると実感しました。今後、各班が多様化させた多極子の物理を統合して、新たな地平に到達することが期待されます。





物性若手のためのキャリアデザイン — 企業で活躍する先輩からのメッセージ

網塚 浩

北海道大学 大学院理学研究院 教授

平成30年5月開催の領域全体会議では、2日目に標題の特別セッションを設け、強相関係の分野で学位を修め企業で活躍される四橋聡史さんと角柳孝輔さんをお招きしてご講演いただきました。四橋さんは阪大基礎工学研究科・三宅和正先生の研究室のご出身で、2002年に f^2 配置の結晶場と近藤効果の理論研究で学位を取得された後、当時の松下電気産業にご就職、現在はパナソニック株式会社・テクノロジーイノベーション本部に勤務されています。「基礎科学から新しい技術開発へのチャレンジ」と題したご講演では、社会の動向とともに変遷する会社の戦略の中で、四橋さんご自身がどのようにアイデアを出しプロジェクトを立ち上げてこられたのか、貴重な経験談を伺いました。世界最高効率を実現された人工光合成の研究プロジェクトのお話も大変興味深いものでしたが、そこに留まらず、現在は化石燃料問題の解決に向けインフォマティクスを活用した新物質開発のプロジェクトを牽引されているとのこと、人類社会の発展に全力で取り組まれている熱意をひしひしと感じました。企業では一つの専門に留まらず、色々な人と交渉・協働できる幅広い知識とスキルが要求されると

いう強いメッセージをいただきました。角柳さんは、2005年に北大理学研究科・熊谷健一先生のもとで重い電子系超伝導体FFLO相のNMRの研究で学位を取得され、NTT物性科学基礎研究所に勤務されています。「NTT物性科学基礎研究所での超伝導量子回路の研究」と題したご講演では、量子コンピュータの原理から開発の現状までをわかりやすく講義していただきました。さらに、ノーベル物理学賞受賞者A. J. Leggett先生とともに最近取り組まれている、巨視的スケールでの量子もつれ状態（実在性の破れ）の検証の研究について解説していただきました。大型希釈冷凍機が多数配備された世界有数の極低温実験環境の中で、最先端の基礎科学研究を長期的視点で進められており、この分野の専門性を存分に発揮できる魅力的なキャリアパスをご紹介いただきました。大変お忙しい中、ご講演をご快諾いただいたお二人に誌面を借りてあらためてお礼を申し上げます。

J-Physicsでは人材育成の一環として、今後も大学院教育と企業ニーズとの溝を埋めるキャリア形成支援活動を行っていきます。ご意見、ご要望等がございましたら是非お寄せください。



四橋聡史さん



角柳孝輔さん



小林 夏野

岡山大学 異分野基礎科学研究所 准教授

J-Physics 2018: Summer School について

2018年6月24日から6月27日に、淡路夢舞台(兵庫県淡路市夢舞台1番地)においてJ-Physics 2018: Summer Schoolが開かれた。国内外からの6人の講師による多極子と超伝導に関する理論と実験の基礎から最先端の研究までの講義が2日半にわたって行われ、講師も含めて約80人の参加があった。初日の24日は丁度サッカーワールドカップの期間中だったこともあり、Get Together partyがボールのキックオフによって始まった。

夢舞台は会議場とホテルが同じ場所にあるため、参加者は基本的に朝食から夕食までを一緒に時間を過ごすことができ、参加者の交流が深まったのでは

ないだろうか。夕食時には、参加者は写真のマグカップを各自もって周りのポスターを見たりしながら交流を深めた。週後半に同じ会議場で行われたWorkshopに参加した海外研究者もSummer Schoolに参加し、講義への積極的な質問に加えて、夕食時のポスターでも若い研究者に熱心に質問したりアドバイスを与えたりといった姿が見られた。

今回のSummer Schoolは、Organizersの若手の研究者が中心となって講師を呼び、Workshopと同じ会場を使用させて頂くなど、多くの方の助けによって可能となった。Summer Schoolをきっかけとして、大学院生を含めて若手の研究者同士の交流が深まり新しい研究が生まれることを願っている。

June 24 (Sun.) ~ June 27 (Wed.)

Summer School

— Multipoles and Superconductivity —

Summer School Lecturers

Taka-hisa Arima	(Tokyo, Japan)
Philip Brydon	(Otago, NZ)
Benoît Fauqué	(ESPCI Paris, France)
Alexandre Pourret	(CEA Grenoble, France)
Ilya Sheikin	(CNRS Grenoble, France)
Morgan Trassin	(ETH Zürich, Switzerland)

Organizers

Summer School

K. Kobayashi (President)
 A. Nakamura (Vice President)
 C. Tabata (Vice President)
 H. Funashima, J. Ishizuka, T. Kubo,
 Y. Tobita, Y. Yanagi

プログラム

T. Arima : Non-reciprocal Flows of Quantum Particles Induced by Ferroic Order of Odd-Parity Multipoles

P. Brydon : Superconductivity with strong spin-orbit coupling

B. Fauqué : Electronic ground states in low carrier metals : the case of semi-metals

A. Pourret : Fermi surface instabilities in correlated electron systems

I. Sheikin : Measurements of physical properties of strongly correlated electron systems under high magnetic fields

M. Trassin : Probing ferroic thin films using non linear optics





ICM2018

International Conference on Magnetism (ICM2018) に参加して

橘高 俊一郎

東京大学物性研究所 助教

2018年7月15日から20日の期間にアメリカのサンフランシスコで磁性の国際会議 (ICM2018) が開催されました。ICMは3年に1度開催される歴史ある会議で、今回が21度目の開催です。毎回多くの研究者が集い、2015年にスペインのバルセロナで開催された前回会議では2,197名が参加しました。その内容は、超伝導や重い電子状態を含む強相関電子系 (SCES) から、スピン系、スピントロニクス、磁性薄膜を含むナノ磁性、磁気デバイスなど多岐に渡ります。今年はサンフランシスコ国際空港から電車で30分程度の会議場「Moscone Center」で開催されました。街中は正に大都会であり、モダンな印象の高層ビル群に圧倒されました。一方、近くにはスラム街があり、夜は治安が悪い場所もあったようです。

本稿では、本会議の概要とともに私個人の率直な感想を述べたいと思います。まず会議申込後に行ったことは、航空券とホテルの予約でした。会議のホームページで斡旋されていたホテル「San Francisco Marriott Marquis」(会場まで徒歩3分) が1部屋224ドルと高額で、いきなり洗礼を受けました(それでもICM特別価格で正規金額の半額程度だったようです)。私は二人で部屋をシェアしたのでお手頃価格でしたが、高額な宿泊費に悩まされた方は多かったようです。

ICM2018開催前の7月上旬には西日本で豪雨による甚大な被害がありました。不安な思いをされた方も多かったことと思います。私の実家(岡山県井原市)付近でも小田川が倉敷市真備町地区で氾濫し、大きな被害が発生しました。被災地の皆様に謹んでお見舞い申し上げます。

迎えた出国日の7月15日、汗を吹き出しながら成田国際空港まで移動し、乗り継ぎなしの快適な空の旅を経て(ロシアW杯フランス優勝!の機内アナウンスもありました)、お昼前にサンフランシスコ国際空港に降り立ちました。日本国内では気温が40度に迫る中、長袖が快適な現地は絶好の避暑地と言えました。私にとっては約10年ぶりのアメリカです。当時との大きな違いは、ESTAが導入された点と100円を大幅に下回っていたドルが115円近くにまで回復していた点でしょうか。円高が解消されたことを差し引いても、サンフランシスコの物価は大変高く感じました(マクドナルドのビックマックセットが11ドル)。

さて、本題の会議ですが、まず今回導入された会議用アプリ(My Itinerary)について紹介したいと思います。ICM2018は4件のPlenary lectureとポスター講演を除けば、最大10セッションが同時進行されるマンモス会議です。そのため、参加者は聴きたい講演に合わせて会場を移動する必要があります。このアプリは端末に一度インストールするとプログラムリストからアブストラクトにネット接続無しでアクセスでき、その中で興味ある発表・セッションを登録すれば一目で自分のスケジュールを把握できる優れたものでした。プログラム変更があればアップデートで即座に反映され、進行中の講演も一目で分かります。この便利さを味わうと、常時パラレルセッションが行われる日本物理学会でもぜひ導入して欲しいと思わずにはいられませんでした。

講演会場にはHDMIケーブルが準備され、16:9の画面で発表が行われました。複数のケーブルが準備されていましたが、PCを接続すると画面が自動で切



り替わる設定であったため、質問時間中に次の講演者が画面を奪ってしまう事態が頻発していました（私もやっしまいました）。16:9の画面は幅広いスペースを提供し、講演者と聴衆の両者にとって有益であったと思います。会場には「No Photography」が大きく掲げられ、写真・動画撮影の禁止が強調されていました。

今回の会議では講演件数が1900件を超えた一方で、講演キャンセルも目立っていたように思います。あるセッションでは、最初の講演終了後、2-4番目の講演者が不在という事態も発生していたようです。ポスター講演は午前と午後の2部が開催されました。会場では午前はコーヒー、午後はビールが提供され、それらを片手に議論が白熱していました。毎日、ベストポスター賞が発表され、J-Physics関係者では肥後友也氏（東大物性研）と田端千紘氏（KEK物構研）が見事受賞されました。賞状と記念品の水筒（賞状ケース？）を受け取られたそうです。おめでとうございます！

Topicsに関しては、私の印象に残った一部の内容を紹介したいと思います（私見に満ちた記事であることをご容赦ください）。初日のWelcome Receptionでは会場で立食タイプの料理&ドリンクが提供されました。2日目には Sr_2RuO_4 のセッションがあり、UCLAのグループから一軸性圧力下で超伝導状態のKnight shiftが減少するとの報告がありました。 Sr_2RuO_4 の超伝導研究の大きな転機となりそうです。3日目には、ウランやセリウム系における超伝導・量子臨界現象・隠れた秩序に関する講演やキタエフ量子スピン液体の講演などがありました。その日の夜は、多くの展示

物を備える科学博物館Exploratoriumにてバンケットが開催されました。4日目の午後は自由時間で観光に出かけられた方も多かったのではないかと思います。私も午前のセッション終了後にPier 39を訪れ、遠目からゴールデン・ゲート・ブリッジ、アルカトラズ島、ベイブリッジ、野生のアシカを堪能しました。5日目には近藤絶縁体 SmB_6 や YbB_{12} のフェルミ面に関する講演やフラストレーション系における量子臨界現象の講演などがありました。最終日には、マックスプランク研究所のグループから CeRh_2As_2 における多極子由来の量子臨界的振る舞いおよびその近傍での超伝導の発見が報告されました。他に、1-2-20系に関する講演や電流誘起磁化の講演（網塚氏）などがありました。

総括すると、数々の新機能性材料が発表された5日目の中辻氏のPlenary lectureを筆頭に、スピントロニクス関連の研究が大変盛り上がっているように感じました。SCES関連では、ピエゾアクチュエータを利用した一軸圧実験や非平衡状態での物性測定など新たなアプローチから物質の本質に迫る研究が印象的でした。反面、新物質開発の報告がやや少なかったように思います。Closingでは、会議登録者数が1541人であったこと、次回のSCES2019が岡山で開催されること（播磨氏）、ICM2021が上海、ICM2024がボローニャで開催されることが紹介されました。本会議は大きなトラブルなく終わりを迎え、大変有意義な時間を過ごすことができました。会議を運営された関係者の方々には深くお礼申し上げます。



トピカルミーティング ものづくりシリーズ 第3回「物質探索最前線」会議報告

松田 達磨

首都大学東京理学研究科 准教授

水口 佳一

首都大学東京理学研究科 准教授

はじめに

トピカルミーティングものづくりシリーズ第3回「物質探索最前線」は、8月6-7日に、首都大学東京の国際交流会館大会議室にて開かれました。ものづくり学校第1回は、2016年1月に岡山大学にて「戦略的物質開発入門」として開かれ、また第2回は6月末に淡路夢舞台国際会議場にて、若手研究者対象のサマースクールと国際ワークショップというかたちで開催されました(この会議の概要については、同号掲載の報告記事をご参照ください)。本トピカルミーティングは、「物質探索最前線」というテーマから、ものづくりシリーズ第3回という位置付けとさせて頂き、また2016年度に発足した首都大の研究組織である超伝導理工学研究センター(センター長堀田貴嗣)*との共催というかたちで行われました。

会議概要

2日間の会議において、22件の口頭発表と最終的に18件のポスター発表が行われました。B01-D01合同トピカルミーティングとしつつも、領域全体の中で特徴ある物質研究を推進されている方々、また加圧や加工等の実験技術を通して新たな研究対象拡張を推進されている方、理論的研究をもとにした新しい物理的現象の観測の可能性について研究をすすめておられる方々を中心にご講演を頂きました。さらに、今回の会議では、領域外からも本領域とは異なる視点・手法で物質開発を精力的にすすめておられる4名の方をお招きし、ご講演を頂くことが

でき、幅広い内容の会議となりました。このようなものづくりに特化したプログラムに加え、全員の講演時間を30分とゆったりとしたスケジュールにしたことにより、研究成果のみならず、改めて結晶育成や物質探索における基本事項の確認に加え、講演者それぞれがこれまでの研究活動で培ってきた物質探索の特徴ある手法や、チャレンジし続けていることが、色濃く発表内容に反映されたものとなっており、印象に残りました。

領域外からの特別講演及び評価委員講演

初日最初のセッションでは、東工大の東正樹氏から「ビスマス・鉛-3d遷移金属ペロブスカイト酸化物の系統的な電荷分布変化」として、応用的視点を持った大きな負の熱膨張係数を持った物質開発として、バレンススキップ元素に注目した研究についてご講演を頂きました。また、このバレンススキップの自由度に起因した研究としては、三宅和正氏(阪大)からも二日目に「非磁性自由度によるいくつかの異常現象」として、最近の研究紹介と理論的研究についてご講演を頂き、本領域の研究対象物質にも多々含まれるBiやPb、Tlといったスピン軌道相互作用の大きな元素が、物質中において価数自由度に起因した興味深い現象を示すことをご紹介頂きました。また、初日午後のセッションでは、新学術領域「複合アニオン化合物の創製と新機能」の領域代表を務めておられます陰山洋氏(京大)から「複合アニオン化合物の作り方」としてご講演を頂きました。酸素(O^{2-})

* <https://www.tmu-beyond.tokyo/superconductivity-science-and-engineering/>

の代わりに水素(H)や窒素(N³⁻)等の陰イオンが複数含まれるような化合物合成、またそれを基にした新しい反応過程の構築に加え、さらに革新的な機能性の創出を目的とした今後の研究の展望についてご講演を頂きました。化学的・応用的な視点を基にしつつ、これまでの常識にとらわれない発想力の重要性を感じさせて頂ける内容で、大変勉強になるものでした。二日目最初には、東工大の大場史康氏より「第一原理計算による半導体物性の予測とデータ駆動型新物質探索」として、第一原理計算を基にした沢山の候補となる新物質の中から、現実存在する物質へと絞り込んでゆく過程や、三元状態図の作成といった、膨大な計算データを基にしたマテリアルズ・インフォマティクス的一端についてご講演を頂きました。まだまだ物質探索の実際は、既存のデータベースや、経験・勘に頼る部分がありつつも、特定の分野においては、このような手法による研究の進展について、目を見張るものがあると改めて感じ、これからの研究にどのように取り入れていくか、考えさせられる内容でした。

会議の最後には、本領域評価委員の上田寛氏より、会議評価のみならず、豊田理化学研究所におけ

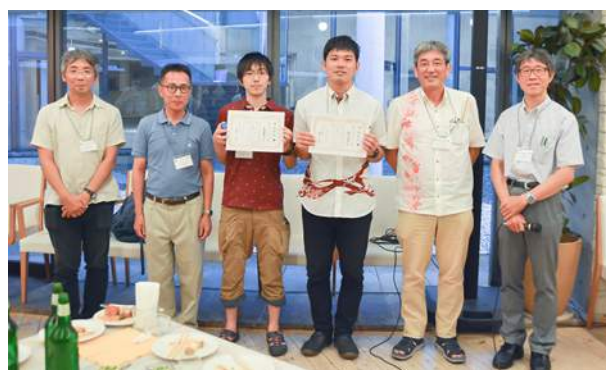
るご自身の研究内容についてご講演を頂きました。新学術領域「複合アニオン化合物の創製と新機能」の評価委員も務められていることにも関連し、Sr_{1-x}Re_xO_{1+2x}系の合成についての試行錯誤を話されつつ、物質合成をしてゆく際の重要なポイントや考え方について、これまでのご経験を基にお話し頂きました。これらは、物質合成をする際、幾度となく直面する多くの問題について、それらを克服する上で極めて実感のこもった実践的な方法論が多く含まれていたように、個人的には感じました。

ポスター発表及びポスター賞

本会議では、1日目にポスターセッションを設けました。当日の参加も含め18件のポスター発表が行われました。件数は比較的少なかったものの、いずれも成果として充実した内容の発表が揃ったものでした。その中で、若手のポスターについてポスター賞を設け、9名の審査員による厳正な審査により、以下の2名にポスター賞が授与されました。

・垣花将司 (琉球大学理工学研究科 D2)

「立方晶キラル化合物EuPtSiの特異な磁気相と電子状態」





・石飛尊之（首都大学東京理工学研究科 M2）

「ダイヤモンド構造上の反強四極子秩序と光学ジャイロトロピー効果」

ポスター賞授与式は、1日目夕方、会議場に隣接するフランスレストラン、ルベッソンベールで開かれた懇談会の中で行われました。受賞者には播磨領域代表より賞状と記念品が贈られました。今回の記念品は、BCC構造のブリルアンゾーンの形をしたルービックキューブと $3 \times 3 \times 9$ の層状構造をしたルービックキューブでした。これは、今回Chairを務めさせて頂きました筆者の趣味に関連し、選定させて頂いたものです。

まとめ

播磨領域代表のClosingでのコメントにもありましたが、幅広い視点での物質開発について大きく進展が見られ、またそれらを共有しながら、新しい発想で次の研究の芽が出ていることが実感できる会議の内容であったと思われます。最後に、お忙しい中、本トピカルミーティングにご参加頂きました皆様に、深く御礼申し上げます。



海外派遣報告(ETH)と 2年間の博士研究員の報告

飛田 豊

弘前大学 理工学研究科 研究機関研究員(2018年3月迄)

2018年2月1日-3月18日の間、「J-Physics:多極子伝導系の物理の国際展開 - 若手研究者の相互派遣」事業の支援を受けてスイス連邦工科大学(ETH)チューリッヒ校理論物理学研究所に滞在し、Manfred Sigrist教授らと、弘前大学で御領教授、修士課程2年の桜庭君と進めていた磁場誘起トポロジカル超伝導に関する議論を深めてきました。本来ならば、支援枠一杯の3ヵ月の滞在を予定していたのですが、北海道科学大学(旧北海道工業大学)へ2018年4月から着任する事が2017年末に決まった為に、急遽滞在期間を変更しました。というわけで、J-Physicsの博士研究員として弘前大学で過ごした2年間の報告もこの場で併せてさせて頂きたいと思います。

事の始まりは、2017年9月の八幡平での国際会議J-Physics2017で、領域代表の播磨教授に海外派遣制度への申請について相談をし、その後すぐに御領さんに受け入れ候補の一つであるETHのSigristさんに打診をして頂きました。結果、快諾を得ることができ、2018年2月-4月の予定でETHに滞在し、共同研究を進めるという方向で決まりました。ところが上述の通り、予定していた期間内に異動が決まり、滞在期間の変更を余儀なくされ、関係各所に様々なご迷惑をおかけしてしまいました。このような多少(?)の波乱はありましたが、何とか2月1日よりチューリッヒにて1ヵ月半の研究生活を始める事が出来ました。

ETHでの研究生活

宿泊先は、ETHからトラムとバスを乗り継いで15分程度のとても便利な場所でした(ただ、一度大雪になった日はトラムもバスも止まってしまっ、歩いて丘の上の大学まで行きましたが)。週に一回から二

回程度Sigristさんと議論を交わし、問題点を洗い出して、解決または更なる議論という形で進めていきましたが、EHTでは2月末に新学期が始まる為、学内が急激に慌ただしくなってしまう、それ以降はSigristさんとは、概ね週一回の議論が基本となりました。ETHは各部屋が全てガラス張りで開放感があり、入りやすさと緊張感が絶妙でした。また、ビジター用の部屋に滞在したので1ヵ月半の間に、数日程度の短期滞在の人が沢山やってきて、色々な国の様々な分野の人たちの話を聞くことが出来て、非常に刺激を受けました。これらに加えて、週に一度の機械学習セミナー、大学1,2年生向けの物理コロキウム、様々なゲストのセミナー等が日々開催されていて、そのスケジュールが至る所に配置されているモニターに一覧で表示されている為、辺りをふらついていると目に入り、行ってみるかという感じで参加する事が出来たので、とても刺激的で1ヵ月半は瞬く間に過ぎていきました。

チューリッヒでの生活

チューリッヒ空港について最初に行った事は、SIMカードの購入でした。一昔前では考えられないですが、今や外国でもプリペイド式SIMさえあれば、そのまま普通の携帯電話やスマートフォン環境が手に入ります。スマートフォンさえ手に入れば、電池がなくなるまでは何でも調べられるので一安心です。私が手に入れたのは空港で最初に目に入ったSWISSCOMという会社のプリペイドSIMで、20CHF程度で、depositが20CHFついてくるものでした(ちなみに、1CHF~110円程度)。至って良心的な値段だと思いつつ、購入し滞在期間中2回程ticketを追加購

入りましたが、全部でも100CHF以下だったと思います。街中でもネットで色々調べながら行動が出来たので、とても重宝しました。出発前から、スイスは物価が高いとあらゆる人から言われて、かなりビクビクしながら行きました。実際、大学の食堂での食事は10-15CHF/食、スーパーでの買い物も日本での買い物の概ね2倍程度高いという感覚でした。また、外食は恐ろしく高くてそうそう行けるものではないという印象でした。当初は、週末も土日共に研究室に行っていましたが、徐々に土日どちらかは街中をふらつくようになりました。真冬だったので余り遠出はしませんでした。市の中心部やチューリッヒ湖辺りを散歩しました。調べてみるとどうやら、スイスにもウナギがいるようで、いつか釣りに来てやろうと



決意をしました。また、チューリッヒといえば、FIFA国際サッカー連盟の本部があります。せっかくなので、数年前に出来たというFIFA Museumに行ってきました。原稿執筆時点(6月末日現在)では、どこが獲得するか分らないですが、2018年ワールドカップの優勝トロフィーも展示してあり、とても良いものでした。ただ、このMuseumはSigristさん曰く、あまり人が来ていないとの事でした。尚、スイスではほとんどすべての人が英語を話せて、そして母国語ではないために、お互いにbrokenな英語でも通じてしまいます。なので、訪問先としてはお勧めの国の一つであると思います。こうして、大分チューリッヒでの生活に慣れてきたなというところで、残念ながら帰国の日がやってきてしまいました。研究に関しても、ある程度のめどが立ち、問題点がはっきりしだしたところだったので、一層残念でしたが後ろ髪を引かれる思いで帰国と相成りました。スイスに行く前は、研究生活や食生活、言語等、不安な事もたくさんありましたが、行ってみると結局何とかかなりました。というか、何とかしなくてはならない訳で、人間の適応力というものを実感しました。尚、帰国してからおよそ10日後には、弘前から札幌に移住し新しい生活を始めなくてはならなかったもので、落ち着く暇は全くありませんでした。

というわけで、ここからは弘前大学での2年間の博士研究員の思い出話、もとい総括を簡単にしたいと思います。

つい2つ前のニュースレターでは、着任の挨拶を書いたのですが、もう総括をすることになるとは思ってもみなかったです。およそ2年前に、素粒子論から



物性理論へと手を広げ、弘前大学の御領さんの研究室にお世話になる事になりました。最初は同じ物理といえども、戸惑いだらけでした。けれども、御領さんに手厚くご指導いただき、研究室の学生と一緒にあってゼミと研究を行う事で物性分野の理解が進み、1年目はあっという間でしたが、非常に濃い時間を過ごしました。特に、御領さんとはほぼ毎日、昼ご飯を共にして、様々な話をする事が出来て良い気分転換にもなった上に、生活リズムが整ってとてもありがたかったです。そして、生活も夏を過ぎた辺りには完全にペースを掴み、釣りのポイントもいくつか見つけて楽しむ事が出来ました。また、観光スポットにもいくつか行ってみましたが、写真はその中の1つで、十二湖の青池という池です。ちなみに魚も結構泳いでいました。そして、研究や弘前での生活が軌道に乗った2年目は、一層頑張ろうと思いつつも、中々うまくいかない事も多々あり、思い悩むことも何度かありました。特にある程度物性分野に関する理解が進んできた一方で、自分なりに具体的な問題を考えようとすると、知識が著しく足りないことを実感させられて、何が出来るのかがどんどん見えなくなっていく事が何度もあり、中々に厳しかったです。ですが、前述の通り八幡平でのJ-Physics 2017以降、怒涛のように物事が進んでいき、気づいたら今に至ります。大変なことも色々ありましたが、対象の分野を広げた事でこれまで以上に、例え理論分野であっても、物理として実際に確認を行う事が大切であることを認識する事が出来ました。今後この経験を研究に活かしていかなければならないと思っています。

現在海外派遣制度への申請を考えている 若手の方々へ

数か月の間、外国で研究の事だけを考えて過ごせる時間は貴重であると、現在とても慌ただしい生活になった事もあり、心から感じています。もし、少しでも興味があるのであれば、速やかに申請する事を強くお勧めします。言語面等で海外での生活を不安に思う人も多いでしょうが、行かないと永遠にその不安は解消されないでしょう。そして、行ってしまえば何とかせざるを得ないのです。だから、きっと大丈夫です。

最後になりましたが、弘前大学に受け入れて頂いた御領潤教授、J-Physics代表の播磨尚朝教授、C01代表網塚浩教授、J-Physics関係者の方々、そして、弘前大学工学部の方々には研究だけにとどまらず色々な面で、また弘前大学の事務の方々、神戸大学播磨研秘書の岩藤陽子さん、尾崎直美さんには特に事務手続きの面で、そして、Manfred Sigrist教授、ETHのsecretary Ms. Beatrix Huber, Ms. Denise Pinsそして研究所のメンバーには研究や生活などETHでの様々な面で、大変お世話になりました。この場を借りて、皆さまには心から感謝申し上げます。お世話になった間に得られた貴重な経験も生かして、引き続き研究に教育にと、一層精進していきたいと思っておりますので、今後ともよろしくお願い申し上げます。



最先端の物性物理学研究に触れて

大岩 陸人

明治大学 理工学研究科 博士前期課程 1年

柳 有起

明治大学 理工学部
博士研究員

楠瀬 博明

明治大学 理工学部
教授

明治大学理工学研究科M1の大岩陸人と申します。今回はJ-Physics領域全体会議にてポスター賞に選出して頂き、大変光栄に思います。ポスター発表を通して多くの先生方や先輩方と研究に関する議論やお話をさせて頂きました。それは自分にとって、初めて最先端の物性物理学研究に触れられた気がした瞬間でした。運営の方々や先生方、また日頃から研究を支えて頂いている楠瀬先生、柳さんをはじめ、研究室の方々に、今回の様な貴重な経験をさせて頂いたことを、深く感謝申し上げます。今回は、ホールドープした単層MoS₂における超伝導の理論に関する発表をしました。本稿ではその概要を紹介させていただきます。

【背景】

MoS₂は遷移金属カルコゲナイド(TMDCs)に属する層状物質であり、近年は電気2重層トランジスタを用いた2次元の電場誘起超伝導に関する研究が盛んに行われています[1]。その顕著な性質として、1.5 Kで面内臨界磁場H_{c2}がパウリ限界の約4倍の大きさを持つことが挙げられます。この非常に大きなH_{c2}は、面内の空間反転対称性の破れとイジング型のスピン軌道相互作用(SOC)により、クーパーペアを組む電

子のスピンの面直方向にロックされることで生じていると考えられています。

単層 MoS₂ のフェルミ準位近傍のバンド構造は

$$|0\rangle = |d_{z^2}\rangle, |\pm 2\rangle = (|d_{x^2-y^2}\rangle \pm i|d_{xy}\rangle)/\sqrt{2},$$

の3つのd軌道から主に構成されます[2](図2参照)。伝導バンドはK(K')点近傍のほとんどスピン縮退した|0>軌道から主に成ります。一方価電子バンドは、Γ点周りはスピン縮退した|0>軌道から、K(K')点近傍は|±2>軌道から主に成り、SOCと空間反転対称性の破れに起因したスピン分裂が生じます。従って、ホールドープした単層MoS₂では電子ドープした場合より多彩な超伝導状態が実現すると予想されます。しかし、これらの魅力的な特徴に反し、現在に到るまでMoS₂のホールドープ超伝導は実現していません。

最近、ホールドープした単層MoS₂と非常に良く似たバンド構造を持つ単層TaS₂において、キャリアドープ無しでも超伝導体となるTMDCs群の中で最も高いH_{c2}が観測されました[3]。この現象の説明としてイジング型のSOCによる効果が重要視されています。同様の実験がNbSe₂においても行われています[3,4]。高濃度にホールドープされたMoS₂と見なせるTaS₂において超伝導が得られる一方で、MoS₂にお

[1] Y. Saito et al., Nat. Phys. 12, 144 (2016).

[2] G.-B. Liu, W.-Y. Shan, Y. Yao, W. Yao, and D. Xiao, Phys. Rev. B 88, 085433 (2013).

[3] S. C. d. I. Barrera, et al., Nat. Commun. 9, 1427 (2018).

[4] X. Xi, et al., Nat. Phys. 12, 139 (2016).

[5] R. Oiwa, Y. Yanagi, and H. Kusunose, arXiv:1806.01447.

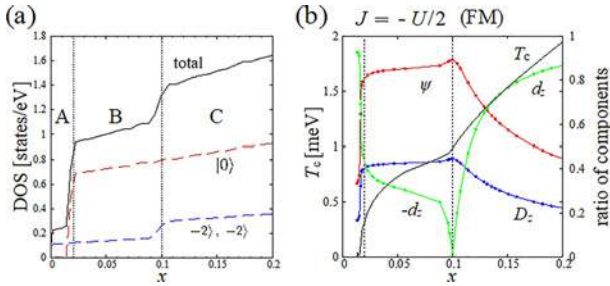


図1. 強磁性的交換積分 $J = -U/2$ ($U = -0.5$ eV) の場合の T_c と各クーパーペアの構成要素のホールドープ量依存性.

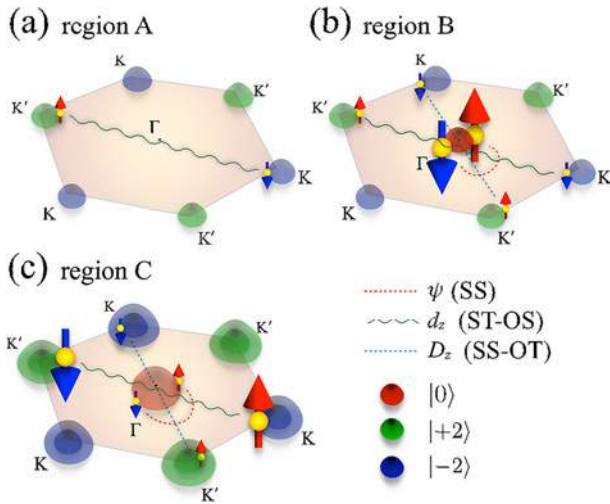


図2. $J = -U/2$ のクーパーペアの模式図. region A~C は図1(a) に対応. 楕円の大きさはフェルミポケットの大きさを, スピンの大きさはクーパーペアの強さをおよそ表す.

いては観測されていないという現状は, TMDCs 群における超伝導現象がドープ量と深い関わりを持つことを示唆している様に思えます. そこで私たちは, ユニットセルあたりのホールドープ量 x を $0 \sim 0.2$ 個まで変化させたときの超伝導転移温度 T_c とクーパーペアの各成分の変化を調べました[5].

【結果】

まず, オンサイトのSOCを考慮した3軌道引力Hubbardモデルに基づきギャップ方程式を求めまし

i	type	irrep.	o-irrep.	S	component	basis X^i
1	SS	A_1'	A_1'	0	ψ	$i\tau^0\sigma_y$
2	SS-OT				D_z	$i\tau^x\sigma_y$
3	ST-OS		A_2'	1	d_z	$i\tau^y\sigma_x$
4,5	ST-OS	E''	A_2'	1	(d_x, d_y)	$(-i\tau^y\sigma_x, -\tau^y\sigma_0)$
6,7	SS-OT	E'	E'	0	(D_x, D_y)	$(-i\tau^x\sigma_y, -\tau^x\sigma_y)$

表1. 点群 D_{3h} におけるクーパーペアの分類. "irrep" ("o-irrep") はスピンと軌道 (軌道) 空間における既約表現. S は電子対のスピン絶対値.

た. このとき, 格子振動由来の電子間引力を仮定し, 直接積分 U を負の値に取りました. 次に, $|0\rangle$ 軌道から成るスピンシングレット(SS)に加え, $|\pm 2\rangle$ 軌道間で構成されるスピンシングレット(軌道トリプレット)(SS-OT), スピントリプレット(軌道シングレット)(ST-OS)をそれぞれ次のように定義しました.

$$\begin{aligned} \psi(1/\sqrt{2})\tau^0(i\sigma_y) & \quad [\text{SS}], \\ \mathbf{D} \cdot (i\boldsymbol{\tau}\tau^y)(i\sigma_y) & \quad [\text{SS-OT}], \\ \mathbf{d} \cdot (i\boldsymbol{\tau}^y)(i\boldsymbol{\sigma}\sigma_y) & \quad [\text{ST-OS}]. \end{aligned}$$

各クーパーペアは, 単層 MoS_2 の点群 D_{3h} 対称性に基づく議論から, 3つの既約表現に分類されます. その結果を表1に示しました. これら各既約表現の超伝導状態に対する T_c を数値的に求めたところ, A_1' 対称性 (ψ, D_x, d_z の混合状態) が最も高い T_c を有するという結果を得ました.

図1に, 交換積分の値が $J = -U/2 > 0$ (強磁性的) の場合の T_c とクーパーペアの各成分のドープ量依存性を状態密度(DOS)と共に示しました. 図2は, この時のクーパーペアの模式図を表します. 図1(b)に示すように, $x < 0.02$ (図1(a)のA領域)の非常に低いドープ量では T_c が非常に小さくなるのが分かりました. これは, 図1(a)に示すように, K点周りでスピン分裂を起こした上部のバンドのみから成るDOSが非

常に小さいためです。また、この結果は単層MoS₂において超伝導が実現していない1つの理由であると予想されます。ドーピングを増やしていくと、 $x=0.1$ を超えた時点で d_z の符号が反転し、 T_c の値が急激に増加します。さらに、 $x>0.14$ の領域で d_z が支配的な状態が得られました。これは、SOCによりスピン分裂したバンドの両方にフェルミ面が現れた結果、 d_z ペアに最も強い引力が働くようになったためであると解釈できます。

【おわりに】

1月に淡路島で開催されたトピカルミーティングに参加した時は、家族や友人へのお土産話として、淡路島の美味しいタマネギ（特に素焼き）やビール、豪華なホテルの話が7割程を占めていました。しかし、淡路島から帰ってきて楠瀬先生から「次の領域会議ではポスター賞を狙いましょう。」と笑顔で繰り返し言われ続けていると、そのうち私はその言葉が「タマネギばかりに感動していないで研究活動に励みなさい。」と言われている様な気がしてきて、勝手に焦っていました。しかし言い換えれば、楠瀬先生の笑顔のプレッシャーがあったからこそ、今回ポスター賞を受賞できたと言っても過言では無いと思います。楠瀬先生の日頃からの手厚いご指導に御礼申し上げます。

また、普段から下らない話や研究の話に到るまで様々な話を聞いて頂いている研究室の方々にも、この場をお借りして深く感謝申し上げます。特に、柳さんとは研究室で毎日多くの時間を過ごさせて頂いていますが、今回の研究に限らず日頃から、ご自身の

時間を割いてまでも、多くのアドバイスやご意見を頂いております。また、何か身の回りで面白いことが起きた時には、柳さんに話を聞いて頂いておりますが、いつも楽しく研究生活を送れているのは、柳さんの優しさがあったからこそだと思っております、有り難うございます。

今回の経験を踏まえ、日々の研究活動に精進して参ります。



博士研究員の紹介

植木 輝

弘前大学大学院 理工学研究科 物性理論研究室

所属研究代表者 御領 潤

弘前大学大学院 理工学研究科
教授

平成30年4月から弘前大学の御領先生の研究室で新学術領域「J-Physics: 多極子伝導系の物理」のポスドクとして研究を行っている、植木輝です。以下では、自己紹介と博士取得までに行った研究、そして、これから行う研究についてお話しします。

○自己紹介

私の出身は稚内という日本の最北端の地で、少し街を離れると海や牧場が広がっている自然が豊かな所で育ちました。中学三年生の頃、礼文島という稚内の近くの島に住んでいたこともありました。礼文島はウニやアワビ、ホッケなどの食べ物がとてもおいしく、トレッキングが楽しめ、レブンアツモリソウに代表される高山植物などをたくさん見ることができます。是非、みなさん礼文島に足を運んでみてください。また、小さい頃、両親が一人っ子である私のために犬を飼ってくれて、それ以来、犬がとても好きです。当時白い雑種と黒柴を飼っており、雑種の方も柴犬に形が似ていたので、柴犬が一番かわいいと思っています。趣味はおいしいものを食べることとお酒を飲むこと、旅行です。弘前に引越してきてから、弘前城のある桜で有名な弘前公園や、世界自然遺産である白神山地などを観光しましたが、とてもきれいなところでした。桜の時期には弘前公園に5回も行ってきました。

○博士課程の研究

私は北海道大学の北先生の研究室で、第二種超伝導体における超伝導量子渦の帯電効果や渦糸フ

ロー状態のホール効果の研究を行いました。磁場中の第二種超伝導体に輸送電流を流すと、超伝導体内部に存在する超伝導渦電流がマグナス力によって運動します。また、超伝導渦は磁束を持つので、磁束が動くことで電場が発生して、散逸が生じます。この渦の運動に伴う抵抗状態のことを「渦糸フロー状態」と言います。この超伝導渦は磁束のみならず、電荷も持っています。マグナス力によって渦は輸送電流に対して垂直方向に運動するので、渦の帯電はホール効果に影響を及ぼす可能性があることが指摘されています。そこで、私たちはまず平衡超伝導渦の帯電について調べることにしました。

磁場中の超伝導体の解析には、通常、アイレンバーガー方程式（準古典方程式）が用いられます。この方程式は、渦状態のペアポテンシャルや超伝導渦電流、磁場などの物理量や、渦糸コア内の低エネルギー励起を含む一粒子スペクトルをよく記述するのですが、一方、帯電効果やホール効果を記述するための力の項が落ちているため、それらを議論することができません。そこで、私たちは超伝導の平均場理論であるゴルコフ方程式からアイレンバーガー方程式を導出する際に、より高次の項であるローレンツ力などの力の項を含めるように導出し、準古典的なアプローチでも帯電効果を記述できるように方程式を拡張しました。この「拡張アイレンバーガー方程式」を用いて、超伝導渦コア近傍の電荷密度を計算したところ、超伝導渦の帯電のメカニズムには、

ローレンツ力によるもの[1]と、ペアポテンシャルの空間変化によるもの[2]とがあることがわかりました。そして、幅広いパラメータ領域で、ペアポテンシャルの空間変化による効果が渦の帯電に主要な寄与を及ぼしていることがわかりました[2]。

その後、渦糸フロー状態のホール効果の計算も行いました。第二種超伝導体のホール効果は数多くの実験研究があります。特に、銅酸化物超伝導体や鉄系超伝導体、金属超伝導体のニオブなど、多くの第二種超伝導体ではホール係数の符号が温度や磁場を変化させた時に反転することが観測されています。一方で、このホール係数の符号反転に対する理論として、超伝導渦の帯電によるものやピンニングの影響を考慮したものや、超伝導ゆらぎの効果をとり込んだものなどがありますが、一致した見解はいまだに得られていません。そこで、私たちはこのホール係数の符号反転問題を解決するために、まず、第二種超伝導体のホール効果に対する微視的理論の構築に挑みました。そして現在まで、渦の帯電効果を研究するために導出した、拡張アイレンバーガー方程式をさらに線形応答の範囲まで拡張し、それを用いてs波超伝導体におけるホール角の温度依存性を計算することに成功しています[3]。

○これからの研究

現在、私は御領先生と協力し、ハニカム構造を持つ超伝導体の理論研究を行っています。具体的には、D01の野原先生のグループで発見されたSrPtAs超伝導体[4]に関する研究です。この超伝導体は、最近接格子間のホッピングパラメーターに対し、約10%と大きなスピン軌道相互作用をもつことが第一原理計算により示されています。また、超伝導体のペアリングは時間反転対称性を破るカイラルd波の

対称性をもつ可能性があることが、 μ SRによる内部磁化測定や汎関数繰り込み群などの理論解析により指摘されています。現在までに超伝導体表面を流れるスピン偏極電流などがボゴリューボフドジェンヌ方程式を用いて解析されています[5]。私は現在、スピン軌道相互作用やレイヤー間ホッピングを考慮した準古典方程式を導出し、SrPtAs超伝導体表面を流れるスピン偏極電流の計算に取り組んでおり、先行研究では考慮されていなかった磁場の効果（マイスナー効果）を含めて自己無撞着に計算することを考えています。D01の野原先生のグループはSrPtAs以外にもBaPtSbなどの異なるハニカム構造を持つ超伝導体を発見しているので[6]、さらに今後この研究を進展させて、これらの超伝導体の渦状態や電気伝導度などの輸送係数の計算も行いたいと考えています。

○最後に

以上、自己紹介と博士課程での研究、これからの研究についてお話しさせていただきました。本学術領域の研究分野に関して、まだまだわからないことがたくさんありますが、研究会などを通して勉強し、自身の研究へ活かして行きたいと思っております。貢献できるようにがんばりますので、何卒よろしく願いいたします。



弘前公園の桜の写真

- [1] H. Ueki, W. Kohno, and T. Kita, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 064702 (2016); W. Kohno, H. Ueki, and T. Kita, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 083705 (2016).
[2] M. Ohuchi, H. Ueki, and T. Kita, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 073702 (2017); H. Ueki, M. Ohuchi, and T. Kita, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 044704 (2018).
[3] H. Ueki, Doctoral thesis, Hokkaido University, 2017.
[4] Y. Nishikubo, K. Kudo, and M. Nohara, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 055002 (2011).
[5] J. Goryo, *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 140502(R) (2017).
[6] K. Kudo, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 063702 (2018); K. Kudo, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 073708 (2018).



博士研究員の紹介

堀江 理恵

岡山大学 異分野基礎科学研究所 特任助教

所属研究代表者 **秋光 純**

岡山大学 異分野基礎科学研究所
特任教授

思えば、私が研究の道に進むきっかけとなったのは、大学2～3年生のとき、物理の先生に、「堀江さん、大学院に行ってみない?」と言って頂いた一言だったかもしれません。それまで、私は、大学院のことは全く考えてもみなかったのです。もともと、理科が好きでしたが、物理が得意、という方でもなかったもので、先生の一言が嬉しかったのを覚えています。

大学では、指導教官の先生が作製されたTaSe₂をエタノールに浸し超音波洗浄器にかけてナノ片にしたものを、原子間力顕微鏡(AFM)で観察し、バネ定数を測定する、という卒業研究をさせていただきました。実験の都合上、夜中に泊り込んで行ったこともありましたが、実験となると夢中に打ち込んでいる自分がありました。目標に向かって、とことん突き詰めることが楽しかったのかもしれません。その後も、やはり研究を続けたいという気持ちから、大学院に運良く進学しました。

私が進学した大学院は、大学院大学で、様々な大学や高専から学生が集まっており、1学年100人ほどの修士学生がいました。入学後に研究室を決めることができたのですが、やはり、このときも、今思えば恩師の話を伺い、「『どうしてそうなるのか?』という神様(自然)からの問いかけを一番に紐解けるのがこの研究なんだよ」という言葉に魅せられ、2次元光電子分光の研究室に入ったのです。大学院では、入学から半年間は朝から晩まで授業を受けつつ、研究も進める日々でした。私が、SPring-8で実験するグ

ループを希望したところ、そのグループの先輩に「女子が行くのは(夜通しビームタイムがあり)きついと思うけど、本当にやれるの?」と、まず言われましたが、研究室独自の2次元表示型球面鏡分析器を用いた光電子分光の実験から得られる2次元パターンも万華鏡のように綺麗で、そこから結晶構造の解析ができることに魅力を感じたため、「やります!」と返答したのでした。このように、修士課程では、SPring-8で、先輩方、先生方を見習いながら実験をさせて頂き、後々、秋光先生との出会いにも繋がるZrB₂の酸化膜の結晶構造解析を行い、ZrB₂(0001)上に添加物なしで安定にcubic-ZrO₂がエピタキシャル成長することを明らかにしました[1]。博士後期課程では、同じくZrB₂、新たにNbB₂の研究を行いました。今度は、価電子帯の研究で、立命館大学SRセンターの直線偏光ビームライン(BL-7)において同じく研究室独自の2次元表示型球面鏡分析器を用いることで、世界的にも唯一の、直線偏光による遷移行列要素の影響を含んだ2次元パターンから原子軌道解析を行うという研究でした。表面敏感な実験のため、清浄表面を出すことが勝負の実験でした。このときからは、財団から研究費を頂き、私一人で実験施設に行き、ビームライン担当の先生や同じ試料を扱われたことのある先生にご助言を頂きながら、ビームタイムに向けて、ひたすら清浄表面を出し、2次元光電子分光の測定を行いました。頑張った甲斐もあり、ZrB₂の原子軌道解析[2]について良いデータを得る

ことができ、ポスター賞も3つ頂き、有難い経験をさせて頂けたと、心から感謝しております。

ZrB₂のおかげで、博士後期課程2年の12月、私はホウ化学学会に参加し、秋光先生にお会いすることができました。そのことがきっかけで、現在、秋光研究室にお世話になっておりますが、秋光研では新規超伝導体創成の研究をできることが私にとって最大の魅力でした。大学院でお世話になった研究室では、装置開発が盛んに行われていたが、良い装置も面白い物質があつてこそ、役立つのではないかと、ひしひしと感じていたからです。ZrB₂はMgB₂と同じ結晶構造を持つため、MgB₂の発見の歴史なども書物で読んだことがあり、超伝導体発見による社会貢献に夢を感じました。しかし、実際、新規超伝導体を創成するのは、本当に難しいものなのだと言われ3年間で実感することになります。秋光先生が、私の採用前に、「超伝導体創成は、宝くじを当てるようなものだけど、良い？」と仰ったことが納得できました。現在も、イリジウム酸化物を超伝導化しようと、学生さんも含め、いろいろと試していて、それらしき傾向が垣間見えつつも、なかなか思うようには行かない。私自身も、この研究で「結果」を出すのは大変だな、と正直思いました。「誰かは当たる、宝くじを当てることより、難しいのかもしれない」と。とは言え、こんなときこそ、心の持ち方が試されているのかな、と思います。私の好きな言葉に、「思いは招く」という言葉があります。TED[3]で放送されました、植松努さんの言葉です。植松さんは、放送の中で、「できるかできないか？、誰が決めるの？」と仰っています。「どーせむり」ではなく、「『だったらこうしてみたら？』で夢は叶う」と。実際、どういう結果になるかわからない、という不安が測定の研究よりも物質創成の研究にはあるのでは、と思います。気持ちで、実験の結果が変わるわけではないでしょう。しかし、気持ち

で、物質を合成できる条件を引き出せられるのではないかと、思うのです。歴史上の偉大な発見も実験者の強い気持ち、真摯な姿勢から、思わぬ失敗が起こり、重要な発見ができた、ということも少なくないと思います。如何に気持ちを強く持つか、「最後まで諦めなかった者が最後に成功する」と、よく言われますが、この精神状態を維持するのは至難の業だと思います。紛れもなく、自分との闘いになるでしょう。この紙面に書いてしまうと本当にもう後には引けませんが、「自分が納得できるまでできたなら、よしとする!」、と覚悟を決めて、最後まで走り抜きたいと思えます。幸運にも、昨年から今年は、科研費を頂けたので、イリジウム酸化物に関する2次元光電子分光の実験等も行いながら、超伝導化に有益な情報を引き出し、皆様のお役に立てれば、この上なく幸せだと思います。

最後に、私を雇ってくださった秋光先生、研究室の皆様と、研究をさせて頂ける環境、私に関わってくださった全ての方々に心から感謝を申し上げますと共に、J-Physicsに少しでもお役に立てるよう、自分にできる全てのことをやり切りたいと思います。まだまだ未熟者ではございますが、秋光先生の超伝導転移温度の方程式： $T_c = (\text{運}) \times (\text{根性}) \times (\text{アイデア}) + \text{環境}(\text{伝統}) + \text{理解者}$ 、を胸に、ポジティブシンキングで運を味方に付けて、皆様から学び続け、さらに頑張っていきたいと思えますので、今後とも、どうぞよろしくお願い申し上げます。

[1] R. Horie *et al.*, *e-J. Surf. Sci. Nanotech.*, **13**, 111 (2015).

[2] R. Horie *et al.*, *e-J. Surf. Sci. Nanotech.*, **13**, 324 (2015).

[3] <https://youtu.be/gBumdOWWMhY>



物理学の未来に期待

吉澤 正人

岩手大学 名誉教授

このたび、29年間勤務した岩手大学を定年退職しました。皆様には、これまで、共同研究や学会、研究会等を通じてさまざまお世話になりました。お礼の意味も込めて、雑感を述べたいと思います。

実は、5月から3ヶ月間、私は天理に滞在しております。心身共に鍛えて、人生をリスタートしたいという気持ちから、研究生生活を少し離れ、修養の生活を送っております。4時30分に起床し、日々、1万歩から2万歩歩く生活の中で、さまざまな贅肉も少し落ちた感じがします。

しかし、長年の習慣はそう変わる筈もなく、人との出会いや自然とのふれあいの中で、これまで気がつかなかったさまざまな自然現象の不思議を感じ取り、また、浮かぶアイデアをノートに記入し、簡単な計算を通して自分流に納得するという、結局のところ、これまでと変わりのない日常ではあります。在職中との唯一の違いは、雑用に煩わされないということ。暫くぶりに得た至福の時と言えるかも知れません。

さて、先頃、第一生命が行った「大人になったらなりたいもの」の調査結果 (http://www.dai-ichi-life.co.jp/company/news/pdf/2017_058.pdf) によると、男の子では「学者・博士」が15年ぶりに一番になったそうです。子供にとってなりたい職業は憧れに由来すると思います。この憧れの中には生命科学の最近の進展に触発された部分も大きいと思いますが、物理学もこの流れに乗って多くの若者の参入を期待したいところです。

物理学は、モノの見方・考え方を勉強する学問と私は思います。これまでも、新しい考え方や物質に対する新しい見方が人々を魅了し、基礎科学だけでなく、応用を通じて、様々な恩恵を与えてきました。新しい現象を見つけて、研究を愉しむ。私たちの日常は何か宝探しに似ています。この愉しみを若い人々に伝えて行く事ができればと思います。

しかし、物理学は、「面白さを感じるまでの敷居が高い」学問でもあります。基礎として学ぶべき多くの科目や過去の研究の蓄積の上に牙城のようにそそり立ち、素人的な興味が研究に結びつかないとも言われています。若者の呼び込みを阻害している原因の一つかも知れません。これは物理学の長い歴史の中で培われてきたという側面もありますが、自身の研究を簡単なことばで説明したり、社会や身の周りの出来事への関心や、他の研究分野への興味を通した「捨て目の醸成」、「俯瞰力の醸成」などによって、この敷居は下がるように思えます。青少年や若年研究者の素朴な疑問を切り捨てることなく、じっくり汲み上げ、一緒に考えることにより、自然現象に対する新しいモノの見方や考え方の醸成に繋がるかも知れません。なぜなら、物理学者は、力学など自然を理解する多くのツールを身に付けているからです。

物理学がこれからも、新しいモノの見方・考え方を提供し、若者を惹きつける舞台であることを大いに期待したいと思います。



研究室の寿命

高島 敏郎

特任教授 広島大学大学院先端物質科学研究科

2018年3月末に、私は30年間勤めた広島大学を定年退職した。大学院時代から広島大学に着任するまでにくつかの研究室に在籍したが、どこも消滅した。そのような体験をしたので、私自身はレジリエントな研究室を目指した。若い皆さんの参考にはならないと思いつつも、消滅した研究室での私の体験を書かせて頂く。

大学院で所属したのは京大化研の清水榮研究室。最近出版された本で、清水氏が30歳の頃、広島原爆の調査隊で大活躍したことを知った。私が研究室に入った頃に還暦を迎えた同氏は、夕方になると研究室の皆を館内放送で呼び出して、台所で酒を飲んで口角泡を飛ばしていた。そんな相手をするのをスタッフも学生も皆、面倒がっていた。私には「博士に進学したら大変だよ、これからは分子生物学の時代だからね」と宣われただけで、研究指導は一切無かった。しかし、米国やユーゴスラビアなどからの研究者が研究室に入れ替わり滞在していたので、私の眼を海外に向かせてくれた。博士課程の2年目で教授が退官し、4年目の9月に博士を取得して学振の奨励研究員となった。後任教授人事は名誉教授となった同氏が口出ししたためか、暗礁に乗り上げたようだった。結局、「清水城」は後継者不在で崩壊した。

私は西ドイツのフンボルト財団奨学研究員としてユーリッヒ原子力研究所のProf. F. Pobellのもとに赴いた。その研究室には米国、英国、日本などからの研究者が多かったので、研究上の議論が英語でなされたのは幸いであった。当時、宇宙で一番低い温度をPrNi₅の核断熱消磁で実現して、超低温物理の世界をリードしていた。この絶頂期にProf. Pobellは研究室の皆を集めて宣言された。「私はバイロイト大学に移るので、この研究室は解散となる。よって、各々進路を自分で探すように」。常勤研究者の約半数は、不安に苛まれながらもユーリッヒに残ったが、ボスのいなくなった研究室に大した予算は来ない。その後、バイロイトが超低温研究のメッカとなり、日本からも優秀な研究者が次々と訪れたようである。

私は、ルール・ボッフム大学のProf. S. Methfesselの研究室で面接を兼ねたセミナーを行い、採用してもらった。この研究室は希土類化合物の単結晶育成や磁性研究でBell研の流れを汲む優れた伝統があり、糟谷先生とも交流があった。ところが、定年近い教授の下で、助教授をはじめとする面々は、他大学に転出するための書類作りに励んでいた。実際、ケルン大学に転出が決まって喜んでいたり、その後米国のワシントン大学に移って有名になった方もいる。Prof. Methfesselの退職後、研究分野はバルク磁性体から薄膜磁性に変わった。

その退職前に、私は運よく東京大学物性研究所の石川征靖先生の初代助手に採用された。前の所員の残した薬品や装置の片づけ、大小のガラスデューワーなどの整理から始めた。³Heクライオスタットの図面引き、排気ポンプの組み立て、交流磁化率測定装置の作製など、低温実験の基礎を身に着けることが出来た。1986年暮れから銅酸化物高温超伝導の大嵐に巻き込まれた。この嵐のなかで学んだことは、良い試料を作れば、NMR、ミュエス

アール、超音波などの専門家が大変喜んで測定してくれるということであった。その学習の結果、試料作りをその後の生業とすることになった。石川先生の熱心なマンツーマン指導で、博士を取得した学生は少なくない。そのうち3名は後に私が広島大学で立ち上げた研究室で、博士研究員として助けてくれた。一方、石川研の助手は2代目までとなった。物性研では定年の近い所員には助手が手当てされないので、退職時の研究室の片づけは大変だったようである。私はウラン用のアーク炉の片付けに参上した。

広島大学総合科学部の助教授であった時、アムステルダム大学のVan der Waals-Zeeman 研究所に3か月間滞在した。当時は、Prof. J.J. M. Franseをボスとして、理論家の de Châtel、強磁場実験のFrank de Bohr、結晶育成のAlois Menovsky、若手のAnne de Visserらが強力なチームを作ってUPT₃を始めとする重い電子系の研究で世界を牽引していた。ポーランド、チェコ、ベトナム、中国などからの研究者が引切り無しに訪れていた。その晴れ舞台が1994年のアムステルダム大学でのSCES国際会議であった。ところが、強磁場施設の更新が認められなかったこともあって、Franseが学長となっても後任の補充は進まず、研究室の陣容はどんどん弱体化した。

以上のような体験を通して、私は研究室には寿命があることを認識した。どんなに優れた教授であっても、いや、優れていればこそ、一代限りであった。新しく勃興してくる分野のリーダーがとって代わるのが、進歩なのかもしれない。しかし、その分野が本当に伸びるかどうかは、時間が経たないと判らないところに、人事の難しさがある。たとえ伝統のある研究分野であっても、新しい特色を出していかなければ、研究室の存続が難しいことは確かである。この記事を読んでも読んでくれた読者が、「大学改革」の嵐の中を賢明に生き延びてくれることを祈る。



コーヒーブレイク (私のおすすめスポット)

知られざる首都大の名所 東京都を型取ったペンローズタイル

松田 達磨

首都大学東京 理学研究科

Newsletter では、研究者の皆様が普段研究をされているサイト等で、意外にも知られていない名所や、個人的におすすめのスポット、風景を紹介する企画を設けました。第一弾としまして、僭越ながら編集委員を代表いたしまして、松田より首都大の情報を提供させて頂きたいと思えます。

上の写真は、首都大学東京南大沢キャンパスの正門から入って直進すること約50 mほどの場所にある建屋壁面に設置された、東京都を型取ったペンローズタイルです。ペンローズパターンについては、近年、準結晶に関する研究もすすんでおり、お耳にすることがあるかと思えます。この写真のタイルは、首都大の前身である都立大学が目黒区にあったときに、都の文化のデザイン事業の一つとして作成され、その後1991年に現在の南大沢キャンパスに移転したおりに、同時に移設されたものとのことです。1986年には、来日した宇宙物理学者 ロジャー・ペンローズ氏が実際に訪れたことが、当時の朝日新聞に掲載されております。ときおり、南大沢キャンパスにて開催される、理工学系の学会・国際会議期間中は、このペンローズパターンに気付いた研究者達の記念撮影スポットとなっているようです。最近では、刑事ものの某人気TVドラマの背景として映り込んでいたとかいないとか。もし首都大に来られることがありましたら、是非探してみただければと思えます。

(首都大学東京名誉教授 岡部 豊 氏より情報及び写真を提供して頂きました。)

2018年10月からの領域関連行事

第12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: 2018年11月30日(金) ~ 12月1日(土)

場 所: 奈良先端科学技術大学院大学ミレニアムホール(奈良県生駒市)

International Workshop on j-Fermion Physics and Materials

J-Physics主催

日 時: 2018年12月4日(火) ~ 6日(木)

場 所: University of Otago, Dunedin, New Zealand

世話人: 野原 実(岡山大学)

B01トピカルミーティング

「カイラル磁性体EuPtSiの電子物性 ―研究の現状と今後の展開―」

J-Physics主催

日 時: 2018年12月14日(金) 8:50 - 18:00

場 所: 琉球大学50周年記念会館(沖縄県中頭郡西原町)

世話人: 與儀護(琉球大学) 神戸振作(原子力機構)

C01トピカルミーティング「拡張多極子研究の最前線(仮)」

J-Physics主催

日 時: 未定(2019年1月頃)

場 所: 未定

国際ワークショップ“Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2019 (TPFC 2019)”

J-Physics共催

日 時: 2019年2月18日(月) ~ 20日(水)

場 所: 東大の柏の葉キャンパスサテライト(千葉県柏市)

世話人: 中辻 知(東京大学物性研)

日本物理学会 (2019年第74回年次大会)

日 時/場 所: 2019年3月14日(木) ~ 17日(日) / 九州大学 伊都キャンパス(福岡市)

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19日(木) ~ 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)

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



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 #06

Physics of Conductive Multipole Systems

September

編集後記

この夏は自然災害のニュースばかり、西日本豪雨、災害級の暑さ、台風第21号、北海道胆振東部地震、その後も次々と非常に強い台風がやってきております。被災された方々には、心からお見舞い申し上げます。

一方、「J-」に関するニュースも気になりました。「j-steak」、これは日本発いきなりステーキのスタイルをニューヨーカーに紹介し、アメリカの新たな食文化へと発展させていくことを目指したものだそうです。「J-Startup」、こちらは経済産業省の新たなベンチャー支援策で、世界で戦い、勝てるスタートアップ企業を生み出し、革新的な技術やビジネスモデルで世界に新しい価値を提供することを目的としているそうです。これらは、「J-Physics」同様に「J-」のもと、日本発で世界で花開かせようとする志は通じるものがあるように感じました。

さて今号は、如何だったでしょうか？理論家、実験家より、今後の物作りの方向性や、新たに加わった公募研究の紹介、今後の研究展開にワクワクさせられます。また、貴重で、重みのある話もあります。堪能頂ければ幸いです。最後に、原稿を執筆頂いた方々、編集に関わった方々に深く感謝いたします。(H.N.)



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6号

2018年9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/>